

# VIVIENDAS SOLARES AUTOSUFICIENTES: PARTICIPACIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID EN EL CONCURSO “SOLAR DECATHLON”

(SELF-SUFFICIENT SOLAR HOUSES: PARTICIPATION OF THE UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID IN THE DESIGN “SOLAR DECATHLON”)

Estefanía Caamaño Martín<sup>(1)</sup>, Javier Neila González<sup>(2)</sup>, Fco. Javier Jiménez Leube<sup>(3)</sup>, Miguel Ángel Egido Aguilera<sup>(1)</sup>, María J. Uzquiano<sup>(2)</sup>, José Miguel Gómez Osuna<sup>(2)</sup>, César Bedoya Frutos<sup>(2)</sup>, Luis Magdalena Layos<sup>(3)</sup>, Alfonso García Santos<sup>(2)</sup>

Fecha de recepción: 3-XII-04

ESPAÑA

106-16

## RESUMEN

*La Universidad Politécnica de Madrid ha sido seleccionada para participar en un concurso internacional de diseño, construcción y demostración de una vivienda solar autosuficiente que, sin renunciar a las comodidades de un hogar moderno, sepa conciliar la integración de nuevas tecnologías y el respeto a su entorno. La aventura, denominada Solar Decathlon, representa una experiencia multidisciplinar de carácter investigador y educativo única en nuestra universidad, en la que profesores y alumnos de distintas disciplinas colaboran estrechamente en lo que, creemos, constituye una apuesta de futuro en pos de la sostenibilidad nacida de la alianza entre la arquitectura bioclimática, las tecnologías de aprovechamiento solar y la domótica.*

## SUMMARY

*The Universidad Politécnica de Madrid (UPM) has been selected to participate in an international design and construction contest of a self-sufficient solar house. The goal is to build something that would be both, comfortable and capable of dealing with modern equipments, and beyond that, finding harmony between technology and environment. This adventure is called Solar Decathlon. Represents a unique educational and investigative experience for this university in which alumni and professors of multiple disciplines collaborate in one project, making a sustainable house born in the merging of bioclimatic architecture, the use of solar energy and domotics.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo describe en primer lugar las características del concurso. A continuación se presentan las particularidades del prototipo de vivienda a nivel de diseño, materiales y sistemas constituyentes. La exposición se complementa con otras dimensiones relevantes del proyecto como son la educativa y organizativa de un concurso de estas características, que supondrá el desplazamiento de un equipo de más de 30 personas a Washington en el otoño de 2005 para demostrar las posibilidades de nues-

tra propuesta. Por último, se presentan las líneas generales de un proyecto de investigación que dará continuidad a la colaboración hasta finales de 2007.

## 2. EL “SOLAR DECATHLON”

El concurso internacional *Solar Decathlon* es una iniciativa impulsada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y dirigida a universidades, que persigue difundir la posibilidad de conciliar las buenas prácticas arquitectónicas con un uso racional de la energía, a través del aprovechamiento de la energía solar en su sentido más amplio -pasiva y activamente- y el uso de tecnologías eficientes actualmente disponibles (1). En particular, consiste en el diseño, construcción y demostración de una vi-

<sup>(1)</sup> Instituto de Energía Solar, ETSI Telecomunicación, UPM

<sup>(2)</sup> ETS Arquitectura-Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, UPM

<sup>(3)</sup> Centro de Domótica Integral, ETSI Telecomunicación, UPM

vienda unifamiliar de unos 70 m<sup>2</sup>, alimentada exclusivamente por energía solar, que responda a las necesidades de un hogar de nuestros días y muestre el uso práctico de las energías renovables en la vida cotidiana. La denominación *Decathlon* (decatlón) emana de las características de la competición, formada por diez pruebas en las que los estudiantes de las universidades participantes (los denominados “decatletas”) deben demostrar la viabilidad de sus propuestas a profesionales de los ámbitos de la arquitectura, ingeniería, medios de comunicación y al público en general.

Tres son los principios básicos que sustentan el espíritu de la competición, a saber:

- 1) Suministrar la energía necesaria para llevar a cabo tareas cotidianas de alimentación, limpieza, ocio, trabajo, transporte, etc., con un nivel de confort aceptable y haciendo uso exclusivo de la energía solar captada por la vivienda durante los siete días de la fase de exhibición, en Washington D.C.;
- 2) Demostrar a la sociedad, de una forma práctica, la existencia de principios de diseño arquitectónico que hacen uso de tecnologías solares y, a través de ellas, sus beneficios de tipo estético y energético;
- 3) Estimular la investigación y el desarrollo relacionados con las energías renovables y la eficiencia energética, especialmente en el sector de la edificación.

La primera edición del concurso *Solar Decathlon* contó con la participación de 14 universidades americanas que, desde mayo de 2001 y a lo largo de 16 meses, llevaron a cabo el diseño, construcción y transporte final de sus prototipos hasta el *National Mall* de la ciudad de Washington (explanada frente al Capitolio), lugar de celebración del evento. Allí, y en tan sólo una semana, los equipos participantes realizaron la construcción y puesta a punto de las viviendas, para mostrarlas al jurado y visitantes (Figura 1).



Figura 1.- Vista del National Mall de Washington durante la celebración del concurso “Solar Decathlon 2002”.

## 2.1. El “Solar Decathlon 2005”

En febrero de 2003 se realizó una nueva convocatoria para el concurso *Solar Decathlon*, ampliándose hasta 19 el número de universidades participantes. Tras un proceso de evaluación de propuestas, resultaron finalmente seleccionadas 18 americanas -de Estados Unidos, Canadá y Puerto Rico- y, por primera vez, una europea, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). La competición, iniciada oficialmente en septiembre de 2003, finalizará a comienzos de octubre de 2005.

