

Investigación

Simulador térmico para sistemas de climatización basado en componentes polimórficos conexiados mediante grafos

Thermal simulator for HVAC systems based upon polymorphic components connected by graphs

Juan A. Hernández Ramos y Fernando del Ama Gonzalo

Revista de Investigación



Volumen IV, Número 2, pp. 091–104, ISSN 2174-0410

Recepción: 14 Abr'14; Aceptación: 10 Sep'14

1 de octubre de 2014

Resumen

El consumo energético de las edificaciones representa el 40% del consumo energético en la Unión Europea. El programa Horizon 2020 promueve el diseño y construcción de edificaciones que no consuman energía. El Departamento de Energía de los EEUU [1] lleva desarrollando desde hace muchos años el EnergyPlus: un código de simulación que permite simular el consumo energético de sistemas de climatización muy complejos. Sin embargo, el programa no contempla elementos como ventanas activas con agua. En otras ocasiones, los modelos matemáticos no se ajustan a la realidad. Todas estas razones hacen necesario desarrollar un software paralelo para la evaluación mediante la simulación de sistemas energéticos. El objetivo de la herramienta de simulación es la exploración y optimización de soluciones. El esfuerzo de codificación de todas esas configuraciones, incluso en el caso del EnergyPlus, es muy grande. El presente trabajo consiste en el desarrollo de un código de simulación basado en abstracciones definidas como componentes vinculadas entre sí mediante grafos. Una vez realizado el esfuerzo de modelización de cada una de las componentes del sistema, la simulación energética de un esquema de principio específico requiere un esfuerzo mínimo. La simulación se crea a partir de una lista de componentes o nodos y de una lista de arcos que vinculan de manera automática los diferentes componentes.

Palabras Clave: Simulación, EnergyPlus, eficiencia energética, edificaciones sostenibles.

Abstract

The buildings sector represents 40% of the European Union's (EU) total energy consumption. Reducing energy consumption in this area is therefore a priority under the "20-20-20" objectives on energy efficiency. The Department of Energy of the U.S.A. [1] has been developing for many years the EnergyPlus : A simulation code to calculate the energy

consumption of HVAC system of a buildings. However, the program does not cover items such as an IntelliGlass active window with water chamber. All these reasons make it necessary to develop parallel software to simulate energy systems. The objective of the simulation tool is to explore and to optimize different solutions. The effort to codify all these settings, even in the case of the EnergyPlus, is very large. It is shown a simulation code based on components or abstractions linked through graphs. It is also shown that the effort to simulate a new HVAC system is minimal. The HVAC system is created from a list of components or nodes and a different lists of arcs. These lists are automatically linked to form graphs which are automatically simulated.

Keywords: simulation, EnergyPlus, energy efficiency, sustainable buildings.

Introducción

La climatización de un edificio se compone de un conjunto de sistemas complejos en el que intervienen muchos factores. Debido a la subida del precio de la energía en los últimos años las normas que rigen la construcción y el acondicionamiento de los edificios están imponiendo dispositivos que permitan la producción de energía mediante fuentes renovables. El Código Técnico de la Edificación [2] hace obligatorio el uso de paneles solares fototérmicos para la producción de agua caliente sanitaria. Por otra parte, la directiva 2010/31/UE del Parlamento europeo relativa a la eficiencia energética de los edificios [3], especifica que el 20% de la energía producida en Europa debe proceder de fuentes renovables. Eso implica que los edificios, como grandes consumidores de energía final, deben tender a integrar dispositivos que produzcan energía para climatización e iluminación.

El coste de los equipos de climatización es elevado, por lo que se hace necesario desarrollar sistemas de simulación previos que garanticen que las decisiones del proyecto son las óptimas para garantizar el confort de los ocupantes con el mínimo gasto energético asociado.

