

Sistema de ahorro energético utilizando sistemas multi-agente y sistemas borrosos

(12 Diciembre 2007)

J. R. Villar, E. de la Cal y J. Sedano

Resumen— Una de las acciones clave en la búsqueda del desarrollo sostenible es la reducción del consumo de energía en sistemas de calefacción. El ahorro de energía es una medida urgente a tomar con el fin de reducir el malgasto de la misma. En España esta medida tiene especial relevancia dado que la construcción supone al menos la mitad de Europa. Aquí se propone una solución distribuida basada en un sistema multi-agente y una unidad de control central encargada de la minimización del consumo de energía en una vivienda. La unidad de control central (UCC) incluye un Modelo Difuso –para la estima de las necesidades energéticas- y un Controlador Difuso –para calcular la potencia en cada radiador-. La UCC es la responsable de distribuir la potencia contratada en la vivienda entre el conjunto de radiadores. Esta solución constituye el estudio preliminar que se incluirá en un sistema de calefacción, producto de una compañía local.

Palabras clave— Sistemas multi-agente (*Multi Agent Systems*), Sistemas difusos (*Fuzzy Systems*), Control difuso (*Fuzzy Control*).

I. INTRODUCCIÓN

Las necesidades energéticas derivadas del uso doméstico de la calefacción se han incrementado en los últimos años. Los sistemas de ahorro de energía emplean un gran número de variables en el proceso de minimización de la energía necesaria para mantener el confort térmico [3,5,9,11]. Con este fin se emplean herramientas de simulación para la estimación del consumo de energía y medidas de confort en proyectos de arquitectura. Los sistemas de diseño constructivo se clasifican en modelos basados en ecuaciones [6, 9,8, 10], y herramientas basadas en desarrollos de terceros [2,16]. Los modelos basados en ecuaciones son apropiados en el análisis de materiales y procedimientos de construcción. Las herramientas de simulación basadas en modelos concentrados son más apropiadas en el modelado del consumo de energía. Algunas de las herramientas basadas en parámetros concentrados son HTB2 [17] y HOT2000 [18].

Se propone una arquitectura distribuida [3,20] basada en múltiples agentes (los radiadores) y una unidad de control

central (UCC) que se comunicarán mediante la tecnología Zigbee. La UCC implementa un algoritmo de distribución y ahorro de energía basados en un modelo y controladores difusos. Los requisitos de energía correspondientes a las especificaciones de confort en cada habitación se estiman mediante un modelo difuso, mientras que un controlador difuso se encarga de calcular la potencia a aplicar en cada radiador. El algoritmo de distribución de energía (ADE) determina como compartir la energía contratada en la vivienda entre los radiadores de la casa para mantener la temperatura de confort en la vivienda.

El trabajo se estructura de la siguiente. En la Sección 2 se definirá el problema. En la Sección 3 se detallarán el sistema multi-agente (SMA) propuesto y el modelo (MD) y el controlador difusos (CD). Los experimentos y resultados obtenidos con el MD y CD aplicando el algoritmo de distribución (ADE) se pueden ver en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5 se incluyen las conclusiones y trabajos futuros.

II. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El principal objetivo consiste en el diseño de un sistema de ahorro de energía eléctrica que logre el nivel de confort deseado en una vivienda teniendo en cuenta el resto de instalaciones eléctricas así como la potencia contratada. Las viviendas se construyen empleando diferentes clases de materiales, diferentes topologías, en diferentes zonas geográficas, etc. Por ello, debemos definir una vivienda estándar para tomar como modelo de estudio (ver Fig. 1). Cada habitación de la casa dispondrá de al menos un radiador con una potencia concreta. El número de radiadores y la potencia instalada en cada espacio son definidos por la normativa de regulación del confort en viviendas españolas [1]. Los radiadores y al UCC establecen una relación de cooperación para la reducción del consumo de energía respetando el confort de la casa.

Las especificaciones de confort establecen la temperatura de referencia para cada habitación para cada hora del día y día de la semana. Además, la energía eléctrica contratada en la vivienda limita la cantidad de energía que podrá ser consumida como máxima. Finalmente, el precio final del sistema deberá asequible a un usuario medio. También, el sistema deberá ser robusto a fallo de la UCC que pudieran colapsarlo.

Como ya se ha indicado, el modelo propuesto será incluido en un sistema de calefacción producto de una empresa local.

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Educación del Reino de España a través del proyecto TIN-2005-08386-C05.

J. R. Villar y E. de la Cal imparten docencia en el Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo, Campus de Beseques s/n, 33204 Gijón, España (correos e.: villarjose@uniovi.es; delacal@uniovi.es).

J. Sedano imparte docencia en el Departamento de Electromecánica de la Universidad de Burgos, Burgos, España (correo e.: jsedano@ubu.es).