La Tabla I resume el contenido de las diez pruebas a superar en la segunda edición del *Solar Decathlon*, siendo el equipo ganador el que más puntos consiga en su conjunto. Conviene resaltar que son los estudiantes los verdaderos protagonistas del concurso, en especial durante su fase de exhibición, ya que sólo ellos pueden mostrar la vivienda a los jurados y público visitante, así como conducir el coche eléctrico, durante los 7-10 días que duran las pruebas. Estas son básicamente de dos tipos:

- a) Valoración de aspectos relacionados con el diseño, construcción y funcionamiento de la vivienda.
- b) Realización de determinadas tareas que son valoradas, bien cualitativamente por jurados de profesionales y el público visitante, bien de forma cuantitativa mediante la realización de medidas específicas relativas al comportamiento de la vivienda (temperatura, humedad, iluminación) y a la satisfacción de las necesidades energéticas diarias.

## 3. LA PROPUESTA DE LA UPM: UN PROYECTO DE UNIVERSIDAD

La participación en un concurso de las características del *Solar Decathlon* presenta para la Universidad Politécnica de Madrid una serie de retos derivados, tanto de la propia filosofía del concurso -las viviendas deben construirse en los Estados Unidos y cumplir, consecuentemente, normativas diferentes de las europeas (2)- como de tipo logístico -transporte de la vivienda y el equipo hasta Washington- que representan, en la práctica, dificultades añadidas al ya de por sí ambicioso objetivo de diseñar y construir una vivienda solar autosuficiente.

El equipo que representará a la UPM constituye un claro ejemplo de trabajo multidisciplinar con el que se desea potenciar la sinergia resultante de unir el conocimiento y la experiencia de distintas Escuelas, Institutos y Centros de investigación con la ilusión y el trabajo de nuestros estudiantes. En este sentido, se han definido grupos de trabajo, especializados en las tres grandes áreas que definen nuestra propuesta:

- 1) Grupo de Arquitectura, responsable del diseño y construcción de una vivienda bioclimática que represente lo

TABLA I  
Descripción de las diez pruebas que rigen el concurso "Solar Decathlon 2005"

<i>Nombre – Descripción</i>	<i>Máxima puntuación</i>
<b>1. Arquitectura</b> – En qué medida la vivienda satisface las necesidades de confort, demuestra una buena organización de espacios y resulta visualmente atractiva	200
<b>2. Atractivo</b> – Grado de aceptación de la vivienda desde la perspectiva de la demanda social (mercado)	100
<b>3. Desarrollo del Proyecto</b> – Calidad de la documentación elaborada a lo largo del proyecto (estudios previos, diseño, construcción, plan de obra y seguridad, presupuesto, etc.)	100
<b>4. Comunicaciones</b> – Elaboración de contenidos para explicar las particularidades de la vivienda (principios de diseño, soluciones y tecnologías empleadas) y presentación del equipo a los visitantes (organizadores, profesionales, colegios, medios de comunicación, usuarios de internet)	100
<b>5. Confort</b> – En qué medida la vivienda proporciona niveles adecuados de temperatura, humedad relativa y calidad del aire	100
<b>6. Equipamiento</b> – Funcionamiento diario de electrodomésticos empleados habitualmente (lavadora, lavavajillas, microondas, nevera, televisión, vídeo, ordenador, iluminación,...)	100
<b>7. Agua caliente</b> – Suministro mínimo diario de 120 litros de agua caliente sanitaria	100
<b>8. Iluminación</b> – En qué medida la vivienda proporciona niveles adecuados de iluminación natural y artificial, haciendo uso de tecnologías eficientes	100
<b>9. Balance energético</b> – En qué medida la energía solar suministra la electricidad requerida para satisfacer las necesidades de la vivienda	100
<b>10. Movilidad</b> – Una vez satisfechas las necesidades de la vivienda, suministro de electricidad a un coche eléctrico para realizar desplazamientos cotidianos	100

mejor de la tradición constructiva mediterránea e íntegra, de forma atractiva, tecnologías de aprovechamiento solar.

2) Grupo de Sistemas fotovoltaicos, responsable del suministro de la electricidad demandada por la vivienda y el coche eléctrico mediante una instalación solar fotovoltaica eficiente.

3) Grupo de Domótica, responsable del equipamiento doméstico, el diseño de una página web explicativa de nuestra propuesta, así como el sistema de control para el uso adecuado de la energía en la vivienda, aprovechando las ventajas que ofrecen actualmente las tecnologías de la información y las comunicaciones.

Centros de la UPM participantes:

- Instituto de Energía Solar (IES, coordinador técnico y del grupo de Sistemas fotovoltaicos).

- Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM, coordinador del grupo de Arquitectura).

- Centro de Domótica Integral (CEDINT, coordinador del grupo de Domótica).

- Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros de Telecomunicación e Ingenieros Agrónomos.

El plan de trabajo diseñado, que se extiende hasta finales de 2005, se divide en cinco fases mostradas y descritas a continuación:

*Fase 1- Análisis de mercado y estudio de normativas.*

*Fase 2- Diseño preliminar de la vivienda.*

*Fase 3- Construcción de la vivienda en las instalaciones de la UPM.*

*Fase 4- Pruebas y ensayos.*

*Fase 5- Concurso "Solar Decathlon" y entrega de la vivienda en su emplazamiento final.*

El proyecto ha tenido lugar en la explanada situada frente a la fachada principal de la E.T.S.I. de Agrónomos. Con ello el equipo de la UPM desea sumarse a los actos que se celebrarán el 150º aniversario de la creación de dicha Escuela y los estudios de perito agrícola e ingeniero agrónomo. Allí nuestros alumnos, ayudados por profesores y ex-



Figura 2.- "Magic Box" en E.T.S.I. Agrónomos.

peritos de las empresas suministradoras, en primer lugar han montado la vivienda y la han equipado con el objetivo de prepararla para el concurso (Figura 2).

