

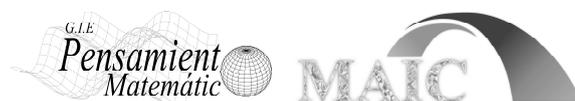
Investigación

Control centralizado y descentralizado de edificaciones mediante acristalamientos activos

Centralized and decentralized control of buildings by means of water flow glazings

Belén Moreno y Juan A. Hernández

Revista de Investigación



Volumen VII, Número 1, pp. 019–038, ISSN 2174-0410
Recepción: 23 May'16; Aceptación: 1 Jul'16

1 de abril de 2017

Resumen

Los acristalamientos activos con agua se caracterizan por tener una cámara de agua que absorbe la energía solar y la transporta a un depósito de inercia o al resto del edificio. De esta manera, la envolvente del edificio se convierte en un elemento colector de energía. La gestión de la energía transportada y las estrategias de ahorro energético se articulan a través de un sistema de control. Generalmente, los sistemas de control de climatización de las edificaciones son sistemas centralizados y la estrategia de ahorro energético está diseñada *a priori*.

En este trabajo se definen los elementos básicos que tiene un sistema de control de control ya sea centralizado o descentralizado. Se definen un conjunto de termostatos simples y diferenciales que permiten programar la lógica de control en un lenguaje no informático y se explora la posibilidad de tener un sistema descentralizado basado en acristalamientos activos autónomos con inteligencia propia basada en un termostato simple. En el caso de un sistema de control centralizado, el sistema de control se implementa mediante un microcontrolador central que recibe los datos de todos los sensores y mediante un software empotrado decide las órdenes de actuación sobre el sistema. En el caso de un sistema con control descentralizado, el sistema de control está distribuido en cada uno de las componentes del sistema tales como los acristalamientos activos. Estos módulos disponen de un microcontrolador que mediante sus sensores propios decide con un lógica mucho más sencilla si el módulo debe circular y transportar energía. De cualquier forma, todos los microcontroladores reportan su estado a una unidad central que, posteriormente, se encarga de poner en la nube todos el estado del sistema a lo largo del tiempo.

Se estudia la necesidad de monitorizar el estado del edificio para poder evaluar los ahorros energéticos conseguidos y las estrategias emergentes en el caso de control descentralizado. Además, los datos de la monitorización permiten validar los modelos de simulación del comportamiento térmico del edificio.

Palabras Clave: control centralizado, control descentralizado, comportamiento emergente, ahorro energético, simulación, monitorización.

Abstract

Water flow glazings are characterized by a water chamber which absorbs solar energy and transports it to a buffer tank. In this way, the envelope of the building harvests energy as a solar collector. Generally, control systems of buildings are centralized and energy strategies are previously designed.

In this work, basic elements of a decentralized or centralized control system are defined. Simple and differential thermostats are considered to program the logic of the control system. It is explored the possibility to have a decentralized control system based on intelligent water flow glazing modules. When considering centralized control systems, a central microcontroller unit reads different sensors and an embedded software controls the different parts of the system. When considering a decentralized control system, every module such as a water flow glazing has its own microcontroller to determine its flow rate. In any case, every microcontroller should report to a concentrator or hub its state. Later, this hub will upload periodically these data to the cloud.

It is shown the necessity to monitor the building to evaluate the energy savings as well as the emergent strategies associated to a decentralized control system. Besides, monitoring data allow to validate the simulation models for the thermal behaviour of the building.

Keywords: centralized control, decentralized control, emergent behaviour, energy saving, simulation, monitoring

1. Introducción

Generalmente, la climatización de un edificio se hace mediante un sistema centralizado en donde se recogen los valores de una serie de sensores y mediante una lógica de control se actúa sobre un conjunto de actuadores como pueden ser bombas de circulación o máquinas de frío o de calor. De esta manera, la lógica de control se articula desde un ordenador central como una serie de condiciones lógicas en cascada que se deben cumplir para encender o apagar el sistema de climatización. Si el edificio que se pretende climatizar es de una dimensión reducida, los resultados que se obtienen con un sistema de este tipo son aceptables. Mientras que si la dimensión y la complejidad del edificio es grande, la lógica de control se hace muy complicada y los resultados de confort y ahorro energético, generalmente, suelen ser deficientes.

En este trabajo se pretende sistematizar la climatización de un edificio mediante el control descentralizado y descentralizado. Aunque el control de la climatización centralizada es usual, en este trabajo se exponen los diferentes elementos de un sistema de control: sensores, actuadores y lógica de control. Posteriormente, se muestra cómo estas definiciones son válidas para los sistemas descentralizados y se expone la implementación de un sistema de control descentralizado. Es decir, se definen los componentes modulares, sus comunicaciones y sus reglas básicas de funcionamiento para que se enciendan y apaguen de manera autónoma.

Los sistemas de climatización ya sean centralizados o descentralizados disponen de software empotrado en una unidad central (sistemas centralizados) o en las diferentes componentes autónomas del sistema (sistemas descentralizados). Este software empotrado se encarga de leer los sensores, procesar su información mediante una lógica de control y determinar los valores de los actuadores.

Para poder analizar este comportamiento emergente debemos simular este tipo de sistemas descentralizados. Por una parte, simular la lógica de control de cada componente es algo muy sencillo puesto que se basa en copiar el mismo software empotrado a software simulación. Simular el comportamiento térmico de las componentes del sistema pasa por modelar los procesos de transferencia de calor e integrar numéricamente un sistema de ecuaciones. Esta puede llegar a ser una tarea mucho más complicada dependiendo de la componente considerada. De

cualquier forma, es necesario validar la herramienta de simulación mediante datos reales que se extraigan de una instalación piloto o instalación de pruebas.

El objetivo de este trabajo es clasificar y sistematizar el tipo de control de un sistema de climatización, definir los elementos de un sistema de control, definir las componentes modulares y la lógica de control ya sea en un sistema centralizado como en un sistema descentralizado.

2. Control de un sistema

Un sistema puede ser controlado de manera manual o de manera automática. La necesidad del control manual está asociada a situaciones imprevistas por el sistema automático o a la necesidad de la interacción del usuario con el sistema. La necesidad del control automático está asociada, generalmente, a la eficiencia del sistema y a la adaptación en tiempo real del sistema a las condiciones exteriores o interiores.

Atendiendo al control manual del sistema, éste puede clasificarse en:

1. Local. Se pretende controlar manualmente el sistema desde alguna interfaz gráfica de usuario que permita la interacción con el sistema en tiempo real.
2. Remoto. En este caso el usuario pretende controlar el sistema de forma remota y no se exige una interacción con el sistema en tiempo real.

La interfaz gráfica de usuario se implementa mediante una aplicación WEB y la comunicación está definida por un protocolo bidireccional HTTP. Esta interfaz permite al usuario: (i) definir la red de sensores, actuadores y elementos necesarios para el control, (ii) conocer el estado del sistema mediante una representación gráfica intuitiva y (iii) controlar el sistema manualmente mediante un "click" sobre los actuadores.

En el control manual se exige que el tiempo de latencia entre la orden emitida por el usuario y la acción ejecutada sea inferior a 100 mili segundos. Por lo tanto, es aconsejable que entre el sistema a controlar y el interfaz de usuario no exista ningún intermediario adicional y el protocolo de comunicación asegure los tiempos de latencia especificados. Generalmente, la interfaz de usuario se implementa como una aplicación WEB y se comunica con el sistema a través de la intranet de la propia edificación. En este caso el usuario actúa de cliente mediante cualquier navegador de páginas web y el sistema debe servir una página web. En la figura 1 se esquematiza el control manual local mediante un cliente (navegador) y un servidor de páginas web implementado en el sistema a controlar. El cliente para conocer el estado del sistema hace una petición de datos (GET) a la cual responde con el estado. Si el usuario en la aplicación web pulsa un actuador para encender o apagar una bomba, el cliente envía la información del botón pulsado (POST) y espera a que el servidor la procese y encienda la bomba.