Las potencias de los radiadores ofertados vienen configuradas de fábrica, y van desde los 500 hasta los 1500 Vatios.

III. SISTEMA MULTI-AGENTE

Este trabajo propone un sistema multi-agente como solución para el problema planteado en la sección anterior. Es decir, los radiadores envían a la unidad de control central (UCC) la temperatura existente en la habitación y la potencia de consumo en el mismo. La UCC obtiene la corriente instantánea consumida en la vivienda y la temperatura exterior mediante sendas sensores específicos. La UCC también almacena los perfiles de temperatura de referencia para las habitaciones de la casa, y la relación de asociación entre las habitaciones y los radiadores. Finalmente, la UCC calcula y distribuye la potencia máxima instantánea entre los radiador. La potencia a distribuir se calcula teniendo en cuenta que se desea optimizar el consumo de energía en la casa. En la parte derecha de la se puede observar un esquema del sistema.

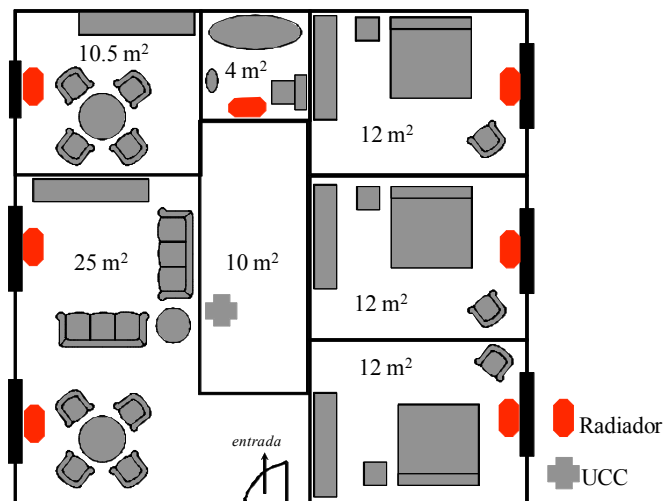


Fig. 1. Diseño de la vivienda estándar y arquitectura del sistema. Los radiadores con las cajas en color gris bajo las ventanas. La UCC se encuentra en el pasillo.

La distribución de potencia entre los radiadores se realiza mediante un algoritmo de distribución de energía, basado en un modelo difuso y un controlador difuso que ajustan la potencia máxima en cada radiador. En la Fig. 3 se muestra un diagrama de bloques de todo el proceso. El proceso consta de dos fases: La fase de diseño y la fase de ejecución. En la fase de diseño se generan un modelo (MD) y controlador difusos (CD). El MD tiene como tarea la estimación las necesidades de potencia de una habitación genérica y el CD la de ajustar la potencia en cada radiador.

La generación de los conjuntos de datos de entrenamiento para el MD se llevado a cabo con la herramienta de simulación HTB2 [17]. El CD se ha diseñado ad hoc.

La potencia máxima instantánea para cada radiador se calcula en la fase de diseño. La UCC recibe de cada radiador la potencia y temperatura en cada habitación, y estima las necesidades de potencia para cada una mediante el MD.

A continuación, se calcula una estimación de la energía requerida para calentar cada habitación así como la energía efectiva empleada en el calentamiento. Finalmente, se emplea

el balance de energía para inferir la potencia de calentamiento instantánea en cada radiador, conociendo los errores de temperatura y energía en la habitación.

La solución final se detalla a continuación. La siguiente subsección describe la arquitectura del sistema multi-agente. El MD y el algoritmo de distribución de energía se detallan en las secciones 3.2 y 3.3.

A. La arquitectura del sistema multi-agente

Se ha elegido el modelo Zigbee [14] como tecnología para implementar la red de comunicaciones inalámbrica ya que los nodos de dicha red serán micro-controladores y Zigbee permite implementar este tipo de redes a un bajo coste. En un red Zigbee cada radiador cuando comportarse como un repetidor. Los radiadores serán controlados por la UCC cuando la red esté en funcionamiento. En cambio, cuando la red está caída o la UCC fuera de servicio, cada radiador debe actuar como un radiador autónomo hasta que el sistema se recupere. Esta es la razón por la que se ha empleado un paradigma multi-agente (ver Fig. 2) de forma similar a como se propone en [6].