Seguidamente se describen las características de la vivienda y sus sistemas constituyentes (energéticos solares y de control), así como otros aspectos de gran importancia para el éxito del proyecto en su conjunto, como son las dimensiones educativa y organizativa.

### 3.1. "Magic Box" (la Caja Mágica)

*Solar Decathlon* ha prestado especial importancia a aspectos tales como la calidad del aire, el confort térmico, la humedad y la adecuada distribución de temperaturas en el interior. De gran relevancia igualmente, es la minimización de las necesidades energéticas mediante la aplicación de principios de diseño bioclimáticos procedentes de la arquitectura vernácula española, optimizados gracias a las tecnologías actuales disponibles para el acondicionamiento y la producción de electricidad y el agua caliente sanitaria.

#### 3.1.1. El edificio

El objetivo fundamental consiste en desarrollar una pequeña vivienda autosuficiente desde la perspectiva eléctrica. Ya de por sí esto habría podido constituir una meta amplia y ambiciosa; sin embargo, el equipo UPM ha entendido la propuesta como un reto global en términos de habitabilidad, contaminación, energía, recursos, materiales y sostenibilidad. Así pues, nuestro proyecto pretende ser, no sólo eléctricamente autosuficiente, sino también bioclimático en su más amplia definición, y pleno de aromas europeos, mediterráneos y puramente españoles, ya

que entendemos que representamos una forma distinta de ver el espacio arquitectónico, la construcción y la vida dentro de la vivienda. "Magic Box", representa el espacio versátil y adaptable, que surge cuando se precisa, que se nos muestra como una caja mágica que esconde en su interior sus posibilidades, siempre dispuesta a sorprendernos, multiplicándose y desarrollándose.

El edificio diseñado es una vivienda para una pareja o, excepcionalmente, para una persona sola. De dimensiones medianas -su superficie es inferior a 70 m<sup>2</sup>-, la casa se integra en un solar de unos 500 m<sup>2</sup> y su volumen se confina dentro de los límites de un sólido hipotético de forma piramidal y altura inferior a 5,5 m, con el fin de evitar posibles sombras de sus elementos constructivos sobre edificios colindantes. La limitada superficie interior contrasta, en cambio, con la amplia variedad de usos exigida por el programa, que incluye una oficina, representando la imagen futura de una persona que ejerza su actividad profesional sola en casa y mantenga escaso contacto con el exterior.

Aunque no sea ésta la manera habitual de considerar la arquitectura bioclimática, entendemos que la calidad de vida constituye uno de sus objetivos más claros. Es decir, tan importante es conseguir las características óptimas de habitabilidad en el interior de un edificio, como minimizar la influencia sobre el entorno de la contaminación por él generada, o hacer un uso sostenible de los recursos para su construcción y mantenimiento. Por esa razón, todos los ámbitos de la vivienda (cocina, comedor, zona de estar, dormitorio y despacho, véase Figura 3), se unen entre sí para conformar un espacio único y amplio, digno de ser vivido y cuyo uso resulte satisfactorio. No obstante, la casa también puede ser fragmentada en habitaciones independientes, de modo que cada recinto pueda aislarse y utili-



Figura 3.- Planta de la vivienda (disposición plegada).

zarse con fines específicos y un carácter más íntimo. Pero esta fragmentación no es ficticia ni exclusivamente visual, sino que trasciende a la simple línea divisoria del plano -limpia y elegante, aunque ineficaz-, para pasar a ser una auténtica pared, capaz de aislar acústicamente e impedir las molestias que pueda generar una persona que esté trabajando con un ordenador, utilizando una impresora o un fax, junto a una estancia donde haya otra durmiendo; o el ruido de alguien que escuche música o esté recogiendo la cocina al lado de otro que esté leyendo. Hemos introducido en la vivienda un sistema que proporciona una gran limpieza espacial cuando está recogido y, a la vez, crea auténticas habitaciones independientes cuando está expandido, todo ello con un mínimo consumo energético (la mayor parte del movimiento se hace manualmente y sin dificultad alguna), lo que representa un interés añadido para nuestros objetivos.

Como se ha indicado en un principio, la vivienda se sustenta en los tres pilares del bioclimatismo energético: la captación de energía, su distribución a todas las habitaciones del edificio y su acumulación, tanto para cubrir la demanda cuando no hay suministro, como para amortiguar el golpe térmico que representa la captación de energía natural. La solución a ambas situaciones suele venir acompañada de una concentración extrema y, por tanto, de unas condiciones de uso inadecuadas. Nuestra propuesta concibe la integración de los tres pilares mencionados del modo siguiente:

- Dadas las características climáticas de la ciudad de Washington, la **captación de energía solar** en invierno ha de responder a la premisa clásica de grandes superficies acristaladas orientadas a mediodía. Para evitar que penetre la radiación solar durante los meses más cálidos, estos huecos quedan perfectamente protegidos por medio de voladizos -el sol estival en esos momentos está muy alto- y partes ciegas en los extremos de la vivienda, que evitarán los posibles perjuicios de las horas anteriores y posteriores al mediodía solar.