La simulación matemática de estos sistemas requiere de varios niveles de abstracción. Primero se simplifica una instalación real a través de un esquema de principio de las instalaciones energéticas. Posteriormente se define cada elemento de la instalación como un conjunto de componentes. Cada componente está definido por una serie de entradas y salidas. En el caso de un sistema de climatización los componentes pueden tener entradas y salidas de fluidos (agua, aire, fluidos refrigerantes de bajo punto de ebullición,...) y también entradas y salidas de flujos de calor debido al intercambio convectivo de energía con otros componentes a diferentes temperaturas.

La programación multicapa permite la simulación de sistemas físicos complicados. La idea básica de este paradigma se basa en la construcción de abstracciones jerarquizadas mediante su funcionalidad [4].

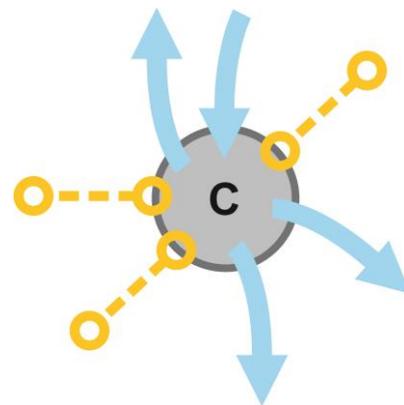


Figura 1. Definición de un componente en un sistema de grafos. Las flechas azules representan entradas y salidas de fluidos en el componente. Las líneas discontinuas representan intercambio de energía con otros componentes mediante radiación y convección.

A continuación se van a describir físicamente los componentes que integran el sistema:

Los vidrios activos consisten en dos láminas de vidrio entre las que existe una cámara de agua en circulación. Se pueden utilizar, bien al exterior para captar radiación solar y calentar agua, bien al interior para emitir calor si el agua circula a mayor temperatura que la del aire interior.

Una bomba de calor por compresión emplea un fluido refrigerante con un bajo punto de ebullición. Esta máquina térmica permite transferir energía mediante calor de un ambiente a otro, según se requiera. Para lograr esta acción es necesario un aporte de electricidad.

Un depósito de inercia es un gran volumen de agua que puede contar con varias entradas y salidas. Puede servir para acumular energía o para disiparla cuando hay un exceso de calor en los circuitos de los vidrios activos.

Los intercambiadores de calor de placas son los dispositivos que permiten la transferencia de energía calorífica entre todos los dispositivos anteriores. Están compuestos de finas placas metálicas con gran superficie de intercambio de calor entre los fluidos que circulan por cada una de estas placas.