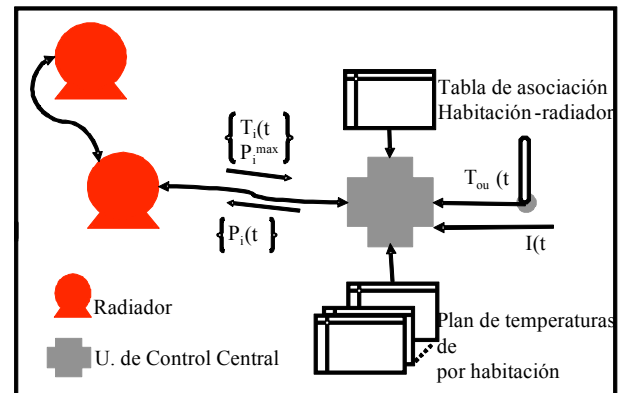


Fig. 2. En la derecha, esquema del sistema multi-agente. La UCC recibe la información de confort procedente de los radiadores. Y la UCC computa y distribuye la potencia máxima instantánea entre los radiadores.

En cada habitación contaremos con al menos un radiador. Dado que los radiadores incluyen un sensor de temperatura, la temperatura medida en cada radiador será tomada como la temperatura de la habitación. Además cada radiador incluirá un micro-controlador y interfaz de manejo visual.

Por otro lado, tanto la temperatura exterior de la vivienda como el consumo de potencia instantáneo deben poder medirse. La temperatura exterior se empleará con el fin de reducir el derroche de energía en la medida de lo posible, mientras que el consumo de potencia instantáneo debe conocerse con el fin de exceder el límite de potencia contratado.

El diseño de la arquitectura del sistema deberá tener en cuenta ciertos aspectos relativos al coste del producto. En primer lugar, debe reducirse los costes de instalación, ya no sólo en materiales sino también en mano de obra. En segundo lugar, el tiempo de configuración del sistema debe ser bajo. La configuración debe ser simple y el número de parámetros lo más reducido posible.

Como ya se ha indicado, se debería instalar una UCC que controle todo el sistema. Pero además, la UCC debería ser el interfaz común para todo el sistema, permitiendo introducir el programa de temperaturas de referencia, la configuración de la casa, etc.

Se ha empleado una red inalámbrica con el fin de reducir los costes de instalación. Si se dota a los radiadores de capacidad inalámbrica, entonces éstos podrán enviar a la UCC la temperatura de la habitación y la potencia instantánea de esta forma. Además, los sensores de temperatura exterior y consumo instantáneo de potencia podrían ser inalámbricos, pero por el momento se emplearán cableados.

Los costes de configuración en una red inalámbrica de radiadores se reducen a los siguientes parámetros: una dirección física de red para cada radiador, única en el vecindario del sistema; mediante esta red los radiadores podrán enviar y recibir datos de la UCC. Se deberán suministrar un total de 27 parámetros para una casa como la descrita en la Sección 2: 8 direcciones de red, con 6 habitaciones, 6 tipos de habitaciones y 7 asociaciones habitación-radiador.

B. Estimación de las necesidades de energía en la casa mediante MD

El requisito de potencia de una habitación es la potencia instantánea necesaria para calentar la habitación con el fin de mantener el nivel de confort. Pero no es posible disponer de un modelo diferente para cada habitación diferente. Y en hipotético caso de así fuera se necesitarían una gran cantidad de parámetros para configurar la UCC, lo cual haría la instalación y configuración inviable. Esta es la razón por la que se va a modelar la dinámica de calentamiento de una habitación genérica. La estimación de los requisitos de potencia de una habitación genérica emplea gestión de la incertidumbre.

Existen varias razones que introducen incertidumbre en este problema. En primer lugar la geometría de una habitación se representa mediante la potencia de sus radiadores o lo que es lo mismo los radiadores en una habitación son el único dato conocida de ésta.

Segundo, el calentamiento de una habitación depende de la meteorología en el exterior, no es lo mismo calentar una habitación en un invierno frío que en un otoño templado. Finalmente, los perfiles de ocupación y uso de dispositivos de bajo consumo en cada habitación introducen también incertidumbre en el comportamiento del sistema de calefacción. En conclusión, la estimación de los requisitos de potencia de una habitación genérica necesita de un modelo adecuado que pueda manejar tal incertidumbre.

La lógica difusa es una técnica de sobra conocida adecuada para el manejo de incertidumbre [15]. Por ello la estimación de los requerimientos de potencia de una habitación genérica se van a calcular con un modelo difuso. El entrenamiento del modelo difuso se realizará en la fase de diseño. Se ha seleccionado el modelo ANFIS [12] para modelar los requerimientos de una habitación genérica, ya que se trata de una herramienta suficientemente madura y adecuada al aprendizaje de series de datos a corto-medio plazo [7,13]. El proceso de generación del modelo ANFIS se muestra en la

Fig. 3. A continuación se describe, el uso de la herramienta HTB2, así como los pasos de post-procesado y entrenamiento.