En el control remoto no se exigen tiempos de latencia bajos y el tiempo que transcurre entre la emisión de la orden y la actuación del sistema pueden llegar a ser del orden de algunos minutos. Por el contrario, la principal dificultad que se suele encontrar en este tipo de sistemas es la dificultad para poder acceder desde el exterior a la IP del controlador del sistema. La razón suele estar asociada a que la IP del sistema no suele ser estática y por lo tanto puede ser desconocida, a problemas de seguridad que impiden abrir puertos específicos para acceder al sistema o a limitaciones impuestas por algún "proxy". Para evitar cualquier tipo de limitación anterior, se articula un servidor intermedio y se hace que el sistema actúa como cliente. Esta manera de proceder para el control remoto de nuestro sistema se esquematiza en la figura 1. en este caso, el sistema a controlar funciona como cliente enviando información (POST) de sus estado cada cinco minutos a un servidor conocido con IP fija y sin limitaciones de seguridad o puertos. Este servidor intermedio guarda el estado del sistema para cualquier cliente autorizado u usuario

que quiera conocer de forma remota el estado del sistema. De igual forma, si un usuario quiere actuar de forma remota en el sistema el servidor intermedio posibilita la acción. El usuario remoto mediante un navegador o "browser" (cliente) accede a la página web del servidor intermedio y pulsa un botón para encender una bomba. El navegador envía información (POST) al servidor intermedio. El servidor actualiza el estado con las nueva orden emitida y espera a que el sistema cada cinco minutos pide información (GET) del estado al servidor intermedio. Cuando la información de la orden de encender la bomba llega al sistema, el sistema la procesa y la bomba se pone a funcionar.

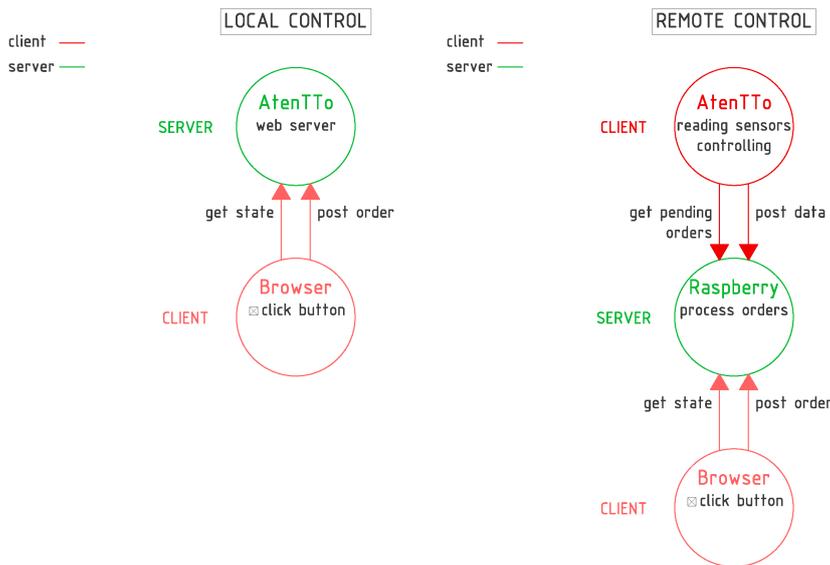


Figura 1. Control manual de un sistema: local y remoto.

Atendiendo al control automático del sistema, éste puede clasificarse en:

1. Centralizado. Existe una único microcontrolador que procesa las lecturas de los sensores y enciende o apaga los diferentes actuadores.
2. Descentralizado. Cada componente del sistema está gobernada por su propio microcontrolador que procesa lecturas de sus sensores y enciende o apaga el propio sistema.

En la figura 2 se representa esquemáticamente la arquitectura hardware asociada a un sistema centralizado y descentralizado. En los sistemas centralizados el microcontrolador lee la información de todos los sensores del sistema, la procesa y se encarga de enviar escribir las señales de los actuadores encendiendo o apagando las componentes del sistema. Entre sus ventajas está su sencilla operatividad, fácil instalación y coste reducido. Uno de sus problemas es que si el microcontrolador falla, el sistema deja de funcionar. Por otro lado, la determinación y las programación de las reglas o condiciones lógicas que controlan el sistema son muy extensas y difíciles de sistematizar.

En los sistemas descentralizados existe un microcontrolador por cada componente que se encarga de leer y procesar exclusivamente la información de sus sensores y actuadores. La realimentación entre las diferentes componentes se haya en las condiciones de contorno que comparten las diferentes componentes como pueden ser la condiciones climáticas interiores y exteriores y las temperaturas de entrada de los acristalamientos. Cada uno de los acristalamien-

tos activos del sistema cuenta con inteligencia propia y se puede encienden y apagan basados en unas reglas básicas.

Una de la ventajas de los sistemas descentralizados es que el software empotrado de las componentes modulares es mucho más sencillo que el software de la unidad central de proceso de los sistemas centralizados. Sin embargo, una de las desventajas de los sistemas descentralizados es el desconocimiento *a priori* del comportamiento emergente del sistema. Uno de los objetivos de este trabajo es simular el comportamiento emergente de un sistema descentralizado y analizar las estrategias emergentes desde el punto de vista de eficiencia energética.

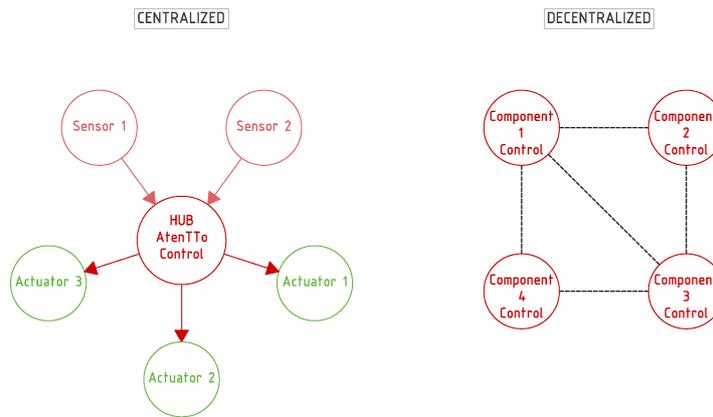


Figura 2. Control automático de un sistema: centralizado y descentralizado.

Con todos los datos centralizados, es muy fácil rediseñar el software empotrado de los controladores de cada acristalamiento con la idea de mejorar la eficiencia del conjunto. Las ventajas de un dispositivo distribuido son su seguridad de funcionamiento. Si una componente falla o se rompe, el sistema puede seguir funcionando casi sin percibir el fallo aislado. De manera espontánea, el sistema se reconfigura para dar un nuevo comportamiento.

Independientemente de que el sistema se encuentre descentralizado, todas las componentes del sistema o acristalamientos activos mandan mediante un enlace por radio frecuencia y de manera periódica la información de sus sensores y actuadores a una unidad central HUB o concentrador. Esta unidad central recopila toda la información del estado del conjunto y analiza el comportamiento global pudiendo así analizar la eficiencia energética del conjunto y alertar sobre posibles fallos o deficiencias en el comportamiento.