Pero, sin duda, el principal sistema captador y transformador -en forma de electricidad fotovoltaica y, en menor medida, de energía solar térmica- de energía de la vivienda es la cubierta. La impresión que suele sacarse de un edificio bioclimático y solar como éste es la de la cubierta, elemento que además de ser el más visible en un primer momento, marca inevitablemente su imagen final. Por ello, hemos decidido romper con la tipología tradicional de cubierta fotovoltaica, procurando que la integración arquitectónica aporte nuevas ideas y soluciones. Trascendiendo lo que sería un diseño eléctricamente óptimo, hemos buscado alternativas que puedan facilitar la aplicación de los sistemas solares fotovoltaicos y térmicos en futuros proyectos, contribuyendo así a vencer la reacción contraria que existe entre muchos profesionales de la construcción, arquitectos y promotores. Nuestra cubierta (véase Figura 4) se eleva sobre diferentes planos, en forma de estructura diáfana que permite apreciar su base de apoyo (cerchas) o cualquier elemento vegetal que haya debajo, provocando un efecto de sinceridad constructiva, transparencia y diversidad, ya que su aspecto se irá transformando según la luz incida sobre ella por encima o por debajo, dando lugar a una imagen cambiante y rica en matices.

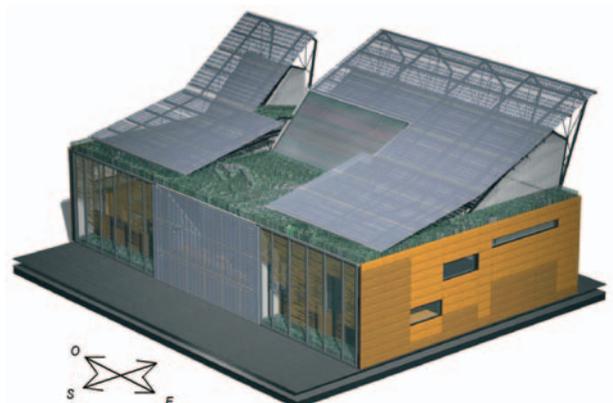


Figura 4.- Perspectiva general de "Magic Box".

En la fachada este no es recomendable que aparezcan huecos, ya que en invierno no se producirían captaciones y en verano no son deseables, habida cuenta que la temperatura exterior a partir de las 10 ó las 11 de la mañana es ya elevada. No obstante, y así lo creemos nosotros, una protección apropiada puede permitir la entrada de luz al amanecer, en los momentos aún condicionados por el frescor de la noche. Tampoco la fachada oeste debe tener huecos bajo ningún concepto; ésta es la lectura clásica del problema y sería la solución tradicional, pero en nuestra búsqueda de nuevas aportaciones a la arquitectura bioclimática hemos decidido introducir pequeñas aberturas en esa parte de la casa cuyas estancias (la cocina y el comedor) parecían necesitar relacionarse con el exterior, con las imágenes de su paisaje y con el control del acceso a la vivienda: se trata de breves huecos, emplazados a la altura de la visión de quien cocina de pie o come sentado.

El jardín representa una pieza clave del carácter mediterráneo, de clima cálido moderado. La vegetación absorberá la radiación solar incidente y la convertirá en biomasa, o bien disipará mediante mecanismos de evado-transpiración, sin sobrecalentar la cubierta ni, por tanto, el edificio. Así pues, pese a la pérdida de superficie captadora para la producción eléctrica, empleamos un sistema que ayuda a respirar a la vivienda, regula la temperatura en su interior, produce oxígeno y absorbe gases contaminantes ( $\text{CO}_2$ ), con evidentes beneficios para su entorno, su huella ecológica

Otro elemento captador y transformador de la vivienda es el sistema solar térmico, para el que se han escogido tubos de vacío como colectores, no sólo porque nos permiten jugar con mayor flexibilidad en lo relativo a la inclinación, sino porque representan una apuesta de futuro que

facilitará el empleo del calor solar más allá de su aplicación en la obtención de agua caliente y calefacción, esto es, en la producción de frío solar mediante máquinas de absorción. En nuestro proyecto, su uso fundamental es la producción de agua caliente sanitaria, además de contribuir ocasionalmente a la calefacción.

- La **distribución** de la energía captada -segundo pilar de la pirámide bioclimática- se realiza fundamentalmente por medio de la cubierta inclinada (véase Figura 5). Su estructura formal permite que el aire caliente se desplace desde la fachada captadora hasta el otro extremo de la vivienda por convección natural, estabilizando la temperatura en escasos minutos.

Hemos decidido jugar la baza más arriesgada del proyecto, una opción en la que creemos firmemente y sin la cual nuestra iniciativa perdería su esencia: en un momento determinado, una parte del edificio se desplaza, abandonando su posición imbricada y compacta y dando origen a un patio interior (véanse Figuras 6 y 7); mientras que el volumen plegado inicial, de bajo factor de forma, es más adecuado para el invierno, la estructura extendida es mucho más apropiada para la estación cálida. Asimismo, la respiración del edificio a través del patio será más intensa, la mayor superficie de piel permitirá una mejor disipación del calor y la sensación de ambigüedad interior/exterior se magnificará por medio de un ambiente difícilmente definible. Cuando las condiciones del clima lo requieran, el sector migratorio de la casa tornará a su posición original, devolviendo la compacidad a la construcción.

- El tercer pilar es la **acumulación energética**. En la arquitectura tradicional (la más auténtica y primitiva arquitectura bioclimática), tanto ésta como la estabilidad tér-



Figura 5.- Alzado de la vivienda.