1) Creación de los datos de entrenamiento a partir simulaciones realistas

Para entrenar un modelo ANFIS adecuadamente es necesario un conjunto de datos lo suficientemente largo que incluya todas las situaciones y eventos a modelar [7,13]. A la escritura de este trabajo, se iniciaba el proceso de producción de los radiadores, de modo que no es posible disponer de una instalación física como banco de pruebas. Así que los conjuntos de datos se generarán mediante simulaciones. La herramienta HTB2 [17], a partir de ahora HTB2, es una herramienta reconocida y adecuada al análisis de las dinámicas de sistemas de calefacción con problemas de parámetros concentrados similares al nuestro [3,16].

HTB2 es una herramienta de simulación totalmente parametrizada. La salida de HTB2 permite obtener los requerimientos de potencia para cada radiador y habitación en la vivienda modelada, además de la temperatura en cada habitación, ambos muestreados a intervalos de tiempo pre-configurados. Además se pueden configurar para cada habitación y espacio de la casa: los materiales de construcción, las medidas volumétricas de cada habitación, la vecindad de las habitaciones, la orientación y zona geográfica de la tierra, el perfil de radiación solar, los datos del entorno, los subsistemas de calefacción, el perfil de ocupación, el perfil de temperatura para cada subsistema de calefacción, los dispositivos de bajo consumo y los perfiles de iluminación. También se pueden definir diferentes períodos de muestreo del tiempo así como longitudes de simulación.

Será necesario definir todas las topologías de viviendas y zonas geográficas a cubrir para generar de los datos de entrenamiento. Primero se deben definir cada topología y zona geográfica para HTB2. A continuación se lanzarán un conjunto de simulaciones para cada estación del año empleando perfiles de ocupación realistas, temperatura de referencia y perfiles de consumo de dispositivos de bajo consumo.

2) La fase de post-proceso

Cada línea del archivo de salida de HTB2 incluye datos de todas las habitaciones con cierto intervalo de tiempo. Estos datos deben post-procesarse, de modo que cada uno de los ejemplos contenga datos relevantes para una sola habitación.

El resultado de esta fase es un conjunto de datos de entrenamiento-test. Cada línea de dicho conjunto de datos contiene las siguientes variables para una habitación: la temperatura en la habitación T_i , la temperatura de referencia para dicha habitación T^{REF} , la potencia instalada en la habitación P_i^{max} , los requisitos de potencia para el radiador de esa habitación P_i , la temperatura exterior T_{out} , la tasa de ocupación de la habitación O_i , el consumo de potencia por uso de la iluminación en la habitación L_i , y el consumo de dispositivos de bajo consumo en la habitación S_i . La T_i es una de las salidas de las simulaciones HTB2. El valor de T^{REF} , T_{out} , O_i , L_i , and S_i son los mismos empleados para la simulación HTB2. La P_i^{max} representa todo el conocimiento sobre una

habitación específica, además de la potencia máxima a emplear en esa habitación. Las P_i y T_i son las principales salidas devueltas por las simulaciones de HTB2.

3) La fase de entrenamiento

La fase de entrenamiento del modelo ANFIS MD se ha desarrollado empleando la herramienta Matlab [19]. Se tomarán como datos de entrenamiento y validación los obtenidos en la fase de post-procesamiento. El esquema de validación empleado ha sido una validación cruzada de 10-k particiones, y se han entrenado y probado 10 modelos ANFIS, considerando que los datos de entrada son suficientemente para contener información relevante.

Como resultado se han obtenido 10 modelos ANFIS, que han sido analizados estadísticamente. A continuación se ha seleccionado el modelo más adecuado. El modelo ANFIS permite estimar los requisitos de potencia para una habitación genérica con unas condiciones determinadas del entorno. Las variables de entrada del modelo FM son la temperatura instantánea en la habitación suministrada por un radiador, la temperatura exterior, la tasa de potencia del radiador y la temperatura de referencia, tal cual aparecen en el archivo de perfiles de confort. La salida del modelo será una estimación de la potencia requerida para la habitación.

C. El algoritmo de distribución de energía

La potencia necesaria para calentar una vivienda española sobrepasa fácilmente los 7 KW, a pesar de que normalmente la potencia contratada está entono a los 4.4 KW de consumo instantáneo por hora. A esto hay que añadir, los consumos derivados de los dispositivos de bajo consumo: el refrigerados, los ordenadores, etc., de modo que la potencia instantánea disponible para el sistema de calefacción es todavía inferior a la potencia contratada. Como conclusión, podemos decir que además de estimar la necesidad de potencia en cada habitación, se debe tener en cuenta la potencia disponible real con el fin de distribuirla entre los radiadores y no sobrepasar el límite de potencia contratado.

Un radiador activado es un radiador cuya habitación asociada tiene una temperatura de referencia superior a cierto umbral. La distribución de potencia será eficiente si el nivel de confort predefinido para dicha habitación se alcanza con el mínimo consumo de energía eléctrica. La solución propuesta hace uso del concepto de equilibrio de energía.

