

# Gestión integral de energía en la acumulación geotérmica: datos, comunicaciones, decisiones.

**D.Guinea, O.Hernández, D.M.Guinea, P.Peña, D.Martín, L.Izco, E.Villanueva, M.G.García-Alegre,**

1 Instituto de Automática Industrial, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 28500 Arganda del Rey, Madrid. Contacto: Domingo Guinea [domingo@iai.csic.es](mailto:domingo@iai.csic.es)

**Resumen:** El consumo térmico de una vivienda (calefacción, ACS y refrigeración) es de 109 kWh /m<sup>2</sup> año, entre el 60 y el 70 % de la energía total destinada a la climatización, es decir, este porcentaje de la energía se utiliza básicamente para calentar y refrigerar edificios. En nuestro clima la radiación recibida supone un promedio de 1600 kWh /m<sup>2</sup> año que proporciona una temperatura media anual entorno a los 13 °C que el subsuelo integra y mantiene a escasa profundidad como consecuencia de su ingente masa y baja conductividad.

Esta aportación térmica como temperatura de "pozo" o de "bodega" supone una fuente de energía distribuida, renovable, de muy bajo coste y accesible a todos, con ligeras variaciones locales debidas a las condiciones climáticas de cada lugar. Si bien esta temperatura media de 13 °C puede ser una base excelente para refrigeración durante los períodos estivales se encuentra por debajo de la banda de confort humano en el interior de un edificio (20 °C).

Este trabajo muestra como dicha aportación térmica, usualmente desaprovechada, puede utilizarse como aportación en el interior de la envolvente, muros y cubierta, de un edificio para proporcionar un importante ahorro de la energía consumida en calefacción y refrigeración. Al tiempo el control de esta aportación de energía en cerramientos de piel múltiple permite el control sencillo de la permeabilidad térmica en forma localizada regulando independientemente la temperatura de cada espacio o sector.

**Palabras clave:** edificios inteligentes, arquitecturas de control, gestión de energía

## 1 INTRODUCCIÓN

Los esquemas actuales de uso de la energía en los procesos constructivos proceden de una época de recursos baratos y supuestamente inagotables, tanto en las materias primas utilizadas como en la energía necesaria para su extracción, transporte y procesamiento. Así, el ahorro supone el primer desafío a afrontar tanto en la realización de nuevos edificios como en la rehabilitación y el uso de los ya existentes. Por otro lado, nuestro país recibe por radiación directa sobre los edificios una cantidad global de energía muy superior a sus necesidades, usada como climatización por inercia térmica desde tiempos ancestrales.

El grado de eficiencia del aprovechamiento de los recursos en la industria de la construcción y en el funcionamiento de los edificios dista mucho del alcanzado en otros sectores como el metalúrgico o el petroquímico. Este retraso en el desarrollo tecnológico y sistematización de la producción ofrece la posibilidad de incorporar técnicas y métodos capaces de proporcionar claros avances para el inmediato futuro de la edificación.

En este contexto parece de gran rentabilidad el estudio de alternativas que integren, ante un nuevo proyecto, las tecnologías existentes en el mercado, seleccionando las más adecuadas en cada situación, en función de los intereses particulares del constructor y de los potenciales propietarios y usuarios del edificio. El proceso de análisis, selección e innovación ha de ser necesariamente multidisciplinar donde los aspectos arquitectónicos, logísticos, mecánicos, térmicos, de automatización y de tratamiento de la información han de quedar cubiertos durante el desarrollo del trabajo.

El paradigma de agentes de comportamiento (Rutishauser, 2004) ofrece un soporte amplio y flexible para el soporte de la decisión en lo que se ha venido a denominar "edificios inteligentes" y en particular para la gestión de la energía. El trabajo mencionado aproxima el comportamiento del edificio al lenguaje natural mediante el modelado y control con técnicas de "lógica borrosa" de modo similar al que se realiza en la presente propuesta.



## 2 INTERCAMBIO TÉRMICO Y ACUMULACIÓN

Como respuesta, nace la necesidad de crear un sistema energético integral que permita gestionar la energía térmica de forma controlada. Este ha de ser implementado en una edificación siempre que su coste de construcción sea asequible. Se constata que hay varios métodos de aprovechamiento de la radiación solar recibida sobre las edificaciones, al igual que se utilizan diversos métodos de almacenamiento de la energía.

Existe una notable variedad de técnicas utilizadas para aportar calor al interior de una vivienda tales como muros, suelos o techos radiantes. También aparecen referencias a técnicas para almacenar la energía, los muros de inercia térmica que almacenan energía gracias a la radiación solar recibida por el día y que, por la noche, la transmiten al interior de las edificaciones.