Figura 6.- Vista elevada de la vivienda finalizada.

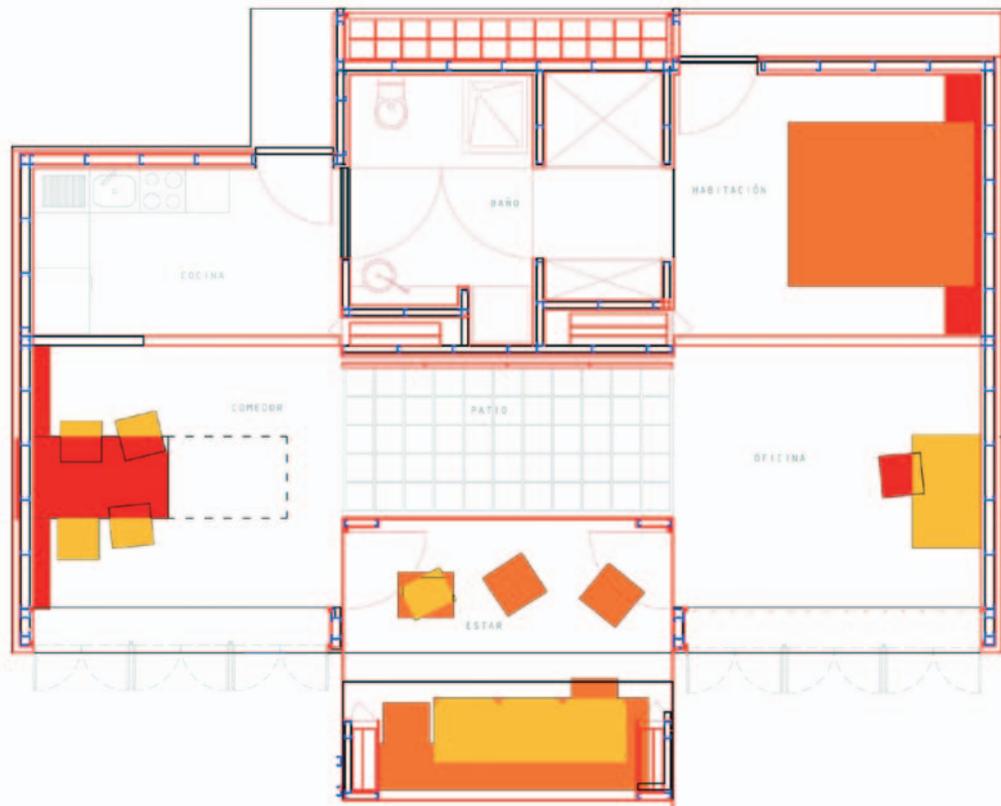


Figura 7.- Planta de la vivienda (posición desplegada).

mica dependían de la masa. No parece factible incorporar gruesos muros de piedra, tierra o cerámica a la arquitectura actual, y menos aún a un edificio transportable que debe construirse en tan sólo cuatro días. La masa térmica que radica en el calor sensible se sustituye en nuestra propuesta por la basada en el calor latente y, por tanto, en el invertido en el cambio de estado de una sustancia. Se trata de un procedimiento efectivo, más ligero y acorde con la filosofía del proyecto: las sustancias se encontrarán confinadas bajo el suelo de la casa, y una corriente de aire inducida se encargará de cargarlas y descargarlas de energía.

Así, en condiciones de clima veraniego, además de los elementos de protección solar descritos, el edificio se acondicionará con el frescor que aporte el aire de la noche. Durante esas horas, las sustancias cambiarán su estado de líquido a sólido acumulando energía, al tiempo que la casa se acondicionará directamente mediante la ventilación natural, a través de los huecos abiertos a los vientos dominantes y dirigidos por todo el edificio gracias a la cubierta inclinada. Por la mañana, cuando la temperatura exterior ya no sea confortable, se cerrarán los huecos exteriores y se hará recircular el aire interior a través de las sustancias que han acumulado el frescor de la noche; a lo largo del día, éstas retornarán al estado líquido, absorbiendo calor del interior de la vivienda y proporcionando la temperatura de bienestar (constante). En condiciones de invierno se emplea el mismo sistema de acumulación: el calor captado directamente por los huecos o retenido en los pequeños invernaderos de la fachada sur, junto con el procedente de las cargas internas producidas por los ocupantes y equipamiento de la vivienda se hará circular por las sustancias de acumulación, que pasarán de estado sólido a



Figura 8.- Interior. Suelo cerámico.

líquido almacenando calor a una temperatura estable, la misma a la que será recuperado cuando sea necesario, en forma de aire caliente.

Los invernaderos de invierno se abrirán en verano y se convertirán en jardines y protecciones solares para los huecos. Las rejillas que dejaban salir el aire también serán clausuradas y darán lugar a otras que proporcionarán una energía diferente. Los paramentos que permanecían abiertos se cerrarán parcialmente para mantener la ventilación higiénica indispensable... todo en base a la flexibilidad y la eficacia de uso de nuestra pequeña vivienda.

Frente a la característica madera de las obras norteamericanas, otra de las improntas claramente españolas será el acabado de las fachadas en material cerámico (Figura 5). Una de sus mayores ventajas consiste en la baja carga energética, que unida a su posible reutilización, lo convierte en un material claramente sostenible, a pesar de no ser reciclable.

Finalmente, los acabados interiores deben cumplir dos funciones, a saber: ofrecer a los usuarios la calidez propia de una vivienda y actuar como acumuladores energéticos de la radiación que incida sobre ellos (Figura 8).