Es importante hacer notar que el comportamiento emergente del conjunto puede no ser el deseado. Es por esta razón, que debemos estudiar mediante simulación el comportamiento emergente del sistema para poder decidir sobre las reglas básicas de actuación de los acristalamientos activos. Para simular un sistema descentralizado, necesitamos dos tipos de software: (i) implementación del comportamiento físico de la componente y (ii) implementación de la lógica de control. Este último debe ser idéntico al software empotrado que tienen los microcontroladores de las componentes reales como los acristalamientos activos.

3. Elementos de un sistema de control

Todo sistema de control, ya sea centralizado o descentralizado, está formado por: un conjunto de sensores, un conjunto de actuadores y unas reglas de control que permiten actuar sobre el sistema de manera automática.

3.1. Sensores

Un sensor es un elemento del sistema capaz de medir una magnitud física mediante un efecto físico y transformarla en una señal eléctrica. El sistema de control en el que se encuentren los sensores vinculados, analiza el tipo de sensor y convierte la señal eléctrica en una magnitud física.

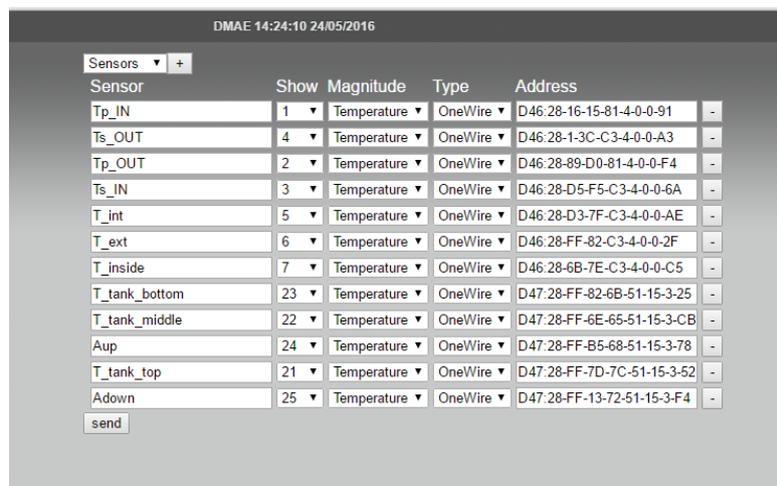
Las magnitudes físicas que miden estos sensores y que se consideran en este trabajo son: temperatura, humedad relativa, radiación solar, tensión y corriente eléctrica y consumo eléctrico. Desde el punto de vista práctico, los sensores se implementan mediante transductores que son dispositivos capaces de transformar o medir una energía asociada a un fenómeno físico a una señal eléctrica. De este manera, para definir un sensor se puede utilizar el fenómeno de la inducción electromagnética, mediante un transformador, para medir una corriente eléctrica. Por otra parte, existen fabricantes que encapsulan en dispositivos o en sensores diferentes fenómenos físicos. Mediante el "datasheet" suministrado por el fabricante se convierte la señal eléctrica a la magnitud física. De igual forma, existen en el mercado sensores que miden magnitudes analógicas como la temperatura y mediante un proceso interno la convierten en una señal digital con un protocolo determinado. Cualquiera de los sensores enumerados anteriormente se consideran en este trabajo.

Es importante hacer notar que una misma señal eléctrica no tiene porque estar asociada de manera directa a la magnitud de un sensor. Es decir, dependiendo la magnitud asociada a un sensor, éste puede tomar valores de diferentes transductores para dar una magnitud derivada de dos transductores. Por ejemplo, si queremos calcular la potencia eléctrica en el consumo de una línea debemos medir de manera separada dos transductores: la tensión de la red y la intensidad. Estas dos ondas suelen estar desfasadas y el valor del consumo real depende de la diferencia de fase de estas dos ondas. Así, se mide la intensidad y la corriente eléctrica por dos transductores diferentes y se define un sensor de potencia eléctrica a través de su expresión matemática en relación a la intensidad y la corriente eléctrica. Mientras que los transductores son elementos físicos, los sensores son abstracciones que se definen a través de las medidas de ciertos transductores. Es por esta razón que es importante definir las características de un sensor de la forma siguiente:

1. Etiqueta. La etiqueta es el nombre del sensor que nos permite identificar la magnitud medida. Es importante dotar de contenido semántico a las etiquetas para escribir el control del sistema de una manera mas sencilla. Por ejemplo, no conviene asignar etiquetas para la temperatura como T_{12} sino nombrar específicamente la temperatura que mide ese sensor en concreto.
2. Magnitud. La magnitud física del sensor considerado. Estas magnitudes pueden ser analógicas o infinitud de valores o digitales con solo dos posibles valores. Generalmente, los sensores digitales están asociados a interruptores o alarmas. Los sensores analógicos considerados en este trabajo pueden medir: temperatura, humedad relativa, radiación solar, intensidad y corriente eléctrica, consumo eléctrico.
3. Tipo. El tipo hace referencia al transductor físico asociado y al tipo de vinculación con el sistema. Así, existen los siguientes tipos:
 - a) RF22. Sensores inalámbricos que se vinculan de manera automática mediante radio frecuencia al concentrador o sistema de control.
 - b) OneWire. Sensores que se mandan su información por un cable con protocolo OneWire. El protocolo OneWire permite enganchar diferentes sensores OneWire en el mismo cable lo que permite la tomas de diferentes datos con un único cable. Estos sensores se vinculan de manera automática al concentrador o sistema de control.

- c) Analog. Sensores que suministran una señal eléctrica analógica. Estos transductores se conectan a el concentrador a través de puertos de lectura analógica. El concentrador dependiendo de su magnitud procesará la señal eléctrica para determinar el valor de la medida.
- d) Digital. Sensores que suministran una señal eléctrica digital. Estos transductores se conectan a el concentrador a través de puertos de lectura digital. En este caso, el concentrador transformará un nivel alto de voltaje de la señal digital en 1 y un nivel bajo en 0.
4. Dirección. La dirección de un sensor hace referencia a la ubicación hardware del mismo. Como hemos visto anteriormente, los sensores pueden ser cableados a sin cable. Para aquellos sensores analógicos con cable las direcciones posibles son: A0–A13 que son los 14 canales de lectura analógica que permite el concentrador. Sin embargo, si la magnitud de un sensor se deriva de dos transductores cableados en los canales A0 y A7, la sintaxis para la dirección de este sensor sería: A0:A7. Tanto la potencia eléctrica como el consumo eléctrico son magnitudes derivadas de la intensidad y la tensión eléctrica. Estos tipos de sensores admiten tanto una una dirección asociada a un canal (e.g. A7) como una dirección asociada a dos canales (e.g. A0:A7). En el primer caso se asume que la tensión eléctrica está en fase con la intensidad eléctrica y vale 230 v. Para los sensores digitales con cable, las direcciones posibles son: D30–D32 que son tres canales de lectura digital que permite el concentrador. Para los sensores de temperatura OneWire se reservan los puertos digitales D43–D50. En este caso, la dirección del sensor se determina de manera automática una vez los sensores hayan sido cableados a los puertos especificados. Para los sensores inalámbricos, las direcciones se determinan de manera automática siempre que los sensores inalámbricos hayan sido vinculados por software al concentrador.

Para facilitar definición de los sensores se ha diseñado una página WEB que permite modificar y seleccionar los diferentes sensores del sistema. En la figura 3 se muestran las características de los diferentes sensores que componen un sistema. En esta figura se muestra una tabla para los sensores donde las columnas son las características anteriormente descritas. Cada columna dispone de un menú desplegable que permite seleccionar la característica deseada. Por otra parte, cada magnitud lleva asociada un icono que permite entender a primera vista el valor de la variable medida.