Se ha desarrollado una envolvente aislante que permite la gestión eficiente de la captura, el transporte y el almacenamiento para la climatización del interior de la edificación. Interesa captar la energía térmica disponible en el ambiente o la que se concentra sobre la fachada para transportarla y almacenarla según las características de la misma. Así, cumple las mismas funciones que las fachadas ventiladas y las barreras radiantes y, al tiempo, las de un intercambiador térmico con el entorno exterior.

Este muro constituye el primer paso hacia la creación de un sistema energético integral y tiene las siguientes particularidades (Patente P200930411):

- Varias capas de aislamiento del entorno exterior.
- Una capa externa que capta energía del ambiente y,
- Una capa para aportar energía al interior de la edificación.

La acumulación térmica en el subsuelo representa un elemento interesante y tiene las siguientes ventajas:

- Se utilizan diversas zonas del terreno, aisladas térmicamente entre sí, situadas bajo o cerca de donde se construye la edificación.
- Se parte de la temperatura del subsuelo que coincide aproximadamente con promedio ambiente a lo largo del año, de unos 13 °C en la Comunidad de Madrid.
- Para trabajar con acumulación de baja temperatura no es preciso excavar a gran profundidad ni, por tanto, realizar costoso movimiento de tierra.

Ahora bien, el flujo térmico es diferente en los distintos muros, segmentos de cubierta o acumuladores del subsuelo. La eficacia energética del edificio radica en un correcto diseño pero también en la cuidadosa y continua gestión del transporte de energía entre los distintos elementos que componen el sistema.

## 3 MEDIDA Y CONTROL DEL FLUJO DE ENERGÍA

El combustible abundante o las tarifas eléctricas reducidas han relegado hasta hoy la necesidad de ajustar el consumo con sistemas elaborados de supervisión y control. El futuro se plantea de forma muy diferente, la energía incrementa progresivamente su valor mientras que los mecanismos de regulación son cada vez más potentes con costes menores. La gestión de esta energía solar directa, abundante y gratuita pero desigualmente repartida a lo largo del año, es posible mediante la tecnología existente a coste accesible.

En este caso, la energía térmica dentro del edificio se transporta como calor sobre un fluido y se almacena en los materiales como variación de temperatura (calor sensible) o procesos de fusión-solidificación (calor latente). Las propiedades de los componentes y dispositivos hoy accesibles permiten establecer de forma precisa los caminos y condiciones en que se ha de realizar la transferencia de energía con el fin de alcanzar las condiciones de confort adecuadas a un coste mínimo de instalación y consumo.

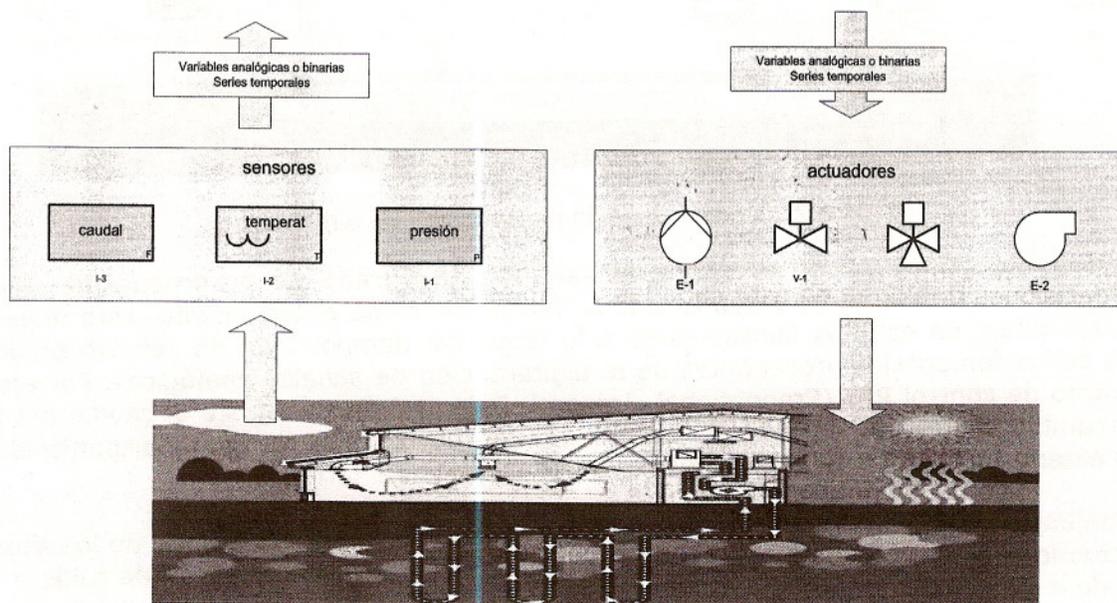
Las variables a considerar nos definen un entorno en que se capta, transforma, almacena o usa la energía. Los dispositivos de control o actuadores determinan el flujo de energía entre unos elementos y otros según los objetivos previstos. Sensores y actuadores constituyen el "nivel inferior" del esquema o "arquitectura" de decisión. En la captura solar y almacenamiento geotérmico de carácter selectivo las variables relacionadas serán:



- La temperatura que nos define la "calidad" o potencial aprovechamiento en función de su distancia al valor promedio de la zona.
- El caudal del fluido que se utiliza para el transporte térmico. Que junto a la densidad, calor específico y el salto térmico determina la potencia transferida cuya integral en el tiempo constituye la energía.
- La presión. En caso de pérdidas de carga reducidas y circuitos cerrados de un líquido portador, este parámetro indica principalmente la aparición de fugas u obstrucciones en el circuito así como la existencia de problemas en las bombas de impulsión.