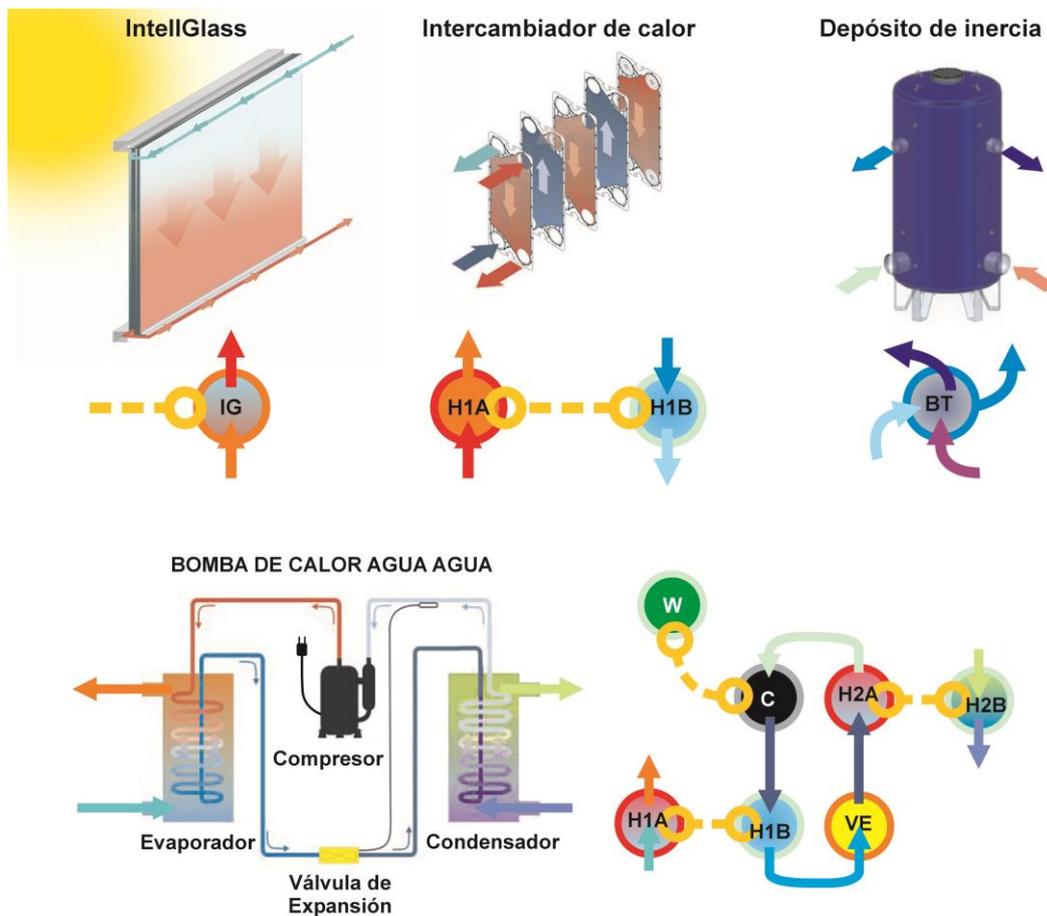


Figura 2. Definición del funcionamiento de los elementos del sistema de climatización en función de sus componentes.

1. Sistemas de climatización de edificios

Para conseguir una sensación de confort en el interior de un edificio se precisa controlar la temperatura y la humedad relativa. Para ello es necesario aportar la energía suficiente para compensar las pérdidas o ganancias que se producen a través de los cerramientos y ventilar el aire interior.

En el edificio que se estudia en este artículo se utiliza energía solar y una bomba de calor agua-agua como elementos que proporcionan la energía necesaria a todo el sistema. La energía solar es captada mediante acristalamientos activos ubicados en el exterior (HeatGlass). La transferencia de calor al interior del edificio se realiza mediante acristalamientos activos ubicados en el interior (RadiaGlass).

1.1 Descripción del edificio

El edificio que se ha estudiado es una vivienda unifamiliar ubicada en una zona de montaña. Los inviernos son muy fríos y los veranos son suaves, por lo que el problema de climatización se centra, sobre todo, en la producción de calor. En verano se puede llegar a una situación de confort con una correcta ventilación y la adecuada protección solar de los huecos de fachada. El proyecto contempla muros muy aislados en las orientaciones norte, este y oeste, así como en el suelo en contacto con el terreno. La fachada sur se abre con vidrios de baja emisividad que permiten el paso de la radiación solar durante el día en invierno y reducen las pérdidas de calor durante la noche.

Para lograr el confort interior en invierno se propone la utilización de energía solar mediante paneles de vidrio activo ubicados en la cubierta. La superficie de la cubierta es suficiente para cubrir las necesidades de calefacción durante gran parte del año. Para apoyar el sistema en momentos de mucha demanda de calefacción se utiliza una bomba de calor agua-agua. En los meses de verano, cuando la demanda de calefacción y de agua caliente sanitaria se reduce al mínimo, se disipa el exceso de calor captado por los paneles solares de cubierta en un depósito de agua enterrado que se integra en los cimientos de hormigón del edificio.