Sensor	Show	Magnitude	Type	Address
Tp_IN	1	Temperature	OneWire	D46:28-16-15-81-4-0-0-91
Ts_OUT	4	Temperature	OneWire	D46:28-1-3C-C3-4-0-0-A3
Tp_OUT	2	Temperature	OneWire	D46:28-89-D0-81-4-0-0-F4
Ts_IN	3	Temperature	OneWire	D46:28-D5-F5-C3-4-0-0-6A
T_int	5	Temperature	OneWire	D46:28-D3-7F-C3-4-0-0-AE
T_ext	6	Temperature	OneWire	D46:28-FF-82-C3-4-0-0-2F
T_inside	7	Temperature	OneWire	D46:28-6B-7E-C3-4-0-0-C5
T_tank_bottom	23	Temperature	OneWire	D47:28-FF-82-6B-51-15-3-25
T_tank_middle	22	Temperature	OneWire	D47:28-FF-6E-65-51-15-3-CB
Aup	24	Temperature	OneWire	D47:28-FF-B5-68-51-15-3-78
T_tank_top	21	Temperature	OneWire	D47:28-FF-7D-7C-51-15-3-52
Adown	25	Temperature	OneWire	D47:28-FF-13-72-51-15-3-F4

Figura 3. Imagen de la aplicación WEB que permite introducir y seleccionar las características de los diferentes sensores que constituyen el sistema.

En la figura 4 y figura 5 se representan los iconos asociado tanto a las magnitudes físicas con-

tinuas: temperatura, humedad relativa, potencia eléctrica, consumo eléctrico y tensión eléctrica como a las magnitudes discretas: interruptor o alarma.

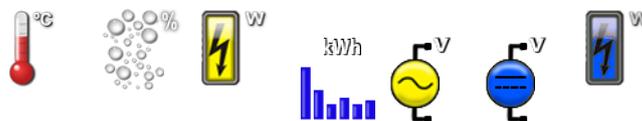


Figura 4. Diferentes iconos para sensores analógicos: temperatura, humedad relativa, potencia eléctrica, consumo eléctrico y tensión eléctrica.



Figura 5. Diferentes iconos para sensores digitales: botón o interruptor sin pulsar y pulsado, alarma inactiva y alarma disparada

3.2. Actuadores

Un actuador es un elemento del sistema dar una señal de apagado o encendido para un elemento del sistema como una bomba de circulación o una bombilla. El sistema de control determina el valor del actuador encendido (1) o apagado (0) y convierte la señal digital en una señal de tensión alta o baja. Esta señal de tensión alta o baja ataca una bobina de un relé y cierra un circuito para que una bomba funcione o una luz se encienda.

Las características que definen los actuadores son:

1. Etiqueta. La etiqueta es el nombre del actuador que nos permite identificar el dispositivo sobre el que actúa. Igual que ocurre con los sensores, es importante dotar de contenido semántico a las etiquetas para escribir el control mediante condiciones lógicas expresadas entre los valores de los sensores que determinan los valores de los actuadores.
2. Dispositivo. Esta característica define el dispositivo físico sobre el que actúa la señal eléctrica. Los dispositivos pueden ser: una bomba hidráulica, una luz, un calentador, el modo frío/calor de una bomba de calor. Cualquiera de estos actuadores asociados a estos dispositivos tiene el mismo comportamiento. Cuando el nivel de tensión eléctrica determinado por el sistema de control es alto, se ataca una bobina que cierra un circuito para accionar este dispositivo. La presencia de esta característica permite al sistema asociar iconos diferentes con contenido semántico que permiten programar el sistema en lenguaje no informático de una manera gráfica y sencilla.
3. Tipo. El tipo hace referencia a la señal física asociada con el actuador. Existen los siguientes tipos:
 - a) RF22. Actuadores inalámbricos que se vinculan de manera automática mediante radio frecuencia al concentrador o sistema de control.
 - b) X10. Actuadores que se operan mediante la red eléctrica con protocolo X10. El protocolo X10 permite utilizar la red eléctrica existente para enganchar diferentes actuadores distribuidos en el sistema.
 - c) Digital. Actuadores que se operan una señal eléctrica todo/nada. Existen 8 relés cuya bobina está vinculada a puertos digitales de escritura. El concentrador dependiendo de la lógica de control atacará a las bobinas de estos relés cerrando o abriendo un circuito. Es decir, estos actuadores son relés que pueden cerrar en el lado de alta cualquier tipo de tensión continua o alterna y con cargas de hasta 16 amperios.

4. Dirección. La dirección de un actuador hace referencia a la ubicación hardware del mismo. Los actuadores pueden ser cableados a sin cable. Para aquellos actuadores digitales con cable las direcciones posibles son: D22–D29 que son los 8 relés que permite controlar el concentrador. Para los actuadores inalámbricos, las direcciones se determinan de manera automática siempre que los actuadores inalámbricos hayan sido vinculados por software al concentrador.

De igual manera que en el caso de los sensores y para facilitar definición de los mismos, mediante una página WEB se puede modificar y seleccionar los diferentes actuadores del sistema. En la figura 6 se muestran las características de los diferentes actuadores que componen un sistema. En esta figura se muestra una tabla para los sensores donde las columnas son las características anteriormente descritas. Cada columna dispone de un menú desplegable que permite seleccionar la característica deseada. Además, cada actuador y en función del dispositivo que represente lleva asociado un icono que permite entender a primera vista el dispositivo gobernado por el actuador.

Actuador	Show	Device	Type	Address
R1	▼	Pump	Digital	D22
R2	▼	Pump	Digital	D23
R3	▼	Pump	Digital	D24
R4	▼	Pump	Digital	D25
Circulador	13 ▼	Pump	Digital	D26
Aerotermo	14 ▼	Pump	Digital	D27
Bomba	11 ▼	Pump	Digital	D28
Calor	12 ▼	HeatCoolMode	Digital	D29

Figura 6. Imagen de la aplicación WEB que permite introducir y seleccionar las características de los diferentes sensores que constituyen el sistema.

En la figura 7 se representan los iconos asociados tanto a los dispositivos físicos asociados:



Figura 7. Diferentes iconos para actuadores digitales: modo de frío o calor, calentador encendido o apagado, luz encendida o apagada y bomba circulando o parada.

Una vez definido la tabla de sensores y actuadores, la figura 8 muestra de manera compacta los sensores y actuadores definidos así como sus valores actuales. Mientras que los sensores analógicos muestran el valor de su magnitud sobre el mismo icono, tanto los sensores digitales como los actuadores digitales cambian de color al pasar de 0 a 1. En la primera fila de la figura 8 se muestran un conjunto de sensores de temperatura mostrando su valor actual. En la segunda fila de esta misma figura se muestran un conjunto de actuadores. El primer actuador está asociado a una bomba de circulación y se encuentra en verde porque la bomba está funcionando. El segundo actuador es una señal digital de 230 v. asociado a señales de mando de la bomba de calor. En este caso cuando la señal está a 230 v. significa que la bomba de calor debe servir frío.

Si esta señal estuviera a 0 v., la bomba de calor serviría calor y el icono asociado a este actuador cambiaría de aspecto.



Figura 8. Imagen de la aplicación WEB que permite mostrar en cada momento los valores de los sensores y actuadores.

3.3. Lógica de control en sistemas centralizados

Para llevar a cabo el control térmico de una instalación de climatización se propone un conjunto de termostatos simples y diferenciales, un conjunto de temporizadores y un conjunto de macros que permiten vincular diferentes actuadores mediante una única etiqueta. La característica fundamental es que el conjunto de termostatos actúa sobre los actuadores a partir de los valores de los sensores de temperatura y mediante unas consignas de temperatura prefijadas.