Como dispositivos actuadores consideramos aquellos que impulsan el flujo térmico de forma controlada utilizando un fluido como soporte.

- Bombas para impulsión de líquidos, tanto las de caudal constante como variable
- Electroválvulas de dos a más vías con accionamiento toda-nada o de apertura proporcional.
- Ventiladores o sopladores para forzar el movimiento del aire
- Rejillas o persianas regulables para ajuste de la sección del flujo



**Figura 1.** Acceso electrónico al entorno térmico del edificio.

Los sensores transforman las variables físicas en señales eléctricas que son conformadas y digitalizadas para su entrada a la red de decisión como series temporales numéricas, bien por cuantificación de los valores analógicos o como códigos binarios que definen el estado del edificio y de su entorno. Los actuadores electromecánicos obedecen las consignas eléctricas que les suministra el sistema y las convierten en cambios en el flujo térmico desde o hacia el edificio.

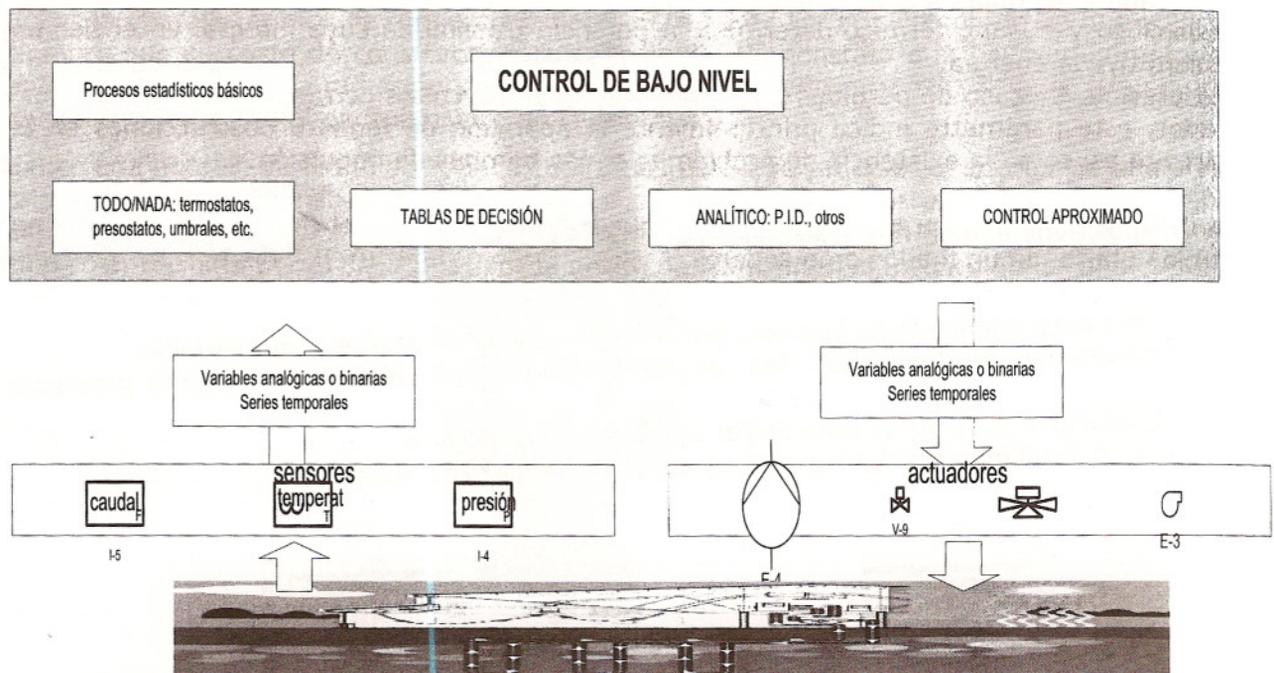
## 4 UNA ARQUITECTURA DE DECISIÓN

El termostato que abre el circuito de calefacción cuando la temperatura cae por debajo de un cierto valor o el que activa el compresor del refrigerador al subir la temperatura, son mecanismos de decisión sencillos que conectan la información del sensor con la orden al actuador. A medida que crece el número o la naturaleza de la información en juego las consideraciones a tener en cuenta en la decisión se complican. Lo mismo sucede cuando el ámbito temporal de la información disponible se incrementa, o cuando es preciso establecer planes de actuación durante un cierto periodo de tiempo.