### 3.1.2. El sistema solar fotovoltaico

Como premisa básica de diseño, el sistema fotovoltaico debe ser capaz de suministrar la energía eléctrica necesaria que demandan las aplicaciones de consumo. En este sentido, la Tabla II muestra una primera estimación. El consumo diario estimado durante la fase de exhibición del Solar Decathlon es de unos 12 kWh/día, valor que razonablemente podría reducirse en un 25% mediante un uso de la energía más racional que el impuesto por las reglas del concurso. Nuestra estrategia ha sido incrementar al máximo el número de módulos disponibles, permitiendo cierta flexibilidad en su disposición, así como limitar la probabilidad de fallo en el suministro de electricidad durante el mes de la competición al 1%.

Para la integración arquitectónica de módulos fotovoltaicos en la cubierta y fachada de la vivienda se ha “roto” con la imagen típica (Figura 9) de una vivienda solar eléctricamente autosuficiente en la que los captadores (módulos fotovoltaicos) ocupan la totalidad de una cubierta cuyo diseño, por lo general condicionado por la necesidad de captación solar, presenta un único ángulo de inclinación. “Magic Box”, en cambio, dispone de cuatro superficies en las que se integran los módulos fotovoltaicos, lo que representa un reto añadido para el diseño del sistema fotovoltaico. En efecto, la Figura 10 muestra la configuración típica de un sistema fotovoltaico autónomo -esto es, aislado de la red eléctrica, tal y como establecen las bases del concurso- en el que se distinguen el generador fotovoltaico (conjunto de módulos conectados

TABLA II  
Equipamiento de la vivienda, uso y consumos estimados.

<i>Equipo</i>	<i>Uso diario (h)</i>	<i>Consumo medio diario (Wh)</i>	<i>Uso semanal (días/semana)</i>
Lavadora	--	1020	3
Lavavajillas	--	500	4
Secadora	--	2700	4
Cocina	0,6	600	7
Campana Extractora	0,40	72	7
Refrigerador	--	960	7
Microondas	0,5	400	7
TV	5	425	7
DVD	22,5	57	5
Servidor web	24	35	7
Impresora oficina	0,5	67	6
Escáner oficina	0,3	1200	6
Iluminación	6	10	7
Monitorización	24	4	7
Termo	0,3	480	--
HVAC	6	360	--

eléctricamente entre sí y estructura de soporte asociada), el bloque de acondicionamiento de potencia (formado por un regulador de carga que alimenta las cargas en corriente continua y es el responsable de proteger las baterías frente

a descargas o sobrecargas excesivas, así como un inversor o convertidor CC/CA para alimentar las cargas en corriente alterna) y la acumulación de energía (baterías electroquímicas), necesaria para adaptar la disponibilidad energética a la demanda.



Figura 9.- Paneles solares.

La existencia de agrupaciones de módulos fotovoltaicos con cuatro ángulos de inclinación diferentes (12°, 25° y 39° para los módulos integrados en la cubierta, y 90° para los de la fachada) plantea el problema de que, al recibir diferente radiación solar, generarán diferente potencia en cada momento, lo que desaconseja adoptar la configuración mostrada de la figura anterior, en la que se presuponen las mismas condiciones de operación para todos los módulos del generador. En cambio, es preferible adoptar una configuración modular que permita extraer en cada momento la máxima potencia eléctrica disponible de cada agrupación de módulos. Ello ha sido posible gracias al diseño mostrado en la Figura 11, en el que las baterías,

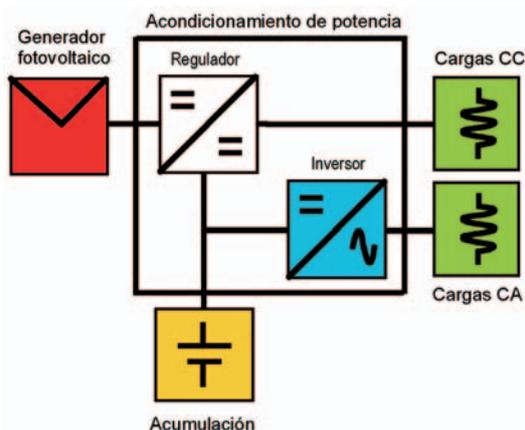


Figura 10.- Diagrama de bloques típico de un sistema fotovoltaico autónomo.

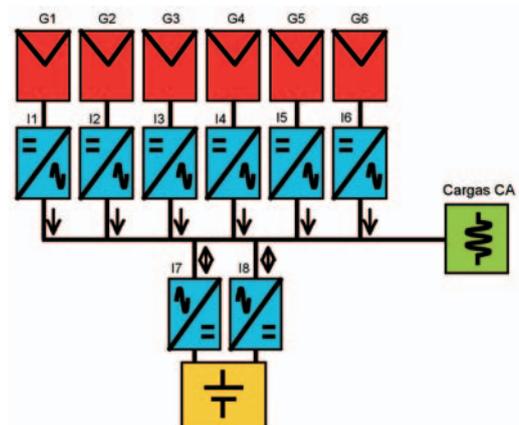


Figura 11.- Diagrama de bloques típico del sistema fotovoltaico diseñado.

conectadas a sendos inversores bidireccionales, permiten crear una “red eléctrica local” a la que se conectan 6 generadores fotovoltaicos independientes, conectados cada uno de ellos a su correspondiente inversor. Conviene señalar que esta configuración confiere al diseño la máxima versatilidad, ya que su adaptación al caso habitual de que exista suministro de red eléctrica puede realizarse de manera sencilla, sin más que eliminar los inversores bidireccionales y el sistema de acumulación, convirtiendo así la instalación fotovoltaica en una de tipo “conectada a red” en la que el criterio de autosuficiencia eléctrica se plantearía en términos anuales. La Tabla III muestra las características principales de los generadores fotovoltaicos y equipos inversores. El acumulador, de 1.500 Amperios por hora de capacidad y 48 VCC de tensión nominal, proporcionará una autonomía superior a los 4 días, lo que conduce a una probabilidad de fallo del suministro eléctrico inferior al 1%.