3.3.1. Termostatos

Un termostato es un componente de un sistema de control que abre o cierra un circuito eléctrico en función de una temperatura. En el presente trabajo se definen termostatos como objetos software. Es decir, entidades software que mediante la información de los valores de temperatura de los sensores que tengan asociados determinan el valor de los actuadores que tengan asociados.

Desde el punto de vista software, un termostato es un objeto de la forma siguiente:

```
class Thermostat
{
public:
    String name;           // label to identify the name of the thermostat
    String sensor1;       // labels of the associated temperature sensors
    String sensor2;       // differential thermostat if sensor2!="
    String setpoint;      // desired temperature setpoint
    String delta;         // hysteresis band
    String mode;          // mode : cool / heat / off
    short int i1, i2;     // indexes of array of sensors

    float T_setpoint, dT;
    bool on;              // on/off
};
```

```

    void setup( Sensor [], short int );
    short int check( Sensor [], short int );
};

```

Los termostatos pueden tener asociados a uno o dos sensores de temperatura y pueden estar en diferentes modos de funcionamiento: modo frío, modo calor o inactivos. Si un termostato en modo calor tiene asociado un único sensor de temperatura, el termostato se enciende cuando la temperatura sea menor que una determinada consigna menos cierto ΔT o banda histéresis y se apaga cuando la temperatura del sensor supere la consigna mas ΔT . Si el termostato está en modo de frío, la lógica de control es la inversa. En el caso de que exista un segundo sensor de temperatura vinculado al termostato, el termostato se considera diferencial. Es decir, la temperatura de comparación es la diferencia de las temperaturas de ambos sensores. En el siguiente fragmento de código se muestra la lógica de control anteriormente descrita.

```

short int Thermostat :: check(Sensor sensors [], short int Ns )
{
    float T, T1, T2;

    T1 = sensors[i1].value;
    if (i2<0) T2 = 0;
    else     T2 = sensors[i2].value;
    T = T1 - T2;

    if (mode=="Cool")
    {
        if      (T > T_setpoint + dT)
            on = true;
        else if (T < T_setpoint - dT)
            on = false;
    }
    else if (mode=="Heat")
    {
        if      (T < T_setpoint - dT)
            on = true;
        else if (T > T_setpoint + dT)
            on = false;
    }
    else if (mode=="Off")
    {
        on = false;
    }
}

```

Como la idea es poner hacer una programación no informática, la creación de los diferentes termostatos así como la asignación de sus sensores asociados y el resto de sus características se puede hacer mediante una página WEB como se muestras en la figura. Los nombres de los termostatos pueden ser o bien etiquetas de actuadores o etiquetas de macros previamente definidas.

En la figura 9 aparece un botón con el símbolo + que al pulsarlo crea un nuevo termostato. De igual forma, el símbolo - permite eliminar un determinado termostato.

3.3.2. Macros

Las macros están caracterizadas por un nombre y representan la asociación de uno o más actuadores. La definición de la macro permite actuar con una sola orden para encender o apa-



Figura 9. Parámetros que definen un termostato: sensores asociados, actuadores o macros asociadas, temperatura de consigna, banda de histéresis y modo de funcionamiento (frío/calor).

gar un conjunto de actuadores diferentes. Así, si la orden de un termostato debe arrancar dos bombas a la vez, se puede crear una macro que, mediante su nombre, asocie los dos actuadores correspondientes de las bombas. Posteriormente, se crea un termostato con el nombre de la macro y cuando el termostato se acciona, las dos bombas empiezan a funcionar a la vez. En la figura 10 se muestra una tabla que define la estructura de los actuadores y que permite crearlos desde una aplicación WEB.

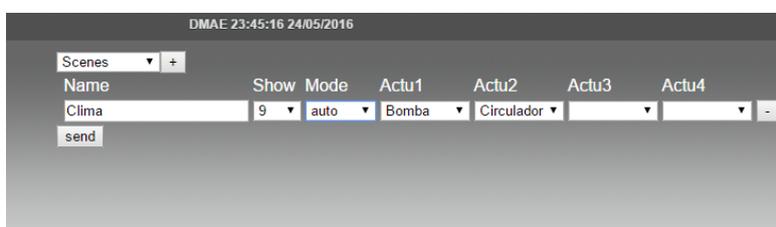


Figura 10. Parámetros que definen un termostato: sensores asociados, actuadores o macros asociadas, temperatura de consigna, banda de histéresis y modo de funcionamiento (frío/calor).

Los modos de funcionamiento de las macros pueden ser:

1. AUTO. La macro está gobernada por el termostato al que se encuentre vinculado.
2. MANUAL. La macro está gobernada por el usuario desde la aplicación WEB.
3. OFF. Todos los actuadores asociados a la macro se encuentran apagados.
4. DISABLE. La macro está desactivada y no permite actuar ni manual ni automáticamente sobre los actuadores asociados.

3.3.3. Temporizadores

Los temporizadores permiten programar en un determinado horario la climatización del edificio. Los temporizadores están definidos por la hora de inicio, la hora de finalización y por los días de la semana a los que se aplica. Los nombres de los temporizadores pueden ser actuadores o nombres de macros. En la figura 11 se representa una imagen de la aplicación WEB que permite introducir los valores anteriormente descritos. Además, de los parámetros anteriores, los temporizadores llevan asociado un modo de funcionamiento que puede ser: ON, OFF, DISABLE o SIMUL. Si el modo es ON, el temporizador activa la macro o el actuador en la banda temporal elegida. Si el modo es OFF, el temporizador desactiva la macro o el actuador en la banda temporal elegida. Si el modo es DISABLE, el temporizador está desactivado o como si no existiera. Finalmente, si el temporizador se encuentra en modo SIMUL, la activación del temporizador se realiza de manera aleatoria a lo largo del día.

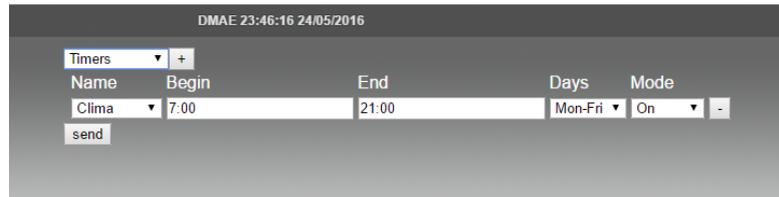


Figura 11. Parámetros que definen un temporizador: actuadores o macros asociadas, hora de inicio, hora de finalización, días de la semana a los que se aplica y modo de funcionamiento.

3.3.4. Software empotrado

La programación se realiza mediante el chequeo en cada momento de todos los termostatos y temporizadores definidos. En el siguiente fragmento de código se muestra como se lleva a cabo este chequeo.

```
find_indexes( macros[i].name, timer_names, N_timers, itimers, N_itimers );
macro_on = true;

for (j=0; j<N_ithermos; j++) macro_on = macro_on && thermostats[ithermos[j]].on;

check_timers = false;
for (j=0; j<N_itimers; j++)
    if (timers[itimers[j]].enforceable)
    {
        macro_on = macro_on && timers[itimers[j]].on;
        check_timers = true;
    }
```

En el código anterior, el índice j representa el índice de cada termostato o temporizador asociado a una determinada macro. Una misma macro puede tener asociado uno o más termostatos. Así, el valor de la macro viene determinada por condición de AND lógico entre todos los termostatos que gobiernen esa macro. Posteriormente, se evalúan las condiciones lógicas asociados a los temporizadores y se procede de igual manera con los temporizadores. Finalmente, se asigna el valor de la macro.