1.2 Esquema de principio y elementos del sistema

Dentro de un proyecto de arquitectura o de ingeniería, el documento que refleja y relaciona todos los sistemas que intervienen en la climatización de un edificio recibe el nombre de esquema de principio. Realizar un esquema de principio supone una primera abstracción con respecto a la realidad.

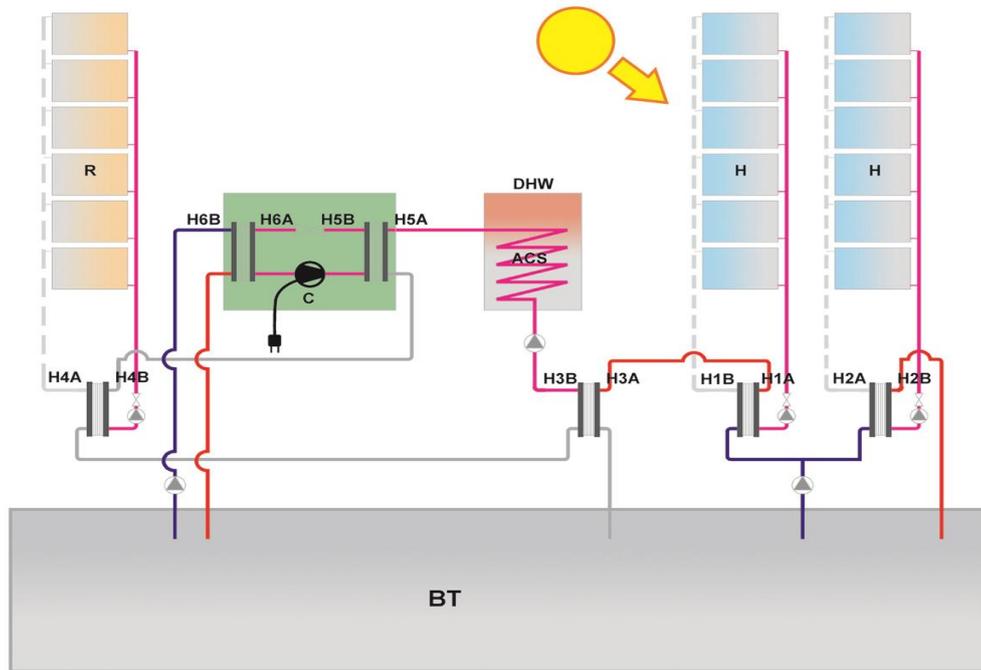


Figura 3. Esquema de principio de la climatización de la vivienda.

En este ejemplo las fuentes de energía son el sol y una bomba de calor agua-agua. Los vidrios activos de la cubierta (HeatGlass) captan el calor del sol y transfieren energía a través de intercambiadores de placas. Parte de esa energía es transferida al depósito de inercia. Otra parte se transfiere al depósito de agua caliente sanitaria. La bomba de calor actúa cuando la energía solar no es suficiente para llegar a la temperatura deseada. El calor del depósito de agua caliente sanitaria es transmitido a través de otro circuito y otro intercambiador de calor a los vidrios activos interiores (RadiaGlass) que ceden calor hacia el interior a través de su superficie y mediante convección.

Para definir la relación entre los distintos elementos del sistema, se recurre a la definición de los componentes y a una lista que los relaciona. En estas listas se distinguen los circuitos de fluidos (agua o aire) y los intercambios de energía a través de superficies en contacto.

Componentes:

Paneles de vidrio activo HeatGlass (H); Intercambiadores de calor de placas (H1A-H1B H2A-H2B, H3A-H3B y H4A-H4B); Interior (I); Exterior (E); Red eléctrica (R); Depósito de inercia (BT); Depósito de agua caliente sanitaria (DHW); Intercambiador de calor del depósito de agua caliente sanitaria (ACS); La bomba de calor se define por dos intercambiadores de calor (H5A-H5B y H6A-H6B) y un compresor (C).