Por un lado es preciso mantener la capacidad del sistema para actuar con un comportamiento reactivo en determinados casos, por ejemplo al sobrepasar un cierto umbral en determinadas



variables. Por otro, conviene considerar por lo común diferentes aspectos, instantes o magnitudes en función de los cuales se establece la decisión o plan de actuación pertinente.



**Figura 2.** Capa de decisión multivariable de bajo nivel.

Así, las decisiones que ligan en esta capa las variables de entrada con las órdenes de salida no tienen que ser necesariamente instantáneas o "reactivas" como el termostato. Este nivel también acoge datos en estados consecutivos a lo largo del tiempo, bien de señales binarias o aquellas series temporales procedentes de la digitalización de señales analógicas. Por ejemplo el algoritmo de control PID (Proporcional, Integral, Diferencial) que ajusta el caudal del fluido de intercambio térmico en función de la demanda interior del edificio, de la disponibilidad de energía exterior o de la cantidad acumulada en los tanques del terreno.

Otros conjuntos propios de este nivel son los correspondientes a la calibración de los sensores y los actuadores, la detección de averías, la estadística básica para reducción de ruido o compresión de los datos, la generación de secuencias de actuación o la de alarmas, entre otros. No todos los procesos, algoritmos, esquemas o agentes de actuación. Algunos pueden recoger información disponible para archivarla o contestar preguntas del programador o inquilino del edificio. Otros permiten accionar ciertos dispositivos mediante una orden expresa o introducir cambios en los mecanismos o condiciones de decisión, reprogramando su funcionamiento.

Es importante considerar que en un instante determinado pueden existir diferentes alternativas entre las que es preciso decidir. Este proceso de selección puede realizarlo un interlocutor humano, como sin duda sucede durante el periodo de desarrollo. Sin embargo, es preciso simplificar drásticamente el conocimiento del sistema y las consignas o decisiones a adoptar en un producto industrial para su montaje, operación y mantenimiento. Por ello se han introducido nuevas capas en la organización de la información que se describen a continuación.

## 5 ESTRATEGIAS DE ALTO NIVEL E INTERFAZ HUMANO

Es fácil imaginar que accionar la bomba que activa un determinado circuito térmico, establecido por el estado de un conjunto de electroválvulas, ciertos sensores involucrados por el movimiento del fluido se verán afectados. En caso de que la variación de presión no corresponda con el valor o perfil esperado, el bajo nivel de decisión detectará la anomalía y puede adoptar la actuación de urgencia pertinente para paliar la rotura de algún conducto, tal como parar la bomba y cerrar las válvulas para evitar una posible fuga.

Ahora bien, este no es sino el principio de un proceso, a menudo complicado, para establecer un diagnóstico preciso con el análisis de los componentes involucrados, adoptar alternativas funcionales al fallo detectado y generar los avisos a llamadas con el contenido apropiado al servicio de mantenimiento y los usuarios del edificio.