Por otra parte, se pueden definir diferentes macros que vinculen a un mismo actuador. Es decir, el valor del actuador depende de los diferentes valores de las macros asociadas. Así, el valor del actuador viene determinado por un OR lógico entre todas las macros en donde aparezca el actuador en cuestión. Por ejemplo, para el control de la temperatura interior tanto en invierno como en verano podemos definir dos macros de nombre: frío y calor. La primera macro puede llevar asociado un termostato de frío con una consigna de 28° C y la macros de calor un termostato de calor con una consigna de 20° C. Si las dos macros actúan sobre una bomba de circulación, la bomba se pondrá a funcionar siempre que la macro de calor o la macro de frío la activen mediante sus termostatos.

3.3.5. Bucle de control

Una vez se han definido todos los sensores, actuadores, macros, termostatos y temporizadores se procede a controlar el sistema. Es importante hacer notar que este tipo de control es centralizado. Es decir, con la información de todos los sensores de la instalación se decide mediante un conjunto de condiciones lógicas basadas en termostatos simples y diferenciales actuar sobre las bombas de circulación de la instalación. El bucle de control o algoritmo se implementa de la siguiente forma:

1. Sirve una página WEB y escucha las peticiones del usuario.
2. Procesa las peticiones de la página WEB tales como: cambio de consignas, planificación de horarios de funcionamiento, modificación de etiquetas de variables y volcado de datos.
3. Procede a la lectura de todos los sensores: temperatura, radiación solar, consumo eléctrico, etc.
4. Controla o decide los valores de los actuadores mediante las lecturas de los sensores y mediante los termostatos o programaciones temporales.
5. Escribe los valores de todos los actuadores.
6. Dependiendo de la velocidad de muestreo asignada, guarda en una tarjeta de memoria SD el estado de todos los sensores y todos los actuadores.

El usuario a través de una aplicación WEB tiene la posibilidad de interactuar en el sistema para modificar los sensores, actuadores y la lógica de control.

3.4. Lógica de control en sistemas descentralizados

Todo lo expuesto anteriormente es para control centralizado en el que una unidad central de proceso gobierna el sistema mediante un conjunto de sensores y de actuadores junto con una lógica de control asociada. Sin embargo, cuando no existe un control centralizado, cada parte del sistema es gobernada por sí misma. Es objeto de esta sección explorar el comportamiento emergente de este tipo de sistemas. Para llevar a cabo este objetivo, es necesario definir los agentes o elementos que tengan capacidad de control y, en consecuencia, se deban gobernar y las reglas básicas que controlan estos elementos. En el caso del control térmico descentralizado, la realimentación entre los diferentes elementos se lleva a cabo mediante las condiciones de contorno de las componentes.

Se considera un sistema de climatización formado un conjunto de acristalamientos activos, como el que se muestra en la figura 12, vinculados en paralelo a un circuito primario. Cada acristalamiento está gobernado por un microcontrolador propio que decide arrancar o parar el caudal del acristalamiento.

3.4.1. Componentes o agentes que integran el sistema

El sistema modular de acristalamiento de fachada está formado por un vidrio de 3 metros de altura por 1.3 metros de anchura. Este vidrio dispone en su zona inferior de una conexión para la entrada y otra para la salida del agua. El flujo de agua a lo largo de la cámara se realiza desde el separador horizontal inferior hasta el separador horizontal superior donde el agua se recolecta y se envía de vuelta mediante el espaciador vertical a un intercambiador de calor de tubos. En el intercambiador de calor el agua cede el calor al circuito primario y vuelve a la ventana impulsado por una micro bomba de circulación. El sistema está diseñado para que sea capaz de transportar la energía solar absorbida por la cámara de agua con un caudal de diseño de 8 litros por minuto. Por otra parte, la pérdida de carga en todo el circuito primario se limita a 30 kPa (3m de columna de agua) lo que es equivalente a una potencia hidráulica de la bomba de circulación de 4 vatios. Todo este sistema hidráulico se completa un microcontrolador con un conjunto de sensores de temperatura y un relé que permite accionar la bomba de circulación.

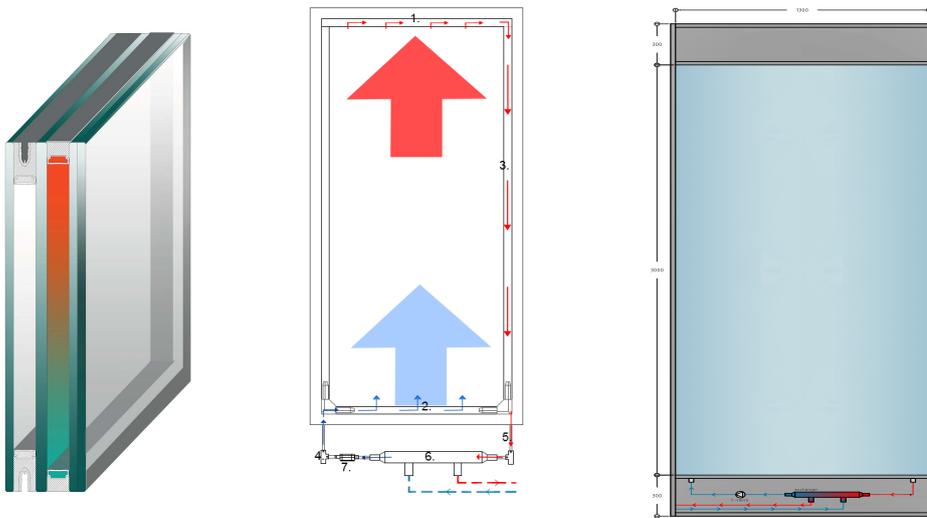


Figura 12. Sistema modular autónomo descentralizado compuesto por: acristalamiento, bomba de circulación, intercambiador de calor junto con un microcontrolador y sensores de temperatura y relé de actuación para la bomba.

3.4.2. Reglas básicas de control de un acristalamiento activo

En este apartado se definen las reglas básicas basadas en termostatos simples y termostatos diferenciales que permiten arrancar o parar la bomba de circulación de un acristalamiento modular. Estas reglas se implementan como software empotrado en el microcontrolador de cada módulo. El comportamiento emergente del sistema descentralizado es el resultado de la interacción entre los diferentes módulos con diferentes orientaciones y condiciones de contorno que comprenden la fachada.

Se consideran sensores de temperatura ubicados en las siguientes posiciones:

1. Cara interior superior e inferior del acristalamiento T_{heat} y T_{cool} .
2. Temperatura exterior e interior del acristalamiento T_{ext} y T_{int} .
3. Tubería de impulsión y retorno del circuito secundario T_{sin} y T_{sout} .
4. Tubería de impulsión y retorno del circuito primario T_{pin} y T_{pout} .

Las reglas simples se implementan mediante dos macros llamadas “frío” y “calor” que mandan la bomba de circulación. Además, cada macro lleva asociada dos termostatos diferentes. Así, la macro de “frío” lleva asociada los dos termostatos siguientes:

1. Termostato de frío basado en la temperatura interior T_{int} con consigna de 28°C
2. Termostato diferencial de frío basado en T_{heat} y T_{pin} con una consigna de 15°C para enfriar el acristalamiento.

De igual forma, la macro “calor” lleva asociada los dos termostatos siguientes:

1. Termostato de calor basados en la temperatura interior T_{int} con consigna de 20°C
2. Un termostato diferencial de frío basado en T_{heat} y T_{cool} con una consigna de 5°C para evitar gradientes de temperatura en el acristalamiento.
3. Termostato diferencial de calor basado en T_{heat} y T_{pin} con una consigna de 5°C para calentar el acristalamiento.