La energía es la capacidad del sistema de calefacción para mantener el nivel de confort. La *potencia requerida* es la potencia que un radiador debe consumir para mantener el confort en una habitación. La *energía requerida* de un radiador es la potencia requerida por unidad de tiempo. El algoritmo de distribución empleado, concederá el gasto a cada radiador una fracción de la *potencia requerida* con el fin de no sobrepasar la potencia disponible. La *energía de calentamiento* es la fracción de la potencia requerida (heating power) que se le permite consumir al radiador por unidad de tiempo. Lo deseable sería que cada habitación alcanzase el nivel de confort, que sería cuando la energía de calentamiento sería igual a la energía requerida para cada habitación, esto es,

existe un equilibrio entre ambas energías. El proceso de equilibrio de energía se calculará sobre un período predefinido de tiempo con el fin de eliminar los errores acumulativos. Se ha empleado una ventana de 20 minutos. El tamaño de esta ventana será un requisito de la implementación en micro-controladores, debido a lo limitado de la memoria. El cálculo del equilibrio de energía sobre una ventana de desplazamiento requiere almacenar los valores instantáneos de la potencia requerida y de calentamiento para cada radiador. Finalmente, podemos decir que la ventana de desplazamiento en el cálculo permite reducir el impacto de errores y los valores perdidos.

Es importante considerar la dinámica térmica y la capacitancia de los radiadores. Un radiador típico consume 6 minutos en calentar a su máxima potencia desde frío. Y el enfriamiento total consume normalmente 5 minutos. Esto deja claro que un radiador no calienta al total de potencia hasta el final de su dinámica. Y que se enfría muy rápido por su baja capacitancia térmica. Estos aspectos se tendrán en cuenta en el algoritmo de distribución. La inercia de subida puede resolverse con un simple factor de corrección, mientras que la de bajada implica que los radiadores activados deben de consumir siempre un mínimo de potencia para mantenerse calientes. Este umbral de potencia se determinará empíricamente. Finalmente, se debe reducir el ciclo de trabajo para reducir los períodos dinámicos, pero siempre lo suficientemente largo como para alcanzar el régimen permanente. Este parámetro se ha determinado empíricamente y su valor es de 3 minutos.

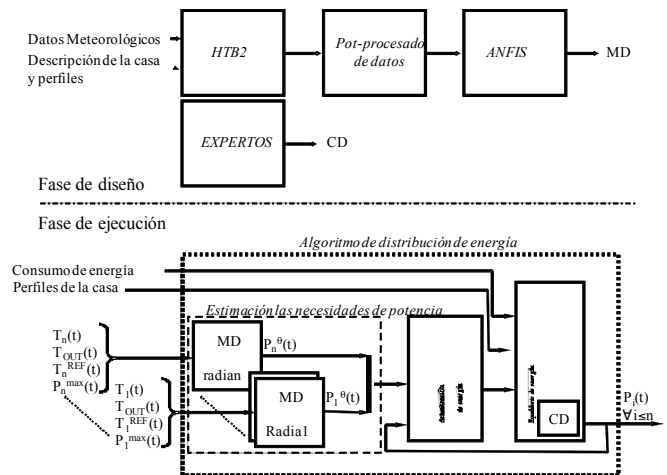


Fig. 3. Diagrama de cajas del prototipo. En la fase de diseño se determinan el model difuso (MD) y el controlador difuso (CD). En la fase de ejecución, se calcula la potencia instantánea máxima para radiadores y se realiza la distribución.

En la Fig. 3 se muestra el algoritmo de distribución adoptado. La primera vez que se ejecuta el algoritmo se inicia la *energía requerida*(E_r), la *energía de calentamiento*(E_h) y el error de energía (ΔE). El algoritmo se ejecuta cada minuto. En cada ejecución, se estima la *potencia requerida*(P_r) para cada radiador mediante MD. A continuación se actualizan todas las variables. Cuando finaliza el ciclo de trabajo se calcula la potencia calentamiento (P_h) para cada radiador. A continuación es necesario determinar el consumo de potencia instantáneo en la vivienda del resto de dispositivos (P_c), y calcular la potencia disponible (P_a) como un 85% del límite de

la potencia contratada menos P_c . CD será empleado para calcular la potencia de calentamiento. CD se ha diseñado *ad hoc* para este problema. Finalmente, P_a se distribuye entre los radiadores activados atendiendo a la P_h asignada a cada radiador, y teniendo en cuenta los factores de corrección descritos anteriormente. Un vez hecho esto, se actualiza P_h cada tres minutos, mientras que el resto de variables P_r , E_r , E_h y ΔE se actualizan cada minuto.