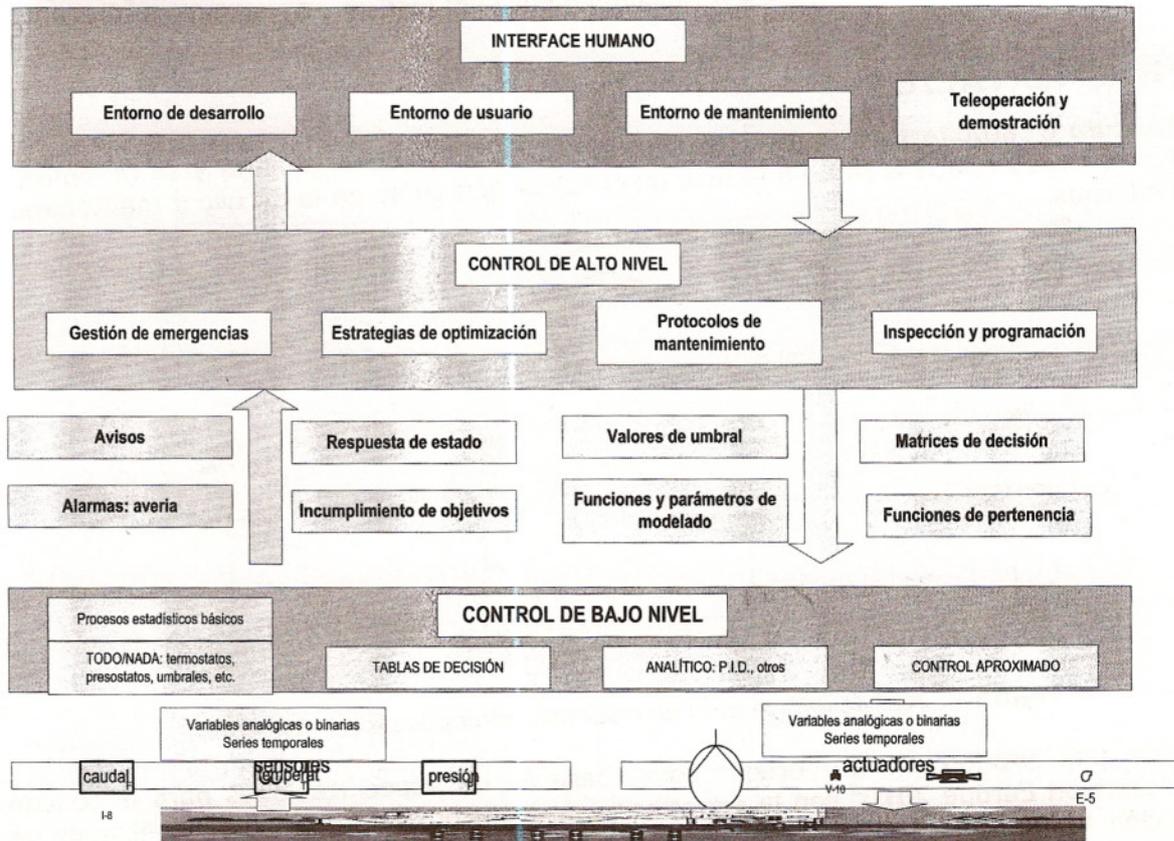


Figura 3. Capas de alto nivel e interfaz humana.

Otro ejemplo de los agentes que gestionan la energía desde este nivel puede ser la organización de los flujos de calor en función del programa de habitación o uso del edificio. La organización de los recursos disponibles es necesariamente diferente en una vivienda unifamiliar de uso en vacaciones o fin de semana frente a su utilización como habitación habitual o incluso un fuerte incremento de sus habitantes en una reunión durante un periodo más o menos largo de tiempo. La respuesta térmica del edificio ha de ser necesariamente diferente y la información disponible para adoptar la mejor estrategia puede proceder de nuevas fuentes como el usuario o sensores adicionales, tales como los de presencia en determinados sectores.

También es responsabilidad de este nivel superior la definición de los objetivos concretos del sistema, tales como los criterios y las variables o funciones a optimizar. Parece claro que conseguir el mínimo coste en la aportación de energía externa será un elemento crítico en la decisión. También ha de influir en la estrategia de control la garantía en la duración a lo largo de la temporada del suministro energético de los acumuladores geotérmicos. Será preciso también responder a los picos de potencia requeridos ante cualquier incidencia o imprevisto, por ejemplo la rotura del vidrio de una ventana o el olvido de una puerta abierta durante una fría noche de invierno.

Otro aspecto importante de este nivel es la posibilidad de programación y acceso a la información, control y remodelación de todos y cada uno de los módulos del sistema. La comunicación con los interlocutores humanos se establece a través de un conjunto de entornos gráficos de interfaz que constituyen la capa superior, el primero de los cuales está constituido para las herramientas de desarrollo del propio sistema. Desde aquí se establecen los valores admisibles para las diferentes variables, las funciones de pertenencia o las matrices de decisión de los esquemas basados en reglas. También se establecen los mecanismos de respuesta de tipo

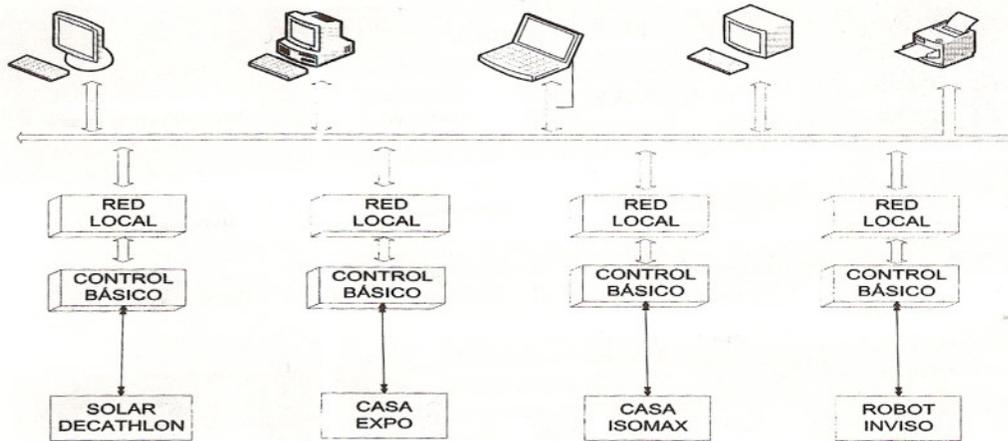


analítico, las constantes o parámetros involucrados, las curvas o los procesos de calibración para cada uno de los transductores, los protocolos de verificación, etc.