4. Monitorización de datos

Para evaluar la eficiencia del sistema y el comportamiento del mismo se deben monitorizar los sensores y los actuadores a lo largo del tiempo. El proceso de monitorización puede en tiempo real o en tiempo diferido. Generalmente, cuando se trata de monitorizar las instalaciones de climatización para medir su eficiencia o llevar a cabo su mantenimiento, la medida de datos en tiempo diferido es mas que suficiente.

En esta sección se pretende explicar las diferentes estrategias de monitorización así como los servicios derivados de los datos de la monitorización. Con respecto a la monitorización del sistema, definimos los siguientes estrategias de monitorización:

1. Local. Los datos de sensores y actuadores se guardan en una tarjeta de memoria SD en el microcontrolador.
2. Remota. Los datos locales de sensores y actuadores de un día se mandan a un servidor remoto que, posteriormente, los sube a la nube (e.g. Dropbox). Dependiendo de las necesidades del sistema, los datos se pueden enviar instantáneamente a un servidor remoto que los procesa en tiempo real para prestar algún servicio.

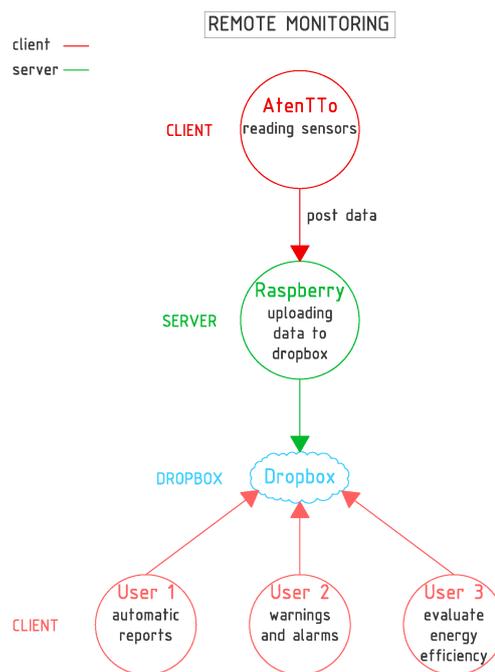


Figura 13. Parámetros que definen un temporizador: actuadores o macros asociadas, hora de inicio, hora de finalización, días de la semana a los que se aplica y modo de funcionamiento.

En el caso de que los datos se suban a la nube, se puede definir un mantenimiento predictivo basado en la monitorización remota que permite prestar los siguientes servicios:

1. Informes de la eficiencia del sistema.
2. Alertas y alarmas.

3. Informes sobre las actuaciones y la posibles mejoras relacionadas con los hábitos y con el uso.

En la figura 13 se muestra el esquema de la monitorización remota. El concentrador de datos del sistema envía diariamente la información (POST) de sensores y actuadores a un servidor prefijado. Este servidor, identifica la procedencia de los datos y los sube a la nube. En concreto, cada instalación lleva una etiqueta y los datos se almacenan en la nube clasificados por instalaciones y por fechas en diferentes carpetas. Una vez que los datos se encuentran en la nube, se puede desarrollar un cliente que pide información (GET) diariamente de las diferentes instalaciones para evaluar la eficiencia energética del sistema, informar sobre su comportamiento o dar alertas y pautas de mejora. Estos clientes pueden desarrollar servicios múltiples al usuario final de la instalación con la idea de conocer el estado actual y mejorar la instalación existente.

Se pretende que estos servicios sean automáticos y tengan memoria del uso y de la eficiencia de la instalación. Generalmente, estos sistemas se entienden como sistemas de inteligencia artificial. Es intención de los autores explorar la programación de servicios inteligentes basados en el comportamiento emergente de un conjunto de reglas simples.

5. Validación de la simulación mediante datos reales

Como hemos mencionado anteriormente, la simulación del comportamiento térmico de un sistema exige la modelización de cada componente físico del sistema. Por lo tanto, es requisito previo a la simulación del conjunto tener confianza en los modelos matemáticos elegidos. Es decir, comparar los resultados reales de componentes aisladas con los resultados de simulación de diferentes modelos matemáticos. En esta validación las condiciones de contorno se supondrán conocidas para desacoplar el comportamiento de una componente del comportamiento emergente o grupal. En esta primera parte de la validación no es necesario tener en cuenta las leyes de control ya sean centralizadas o descentralizadas.

Es importante hacer notar que las condiciones de contorno cambian dependiendo del sistema considerado. Es decir, si simulamos un acristalamiento aislado, las condiciones de contorno son los flujos de calor y radiación a ambos lados del acristalamiento (interior y exterior). Sin embargo, si simulamos un edificio en su conjunto las únicas condiciones de contorno son las que impone la climatología exterior. En este caso, las magnitudes interiores se determinan como solución del propio problema.

En resumen, cuando se trata de simular es necesario validar individualmente los modelos para cada componente por separado y, posteriormente, hacer una simulación global con todos los componentes y con sus reglas de control. La validación mediante datos reales de la simulación para un sistema centralizado o descentralizado es del mismo orden de dificultad. Mientras que para un sistema descentralizado el paradigma de programación con orientación a objetos es lo más apropiado, para simular un sistema centralizado la programación funcional es, probablemente, la más acertada.

Por otra parte, para poder llevar a cabo la validación mediante datos reales se deben medir todas las variables necesarias que intervengan en las condiciones de contorno. Por ejemplo, cuando se trata de validar el comportamiento térmico de un acristalamiento activo aislado es necesario conocer los niveles radiación directa y difusa exteriores e interiores. Eso exige medir la radiación directa y difusa a un lado y al otro del acristalamiento. Como hemos comentado anteriormente, esta validación no exige que el acristalamiento esté conectado a un sistema externo por lo que se puede validar con un ensayo real lo más simple posible. En concreto, un ensayo real muy simple es la determinación de la temperatura de estancamiento de la cámara de agua o temperatura que alcanza a lo largo del día si no existe circulación de agua.

Una vez realizada la validación de cada componente procedemos a validar el sistema en su conjunto. Por ejemplo, si el sistema considerado es una habitación adiabática con un acristalamiento activo en una de sus superficies, las condiciones de radiación interior no son condiciones de contorno del problema sino que son parte de la solución del propio problema. Si en el ensayo real medimos suficientes valores de temperatura y radiación directa y difusa, el ensayo podrá servir para validar diferentes componentes aisladas y, finalmente, para validar el sistema en su conjunto.

Para poner de manifiesto la metodología anteriormente expuesta, se considera un acristalamiento activo en una cubierta de 30 grados de inclinación con una orientación de 150 grados. En la figura 14 se representan los datos reales de la temperatura de estancamiento de la cámara de agua T_{heat} para los días 9 de mayo de 2012 y 26 de noviembre de 2013 en función de la hora del día. En esta misma gráfica se representan los valores de la temperatura interior T_{int} junto con la temperatura exterior T_{ext} . Se puede observar como mientras en el mes de mayo la temperatura alcanza los 90 °C, en el mes de noviembre la temperatura de estancamiento no supera los 40 °C.

En este caso para poder validar el modelo físico del acristalamiento, se considera un acristalamiento aislado y tanto la temperatura exterior como la temperatura interior constituyen condiciones de contorno junto con los valores de radiación solar directa y difusa interior y exterior. Los mismos datos reales pueden servir para validar el modelo térmico de la distribución de la radiación solar en el interior de una edificación. En este caso, las condiciones de contorno son la temperatura de la cubierta y los valores de radiación solar directa y difusa que atraviesan el acristalamiento. La solución de este problema consiste en determinar la temperatura interior así como la radiación difusa interior como solución de la distribución de la radiación solar exterior.