El CD es un modelo difuso de Mamdani con dos entradas y una salida. La entradas son el error de temperatura y ΔE . El error de temperatura es la diferencia entre la temperatura en la habitación y la temperatura de referencia para dicha habitación. La salida del CD es el porcentaje de la potencia de calentamiento asignada al radiador de la habitación. Las particiones de variables y las reglas se han diseñado intuitivamente, siguiendo las directrices de un experto. El método de inferencia es la media de los máximos. Como trabajo futuro se propone el diseño del CD mediante técnicas de aprendizaje híbrido.

IV. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Para comprobar la validez de la propuesta se ha usado una típica situación en el mercado inmobiliario en España, diseñando y simulando el apartamento mostrador en Fig. 1, localizado en el norte de España. Trabajos futuros deben incluir diferentes zonas de construcción, tanto de España como de países vecinos. Los datos de temperatura, tales como la temperatura exterior, horas de sol y radiación solar fueron tomados de almacenes de datos estadísticos de la misma zona donde se ubicó el estudio. Se han tomado datos de un año con un invierno frío.

El estudio ha sido realizado para apartamento dentro de un edificio de viviendas, con una altura media. Consecuentemente, también deben simularse viviendas en posiciones extremas del edificio (primeros y últimos pisos), así como topologías de construcción diferentes. Los materiales y el tipo de construcción son los considerados estándar in la construcción en España, por ejemplo, dobles ventanas de 6 mm de grosor de cristal con aislamiento por puente térmico.

Se desarrolló un perfil horario para cada variable controlada por el ser humano en función del grado de confort deseado. Estas variables son la temperatura deseada o de set point para cada habitación, el grado de ocupación o de personas por habitación, la distribución de uso de dispositivos de baja potencia, la ventilación y el alumbrado. Todos estos perfiles son las distribuciones de valores para cada una de estas variables a lo largo de cada día de la semana, y han sido diseñados de acuerdo a los usos y costumbres horarias en España.

A través de las simulaciones realizadas con el software HTB2 se obtuvieron las necesidades de potencias o potencias requeridas para cada habitación en la casa, siendo el período de muestreo de 1 minuto. A continuación, y tal como se explica en la sección precedente, se preprocesaron los datos, y se entrenó con el dataset generado el modelo ANFIS FM. En la Fig. 4 se puede observar el resultado del error medio en una validación cruzada de 10 estratificaciones de entrenamiento y test.

En la Fig. 5 también se puede observar el ahorro energético generado. Tras un período de 180 ciclos, el ahorro producido por nuestra propuesta es de un 35.85% menor que el propuesto en HTB2 para conseguir el grado de confort. Sin la distribución de potencia basada en la energía, el consumo energético habría superado el límite contractual.

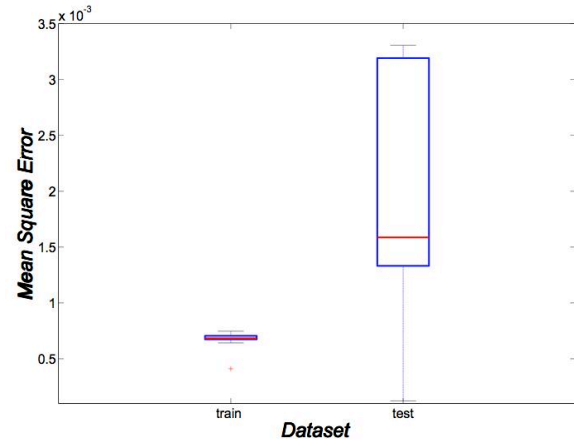


Fig. 4. Boxplot del error cuadrático medio producido por el modelo ANFIS FM utilizando validación cruzada con 10 particiones de train y test.

En la Fig. 6 se muestra la evolución de la acción de control propuesta por el EDA para una habitación de la casa en un momento del día dado. Se puede observar también la potencia requerida instantánea, tanto la propuesta por HTB2 como la estimada por FM. Los cálculos realizados demuestran que la integral de la potencia de calefacción, o acción de control, que representa la energía de calefacción, se iguala a la energía requerida. Esto conlleva a concluir que si los cálculos y simulaciones realizadas a través del HTB2 son correctos, es posible obtener resultados de confort adecuados con la arquitectura que se presenta en este trabajo.

Finalmente, en la TABLA 1, para cada habitación y zona horaria se muestra la media del error en la predicción de la energía requerida producido por el modelo ANFIS FM.

V. CONCLUSIONES

Es posible extraer dos contribuciones principales del trabajo desarrollado. Por un lado, es posible ahorrar en el consumo de energía eléctrica distribuyendo adecuadamente el consumo entre los radiadores eléctricos, de manera que no se sobrepase la potencia contratada. Simultáneamente, con dicho ahorro energético es posible mantener el nivel de confort en el hogar, siempre y cuando no se requiera más potencia que la contratada para éste menester. Finalmente, es posible disponer de energía suficiente como para absorber picos de consumo.