Una parte seleccionada de esta información se hace accesible a entornos de interface especializados como es el del equipo de mantenimiento, el del los usuarios del edificio o incluso, aquel que permite la visualización remota del funcionamiento del edificio y los aspectos relevantes de su tecnología.

## 6 IMPLEMENTACIÓN

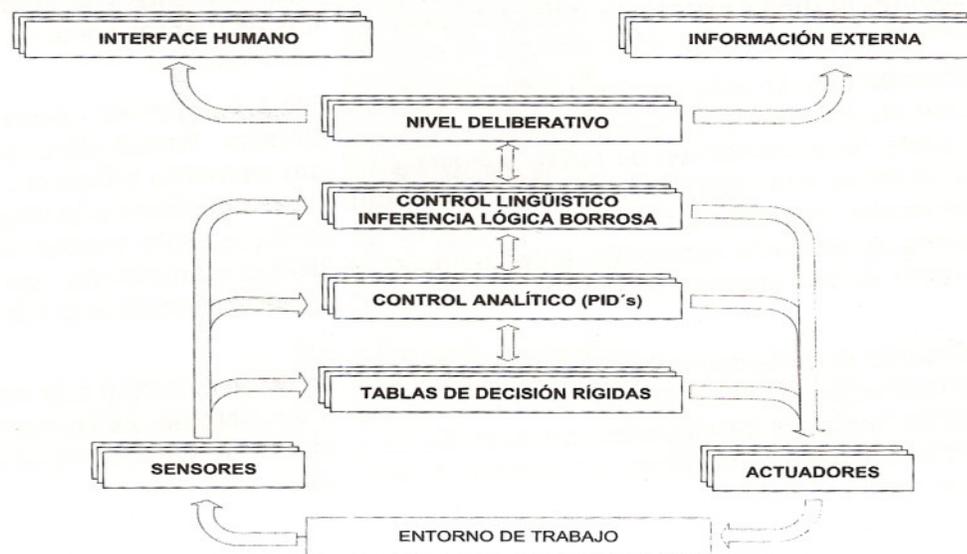
La estructura o "arquitectura de decisión" generada es de carácter general y se ha aplicado a distintos entornos relativos tanto a la fase de construcción como en la de uso y mantenimiento de los edificios.



**Figura 4.** Red de información en distintos prototipos de demostración.

Se plantea esta arquitectura de decisión como base de las especificaciones para el concurso "Solar Decathlon Europe 2010" con la experiencia de los prototipos previos ya realizados para construcción automatizada (PSE INVISO del MICINN) o para edificios de consumo cero con acumulación geotérmica selectiva (ISOMAX o IAI-CSIC).

En todos los casos la estructura de la información adopta un esquema jerárquico de resolución múltiple que condensa, resume y simplifica la información procedente de un entorno sensorial complejo y parcialmente indeterminado. Ello se consigue mediante un sistema integrado de decisión que permite la cooperación de esquemas o agentes de diferente naturaleza organizados según muestra el diagrama de la Fig. 5.



**Figura 5.** Esquema de la arquitectura de control y flujo de información.

Con esta filosofía de diseño se ha realizado el control del edificio de bajo consumo de energía que se muestra en la Figura 6, utilizando la tecnología ISOMAX con captura directa de energía bajo cubierta, acumulación subterránea y barrera térmica.