Al comienzo del día, los generadores fotovoltaicos y sus correspondientes inversores producirán la potencia eléctrica que servirá, bien para alimentar directamente las cargas eléctricas, bien para cargar las baterías para un uso posterior de la electricidad generada. El 80% de la superficie fotovoltaica estará formada por módulos comerciales, el 20% restante incorporará módulos de diseño específico (principalmente en la fachada sur).

### 3.1.3. Sistema de control, domótica y servicios del hogar digital

De acuerdo con las pruebas establecidas para el certamen *Solar Decathlon*, las variables a controlar no se limitan a la temperatura y al grado de humedad relativa interior de la vivienda sino que también es necesario controlar los flujos y calidad del aire, así como las temperaturas del sistema de agua caliente sanitaria. El sistema de control de la vivienda se completará con todos los elementos de seguridad necesarios: detectores de presencia, de hidrógeno para las baterías, detectores de humo y termovelocimétricos.

Podemos distinguir tres fases diferenciadas para el funcionamiento del sistema de control:

a) Durante las fases de construcción y pruebas. Se está diseñando un sistema de monitorización que permita ajustar el funcionamiento de nuestra propuesta (localización de fugas térmicas, flujos de aire, etc.); la monitorización se va a realizar así de forma exhaustiva, incluyendo la utilización de cámaras de infrarrojo para la obtención de imágenes térmicas. Este sistema permitirá así caracterizar el emplazamiento y calibrar los sistemas para poder obtener una “imagen” de la situación de la vivienda (temperatura, humedad, calidad del aire) en tiempo real, a partir de la información proporcionada por el conjunto de sensores a utilizar durante el certamen.

b) Durante el concurso en Washington. El número de sensores y actuadores se optimizará, con el objeto de realizar la debida supervisión del comportamiento de la vivienda minimizando el consumo eléctrico, de acuerdo siempre con las especificaciones del concurso. Los sistemas de monitorización y control deberán funcionar de forma semi-autónoma permitiendo siempre que el operador pueda tomar decisiones “críticas” sobre el funcionamiento general de la vivienda. Así por ejemplo, si la situación de la vivienda -temperatura ambiente, temperatura de las sustancias de acumulación térmica, carga térmica- indica que no se va a poder alcanzar la temperatura de referencia de confort, el “usuario” (“decatleta” en este caso) debe ser capaz de suspender el gasto energético que supone mantener el control sobre la temperatura.

c) Durante la fase de investigación posterior. Una vez finalizado el concurso *Solar Decathlon* (véase apartado 4) se diseñará un plan de estudio del comportamiento de la vivienda, incorporando un servidor-web que permita su monitorización remota.

La instalación domótica de la vivienda debe permitir una gestión óptima de la energía. La carga tecnológica a incorporar, los automatismos y diferentes elementos de actuación no deben convertirse en los sistemas principales que condicionen el uso por parte de los supuestos habitantes, sino que deben colaborar a su bienestar. Así, se pretende que la utilización de la domótica constituya un medio para la mejora de las condiciones de vida y habitabilidad de la vivienda, teniendo siempre presente el protagonismo de sus ocupantes.

En este sentido, el aprovechamiento de sistemas de bajo coste energético de cara y alto valor añadido como son los sistemas de tele-asistencia o incluso los de tele-medicina (basados en la monitorización remota del habitante) contribuyen al concepto de “vivienda que cuida a su usuario”; otros elementos, como entrenadores de buenos hábitos nutricionales contribuyen también al bienestar del usuario final. El acceso remoto a los servicios del hogar y la posibilidad de que el usuario reciba la información de las alarmas técnicas generadas remotamente forma parte de la “vivienda que te llama”.

Durante la primera fase del proyecto se han estudiado diferentes estándares para medida y el control remotos, con el objeto de definir la tecnología base sobre la que se basará el sistema de monitorización y control a incorporar en la vivienda. El estudio ha estado centrado sobre las posibilidades que ofrecen tecnologías como: Lonworks (Estándar Americano de bus industrial-domótico), EIB-KNX (Estándar Europeo Domótico), PLC (Autómatas programables), X10, u otros sistemas propietarios. Finalmente, se ha optado por implementar el sistema domótico sobre la capa física de la norma RS485, lo que si bien obliga al diseño de los elementos sensores y actuadores a

TABLA III  
Características principales de los generadores fotovoltaicos e inversores.

<i>Generadores fotovoltaicos</i>					
	1 y 2	3 y 4	5	6	Total
Inclinación (°)	14	25	39	90	---
Superficie (m <sup>2</sup> )	12,8	11,8	6,8	7,5	23,4
Potencia (W) <sup>(1)</sup>	1650	1540	880	850	8110
Nota: <sup>(1)</sup> Valores referidos a las Condiciones Estándar de Medida (irradiancia solar 1000 W·m <sup>-2</sup> y temperatura de célula de 25°C)					
<i>Inversores</i>					
	1 a 4	5	6	7 y 8	Total
Potencia (W)	1700	1100	700	4500	17600
Características	C. Red	C. Red	C. Red	Bidireccional	

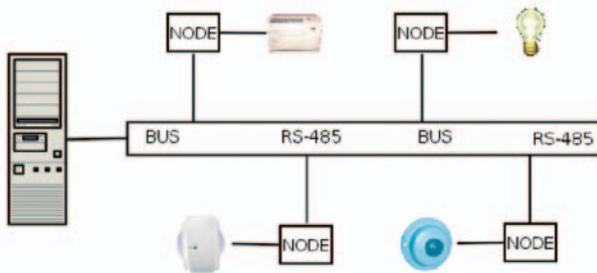


Figura 12.- Bus Domótico.