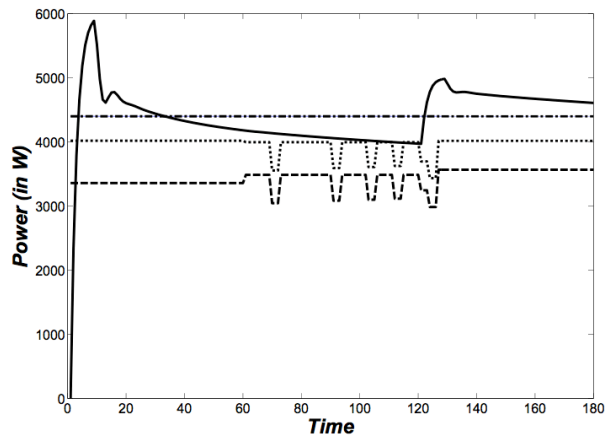


Fig. 5. Respuesta temporal del algoritmo EDA: en negra y continua se presenta la potencia de calefacción indicada por HTB2, a trazos se presenta la potencia de calefacción propuesta por EDA, a puntos es la potencia propuesta por EDA más la potencia de los pequeños electrodomésticos. La línea a puntos y rayas marca la potencia contratada de 4.4 KW

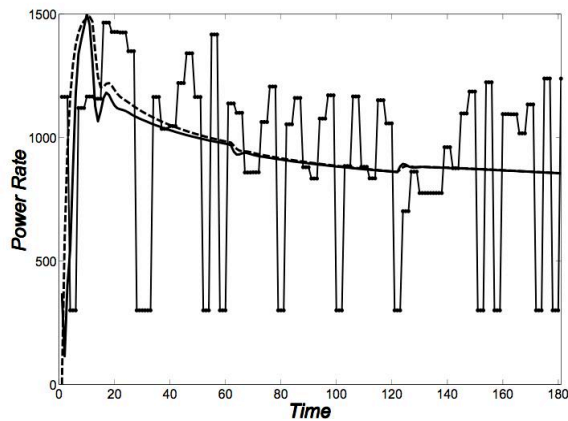


Fig. 6. Acción de control y evolución de la energía requerida para una habitación de la casa: línea a trazos es la propuesta por HTB2, línea continua es la estimada por FM, y la línea continua con puntos es la acción de control o potencia de calefacción para un determinado radiador.

TABLA 1
ERROR CUADRÁTICO MEDIO DEL MODELO ANFIS FM EN LA ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA REQUERIDA PARA CADA HABITACIÓN Y PARA CADA ZONA HORARIA

Zona horaria	Salón	Cocina	Hab. 1	Hab. 2	Hab. 3
Mañana	0	0.0722	0.0036	0.0196	0.0065
Mediodía	0	0.0074	0	0	0
Tarde-noche	0.1907	0.0853	0.0131	0.0221	0.0157

Sin embargo, se requiere de unos trabajos futuros orientados a diseñar modelos válidos para diferentes zonas geográficas, diferentes topologías de construcción, y diferentes épocas del año. Todo esto introducirá imprecisión en los datos, es posible que tanto el modelo como el controlador requieran de técnicas de entrenamiento que mejoren o soporten mejor dicha imprecisión. Es probable que hibridizando sistemas genéticos borrosos con otras técnicas disponibles presenten mejores resultados. Además, una vez se disponga de datos reales, se necesitará seleccionar las adecuadas técnicas para

aprendizaje del controlador.

Otros factores, como el uso de la potencia que el propio controlador instalado en cada radiador puede ayudar a obtener mejores estimaciones de la potencia requerida. Finalmente, debe ser considerado el empleo de sondas de humedad para mejorar los niveles de confort en el hogar.