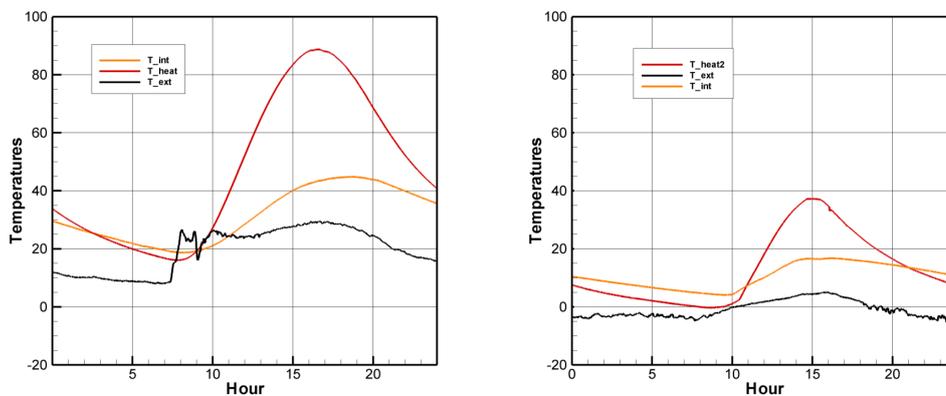


Figura 14. Temperaturas de estancamiento de la cámara de agua de un acristalamiento de cubierta de 30° dependiente y con 150° de orientación. Datos reales 9 de mayo de 2012 y 26 de noviembre de 2013

En la figura 15 se representan los datos reales de la temperatura del mismo acristalamiento cuando la cubierta intercambia calor un un depósito de inercia para los días 11 de mayo de 2014 y 26 de noviembre de 2013. En este caso se considera un termostato diferencial asociado a la temperatura de la cámara de agua T_{heat} y la temperatura de un depósito de inercia T_{dep} con una consigna de 10 °C y una banda de histéresis de 2 °C Es decir, si la diferencia de temperatura entre la cubierta y el depósito de inercia es superior a 12 °C, el circulador se enciende y si la misma diferencia de temperatura es menor que 8 °C el circulador se para. Se observa en esta figura como se obtiene un temperatura para la cámara de agua en forma de diente de sierra. Para el 11 de mayo de 2014, la temperatura del depósito es prácticamente constante y igual a 40 °C por lo que la cubierta arranca cuando su temperatura sea superior a 52 °C y se para cuando sea inferior a 48 °C. Para el 26 de noviembre de 2013, la temperatura del depósito es prácticamente constante y igual a 20 °C por lo que la cubierta arranca cuando su temperatura

sea superior a 32°C y se para cuando sea inferior a 28°C .

De igual forma que en el caso de la validación de la temperatura de estancamiento, cuando se trata de validar el modelo matemático de un acristalamiento con circulación, tanto las magnitudes interiores como las magnitudes exteriores constituyen las condiciones de contorno.

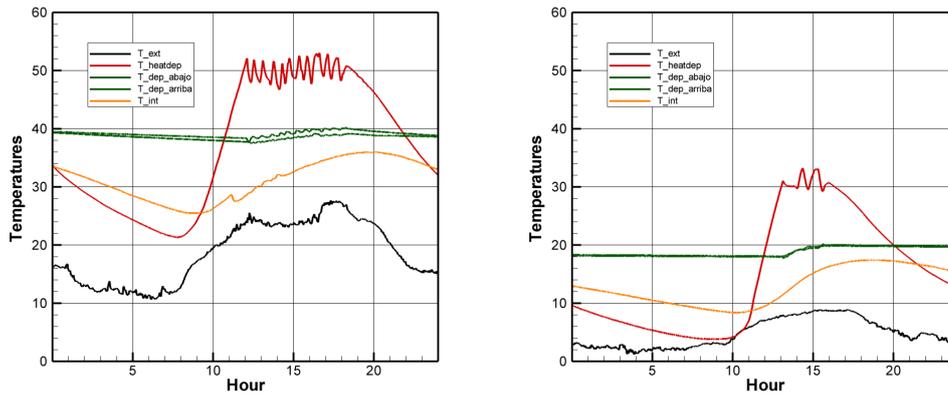


Figura 15. Temperatura en la cámara de agua para un acristalamiento de cubierta de 30° dependiente y con 150° de orientación controlado mediante un termostato diferencial. Datos reales 11 de mayo de 2014 y 18 de noviembre de 2014.

6. Conclusiones

El control de los sistemas de climatización puede ser centralizado o descentralizado. Aunque, generalmente, los sistemas de control son centralizados, los sistemas descentralizados pueden llegar a tener resultados emergentes no previstos que pueden ser atractivos para la eficiencia energética y para el confort del edificio. Independientemente de si el control es centralizado o descentralizado, se han definido los elementos básicos que contiene un sistema de control como son: los actuadores y los sensores. Para llevar a cabo la programación del control del sistema se han definido los termostatos, los macros y los temporizadores como elementos base que permiten realizar cualquier tipo de control. El control centralizado de un sistema complejo se puede llevar a cabo mediante un conjunto de termostatos y temporizadores. En el caso del control descentralizado, los termostatos y temporizadores se distribuyen entre los diferentes componentes que constituyen el sistema.

En el control descentralizado se espera un comportamiento emergente diferente del impuesto mediante las reglas simples de los termostatos. Sin embargo, el sistema se puede comportar de manera no deseada y se hace necesario simular previamente este comportamiento emergente. Para poder llevar a cabo esta simulación se requiere tener un modelo matemático fiable de cada componente del sistema y, posteriormente, implementar el control del sistema que debe coincidir exactamente con el software empotrado de las componentes reales. La fiabilidad o validación del modelo matemático solo se puede tener mediante la comparación de los resultados de la simulación con los datos reales. Por lo tanto, es necesario que el sistema además de un software empotrado de control tenga un software empotrado que informe del estado del sistema a lo largo del tiempo. Un servidor *ad hoc* se encargará de subir a la nube estos datos de sensores y actuadores. El disponer de datos reales de monitorización se puede utilizar con una doble vertiente: (i) validar modelos matemáticos de simulación y (ii) analizar la eficiencia del sistema a través del dato real generando informes y alertas.

Referencias

- [1] DI MARZO SERUGENDO, G., *Autonomous systems with emergent behaviour*, Handbook of Research on Nature-Inspired Computing for Economics and Management, ISBN13: 9781591409847, 2007.
- [2] PARUNAK , H. VAN DYKE and VANDERBOK, R. S., *Emergent Behavior in Distributed Control Systems*, Proceedings of ISA Tech '97, Instrument Society of America, 1997.
- [3] AL-ASSADIA, S.A.K, PATELB, R., ZAHEER-UDDINC, M., and BREITINGER, J., *Robust decentralized control of HVAC systems using H-performance measures*, Journal of the Franklin Institute 341(7):543-567, 2004
- [4] LIANG,J. and DU, R., *Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies*, Energy conversion and management, vol. 49, no. 4, pp. 517-528, Apr. 2008.
- [5] BOBÁL, V., BÖHM, J., FESSL, J. and MACHÁČEK, J., *Practical Aspects of Selftuning Controllers: Algorithms, Implementation and Applications*. London, U.K.: Springer-Verlag, 2005.

Sobre los autores:

Nombre: Belén Moreno

Correo electrónico: belen.moreno@upm.es

Institución: Departamento de Matemática Aplicada a la Ingeniería Aeroespacial, E.T.S.I. Aero-náutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Nombre: Juan A. Hernández

Correo electrónico: juanantonio.hernandez@upm.es

Institución: Departamento de Matemática Aplicada a la Ingeniería Aeroespacial, E.T.S.I. Aero-náutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid, España.