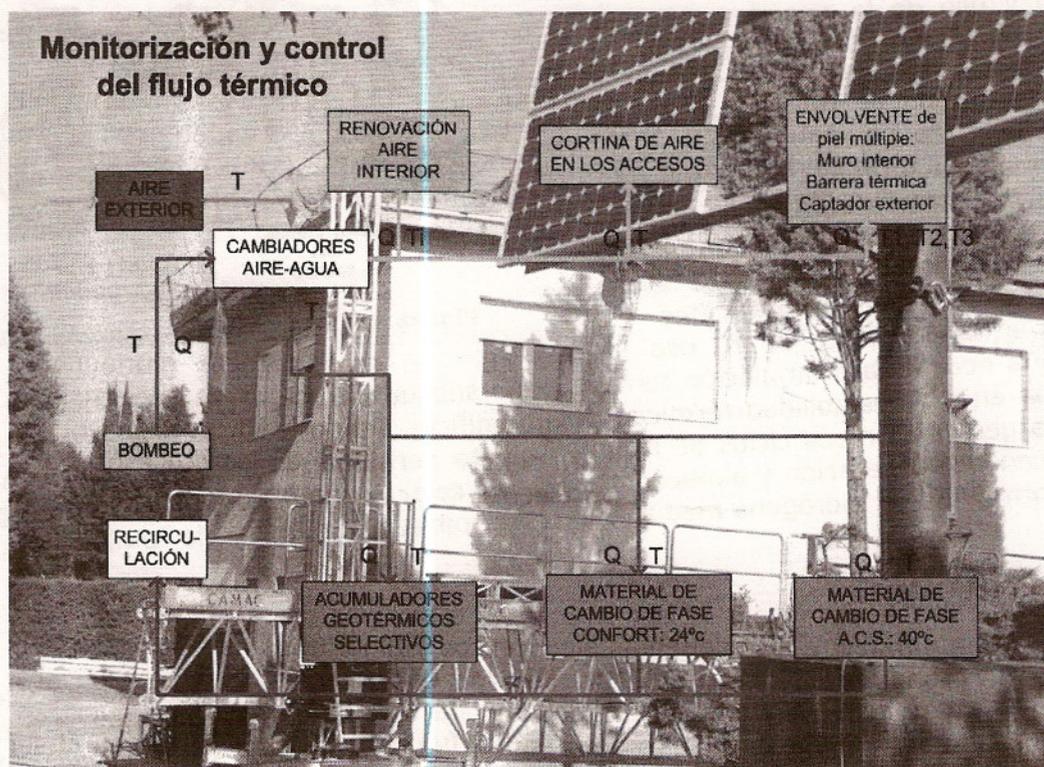


Figura 6. Diagrama de flujo térmico en el prototipo ISOMAX del IAI-CSIC.

Otro ejemplo cuyo funcionamiento se basa en estos esquemas de control es el prototipo OIKOS, la casa posible, diseñado y construido para la EXPO2008 de Zaragoza y reinstalado en el Instituto de Automática Industrial del CSIC en el campus de Arganda del Rey, Madrid.

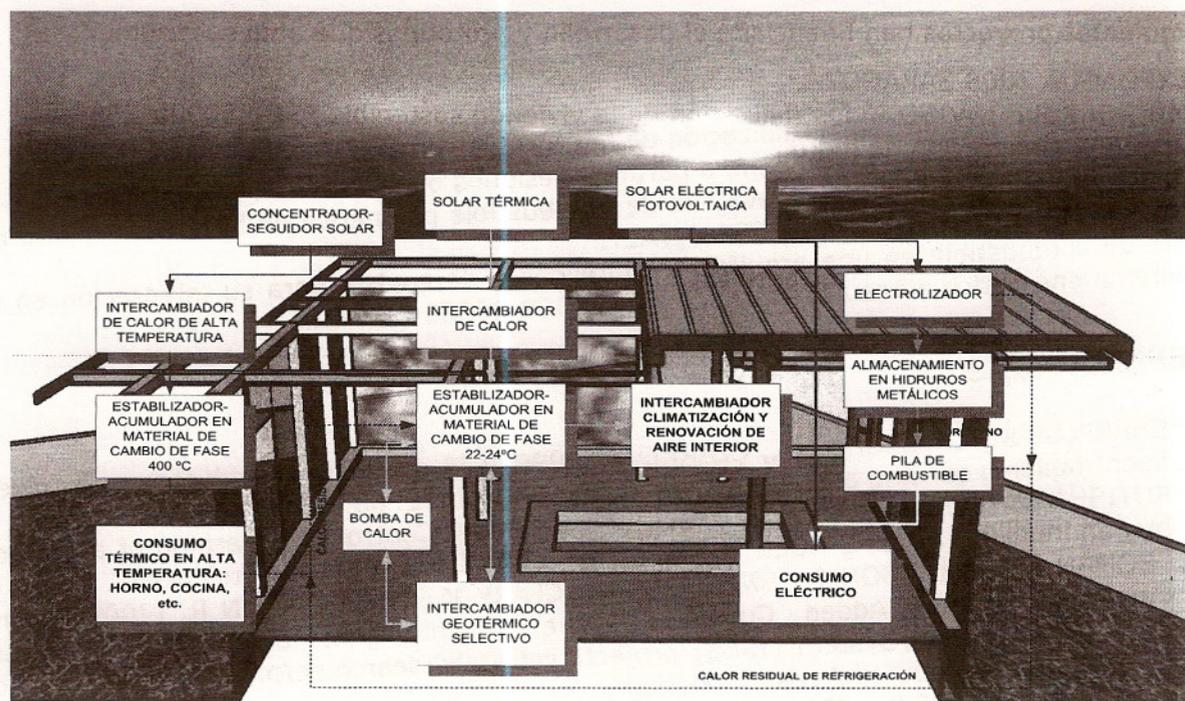


Figura 7. Diagrama integral de energía en el prototipo OIKOS de EXPO2008.