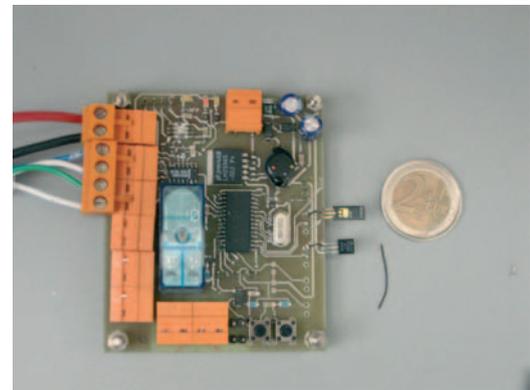


Figura 13.- Nodo del Bus Domótico.

medida, ofrece a cambio la ventaja de un gran alcance de la red de comunicación (1.200 m entre nodos) y la versatilidad de desarrollar un sistema de control/actuación adaptado a las necesidades del proyecto en cada una de las fases (Figura 12). Además de la capa física es necesario implementar los protocolos de comunicación, para lo que se ha definido un protocolo de tramas ASCII con protección suficiente para garantizar la calidad de la transmisión y una serie de comandos que permiten el dialogo y el control de los diferentes elementos. El sistema de control, a excepción de los sensores y actuadores (Figura 13), residirá en un ordenador central, el cual dispondrá de una interfaz gráfica que permitirá visualizar el estado cada uno de los elementos que componen el sistema de control.

#### 4. DE REGRESO A ESPAÑA: PROYECTO “HELIODOMO”

Pero la experiencia *Solar Decathlon* no finalizará con el concurso propiamente dicho. En diciembre de 2003 se presentó al Programa de Construcción del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 la propuesta “Heliodomo: nuevo concepto de vivienda autosuficiente”, que ha sido recientemente aprobada (referencia BIA2004-05234).

Los trabajos, que se extenderán hasta finales de 2007, combinarán la realización de análisis teóricos relacionados con las fases de diseño, elección de materiales y sistemas de construcción, con la realización de campañas experimentales sobre prototipos reales, el desarrollo de métodos para garantizar la calidad de los sistemas energéticos y el desarrollo de sistemas de gestión domóticos apropiados. Las campañas de medidas se realizarán sobre dos viviendas instaladas durante un año en diferentes lugares de nuestra geografía. Se espera con este proyecto continuar la labor de investigación, desarrollo y educación iniciada con el concurso *Solar Decathlon*, al tiempo que contribuir a acercar la sostenibilidad a las futuras viviendas de este siglo recién estrenado y ya tan necesitado de ella.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo recibido de instituciones y empresas para la participación de la Universidad de Madrid en el concurso *Solar Decathlon*, en particular, la Universidad Politécnica de Madrid (a través de su Rectorado y las Escuelas Técnicas Superiores de Arquitectura, Ingenieros de Telecomunicación e Ingenieros Agrónomos), el Ministerio de Educación y Ciencia, las empresas Isofotón, Intemper, Altran Sdb y Enersys, y la fundación Rafael Escolá.

También queremos agradecer a Gloria Morales, responsable de Comunicación de la E.T.S.I. Telecomunicación, por su inestimable ayuda en la difusión de esta experiencia.

## REFERENCIAS

(1) Más información en la página *web* oficial del concurso *Solar Decathlon*: [www.solardecathlon.org](http://www.solardecathlon.org)

(2) Especificaciones técnicas y normativas aplicables: Solar Decathlon Rules & Regulations (normativa propia del concurso, 12/3/2004), International Residential Code (IRC 2003), International Building Code (IBC 2003), International Plumbing Code (IPC 2003), International Mechanical Code (IMC 2003), International Fire Code (IFC 2003), National Electrical Code (2002).

\* \* \*

---

## NOTA:

Este artículo no habría sido posible sin el esfuerzo y la dedicación de todas las personas que forman parte del equipo *Solar Decathlon UPM*; los autores los consideran, en todo rigor, coautores de este trabajo y quieren hacer constar su participación:

Grupo de Arquitectura: Cristina Polo, Alicia Oliver, Carlos Bermejo, José Luis Pérez-Griffo, Daniel Cardoso, Rafael Palomares, Mónica Almagro, Luis Climent, Carlos García Trejo, Joaquín Hidalgo, Helder J. Martins, M. Carolina Hernández, Jon Laurenz, Leticia Rojo, Isabel Montañés, Mercedes Peña, Iván Alcantarilla, Sofía Melero, Gonzalo Used

Grupo de Sistemas Fotovoltaicos: Marcos Calvo, Ricardo Orduz, José Enrique Vega, Daniel Masa, Jorge Díaz, Santiago Novo, Michael Moleros

Grupo de Domótica: Álvaro Gutiérrez, Daniel Martín, Ángel Agudo, Borja Mascarell, Cecilia Torralbo, Jorge Mínguez, Laura Díaz, Nuria Pérez, Paloma de Juan, Susana Fernández, Vaishali Mirchandani