REFERENCIAS

- [1] Informe Técnico sobre Las Instalaciones Térmicas en Edificios, Boe, n. 207, 29/08/2007, Ministerio de la Presidencia, 2007. Disponible en: <http://www.boe.es/>.
- [2] M. Bojic, M. Despotovic, J. Malesevic, and D. Sokovic. "Evaluation of the impact of internal partitions on energy conservation for residential buildings in Serbia", *Building and Environment*, no.42, pp. 1644-1653, 2007.
- [3] G. Coulouris, J. Dollimore, and T. Kindberg, *Distributed Systems: Concepts and Design*, Addison Wesley, 2006.
- [4] J. P. Clinch, and J.D. Healy, "Valuing improvements in comfort from domestic energy-efficiency retrofits using a trade-off simulation model", *Energy Economics*, no. 25, pp. 565-583, 2003.
- [5] J. P. Clinch, and J. D. Healy, "Cost-benefit analysis of domestic energy efficiency", *Energy Policy*, no. 29, pp. 113-124, 2001.
- [6] P. Davidsson, and M. Boman, "Distributed monitoring and control of office buildings by embedded agents", *Information Sciences*, no. 171, pp. 293-307, 2005.
- [7] S. N. Engin, J. Kuvilmaz, and V. E. Omurlu, "Fuzzy control of an ANFIS model representing a nonlinear liquid-level system", *Neural Computing Applications*, no. 13, pp. 202-210, 2004.
- [8] B. Farhanieh, and S. Sattari, "Simulation of energy saving in iranian buildings using integrative modelling for insulation", *Renewable Energy*, no. 31, pp. 417-425, 2006.
- [9] D. L. Goldblatt, C. Hartmann, and G. Dürrenberger, "Combining interviewing and modeling for end-user energy conservation", *Energy Policy*, no. 33, pp. 257-271, 2005.
- [10] M. S. Hatamipour, H., Mahiyar, and M. Taheri, "Evaluation of existing cooling systems for reducing cooling power consumption", *Energy and Buildings*, no. 35, pp. 105-112, 2007.
- [11] C. Huang, Z. Zou, M. Li, X. Wang, W. Li, W. Huang, J. Yang, and J. Xiao, "Measurements of indoor thermal environment and energy analysis in a large space building in typical seasons", *Building and Environment*, no. 42, pp. 1869-1877, 2007.
- [12] J. S. Jang, "Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, 1993.
- [13] J. S. Jang, "Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and anfis" *Fuzzy Sets and Systems*, no. 158, pp. 1064-1082, 2007.
- [14] P. Kinney, "Zigbee technology: Wireless control that simply works. Technical report", Disponible en The ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/>, 2007.
- [15] George J. Klir and Tina A. Folger, *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*, Prentice-Hall, 1989.
- [16] C. Koroneos, and G. Kottas, "Energy consumption modeling analysis and environmental impact assessment of model house in thessaloniki greece", *Building and Environment*, no. 42, pp. 122-138, 2007.
- [17] P. T. Lewis, and D. K. Alexander, "Htb2: A flexible model for dynamic building simulation", *Building and Environment*, no. 1, pp. 7-16, 1990.
- [18] HOT2000 User Manual, Natural Resources of Canada, Disponible en <http://oe.nrcan.gc.ca/english/index.cfm>, 2002.
- [19] The Math Works. The mathworks - matlab and simulink for technical computing. Technical report, The Math Works, <http://www.mathworks.com/> (2007)
- [20] M. Wooldridge, *An Introduction to Multi-agent Systems*, John Wiley & Sons, 2002.



José Ramón Villar nació en Santo Domingo, República Dominicana, el 11 de Octubre de 1967. Se graduó en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Gijón de la Universidad de Oviedo, y obtuvo el p.H.D. por la Universidad de León.

Ejerció profesionalmente en la ingeniería ISOTRON, S.A, en la Central Térmica de La Roble de la empresa eléctrica Unión FENOSA, S.A., en el instituto de investigación energética y minera ENERMITEC de León, y en la Universidad de León. Actualmente es

profesor colaborador en el departamento de informática de la Universidad de Oviedo, en el área de ciencias de la computación e inteligencia artificial. Entre sus campos de interés están los sistemas genéticos borrosos, los sistemas multi-agentes y la computación inteligente aplicada a procesos industriales.

Javier Sedano Franco nació en Burgos, España, el 11 de Mayo de 1969. Se graduó en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos y obtuvo el p.H.D. por la Universidad de León.

Ejerció profesionalmente como Responsable del Dpto. de Sistemas Electrónicos en el Instituto de Tecnológico de Castilla y León. Actualmente es formador de profesionales en todo tipo de tecnologías de producción y profesor asociado en el departamento de electromecánica de la Universidad de León, en el área de tecnología electrónica. Entre sus campos de interés están los sistemas de identificación de sistemas y la computación inteligente aplicada a procesos industriales.



Enrique A. de la Cal Marín nació en Oviedo, España, el 17 de Enero de 1972. Se graduó en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos de Gijón de la Universidad de Oviedo, y obtuvo el p.H.D. por la Universidad de Oviedo.

Durante el año 1995 desempeña funciones de becario en el instituto de investigación Daza Valdes del CSIC. El mismo año es contratado como profesor asociado en el departamento de Matemáticas de la Universidad de Oviedo y actualmente es profesor Titular en el departamento de informática de la Universidad

de Oviedo, en el área de ciencias de la computación e inteligencia artificial. Entre sus campos de interés están los sistemas genéticos borrosos, los sistemas multi-agentes, la computación inteligente aplicada a procesos industriales y la programación distribuida.