En este caso, se gestionan simultáneamente los dos aspectos fundamentalmente de la captura, almacenamiento y uso de la energía en un edificio autosuficiente: el térmico y el electroquímico. La cubierta de 100 m<sup>2</sup> está dotada de un recubrimiento fotovoltaico compatible con un intercambiador térmico. La electricidad no utilizada durante los periodos de sol es transformada en hidrógeno y almacenada hasta el instante de su reconversión en electricidad en el momento de su uso

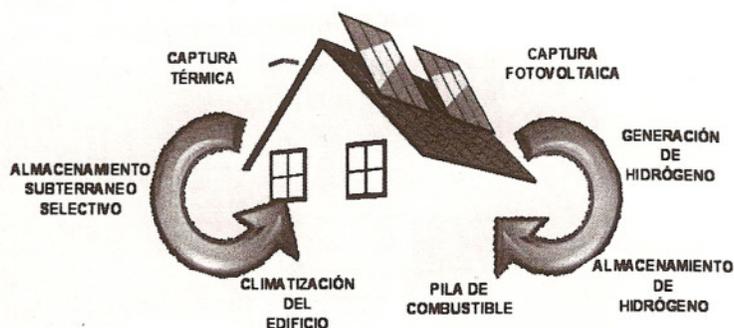


Figura 8. Ciclos térmico y electroquímico.

durante la noche. La acumulación térmica en el subsuelo es de carácter plurianual lo que supone una enorme estabilidad térmica para el edificio. La estructura de supervisión y control diseñada gestiona ambos ciclos de forma conjunta permitiendo la interacción entre ellos. Por ejemplo en la recuperación y almacenamiento del calor residual en los procesos de generación o transformación del hidrógeno mediante un electrolizador o una pila de combustible.

## 7 CONCLUSIÓN

El presente trabajo muestra los esquemas electrónicos y algoritmos para la medida, el control, la toma de decisiones y la optimización del flujo de energía en un edificio con acumulación térmica subterránea. Diversos prototipos dentro y fuera de nuestro país demuestran que una gestión adecuada de la energía permite una reducción drástica del consumo en el sector residencial. En particular se presentan los elementos de supervisión y control implementados para el edificio un prototipo de dos plantas y 200 m<sup>2</sup> de superficie realizado en el Campus del CSIC en Arganda del Rey y en el denominado "OIKOS: La casa posible" de 60 m<sup>2</sup> y 100 m<sup>2</sup> de cubierta construido para la Exposición Internacional de Zaragoza 2008.

## 8 AGRADECIMIENTOS

Los siguientes proyectos han financiado el desarrollo y prototipos que aquí se resumen:

- EXPOAGUA 2008 ZARAGOZA.
- MICINN P.S.E INVISO Industrialización de la vivienda sostenible PSE-380000-2008-6.
- CSIC PIE Generación de hidrógeno a partir de residuos orgánicos Ref. 2004 8 0E 254.
- Diseño y realización de una nueva Pila de Combustible polimérica de bajo coste y alta eficacia". MICYT- ENE2005-09124-C04-02/ALT.
- Pila de combustible en una arquitectura inteligente de control para su integración en un sistema energético autosuficiente CICYT-ENE2008-06888-C02-02.

## 9 REFERENCIAS

- SHARPLES S., CALLAGHAN V., CLARKE G. (1999).: "A multi-agent architecture for intelligent building sensing and control" Sensor Review, 19:2, pp. 135 - 140.
- RUTISHAUSER U., JOLLER J., DOUGLAS R. (2004).: "Control and learning of ambience by an intelligent building" IEEE T. SMC: Special Issue on Ambient Intelligence.
- BOMAN M., DAVIDSSON P., SKARMEAS N., CLARK K., GUSTAVSSON R. (2009).: "Energy Saving and Added Customer Value in Intelligent Buildings" Information/Society/Energy/System (ISES) project; [www.enersearch.se/projects/](http://www.enersearch.se/projects/), sub-project #9: "Robust Distributed Decision Islands".
- BUSHBY S. T. (1997).: "BACnet: a standard communication infrastructure for intelligent buildings" ; National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Lab., Building Env. Division, Gaithersburg, MD, ETATS-UNIS Revue / Automation in construction, 6:5-6, pp. 529-540. (ISSN: 0926-5805).

- MILLER, G.TYLER (2006).: "Living in the Environment: Principles, Connections, and Solutions", Brooks/Cole Pub Co, (ISBN-10: 0495015989).
- HUBBERT, M.K., (1972).:"Man's Conquest of Energy: Its Ecological and Human Consequences", in The Environmental and Ecological Forum 1971-1972. Washington D.C., U.S. Atomic Energy Commission Publication TID-25858.
- HAGRAS H., CALLAGHAN V., COLLEY M. and CLARK G. (2003).: "A hierarchical fuzzy-genetic multi-agent architecture for intelligent buildings online learning, adaptation and control" Information Sciences, 150:1-2, pp. 33-57.
- WIGGINTON M. (2002).: "Intelligent skins", Jude Harris Architectural Press 176 pags.
- WONG J.K.W., LI H. WANG S.W. (2004).:"Intelligent building research: a review". Elsevier.
- ALWAER H., CLEMENTS-CROOM D.J. (2009).: "Building and Environment".