Circuitos:

	CIRCUITO 1		CIRCUITO 2		CIRCUITO 3		CIRCUITO 4		
SOURCE	I	E	H	H1A	H	H2A	H1B	H3A	BT
TARGET	E	I	H1A	H	H2A	H	H3A	BT	H1B

	CIRCUITO 5		CIRCUITO 6		CIRCUITO 7		CIRCUITO 8		
SOURCE	H4B	R	H6B	BT	H	H2A	H5B	C	H6A
TARGET	R	H4B	BT	H6B	H2A	H	C	H6A	H5B

CIRCUITO 9				
SOURCE	H4A	H3B	ACS	H5A
TARGET	H3B	ACS	H5A	H4A

Interfaces:

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_10
SOURCE	H1A	H2A	H3A	H4A	H5A	H6A	ACS	W	E	R
TARGET	H1B	H2A	H3B	H4B	H5B	H6B	DHW	C	H	I

Con esta lista de relaciones entre componentes se elabora el siguiente esquema.

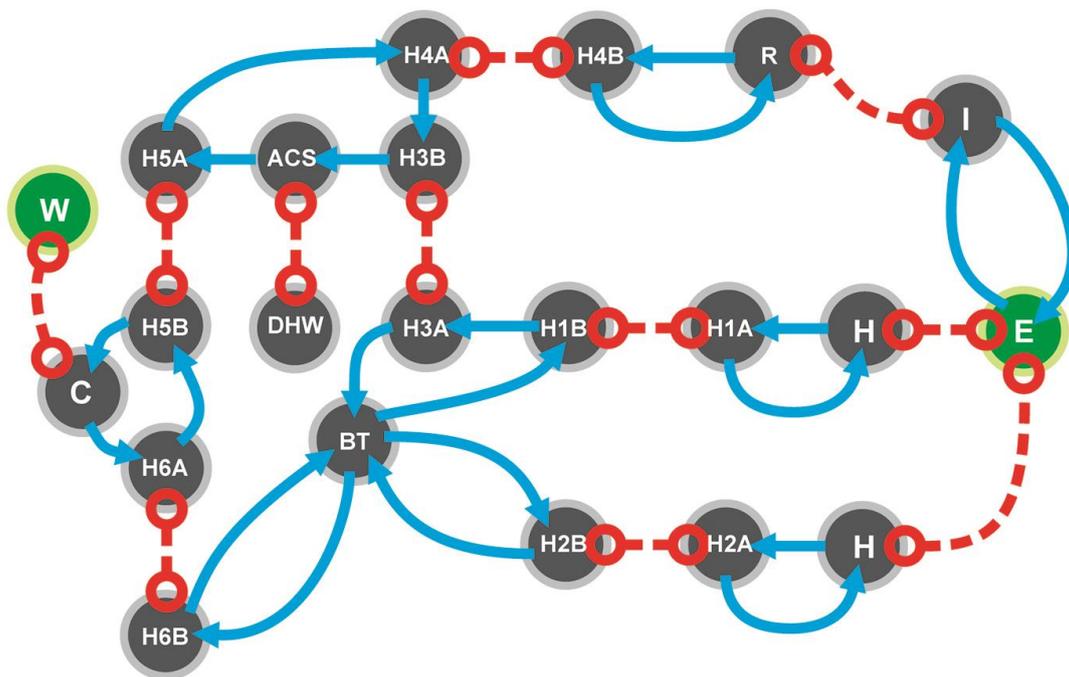


Figura 4. Explicación del sistema mediante grafos.

2. Simulación térmica del sistema de climatización

El objetivo de esta sección es componer todas las ecuaciones algebraicas o diferenciales de los elementos que constituyen el sistema de climatización del edificio para obtener el comportamiento global del sistema. La idea que subyace es crear una abstracción de programa del elemento particular del sistema de climatización. Así, todos los elementos o componentes del sistema tienen un conjunto de ecuaciones que se empaquetan en un vector de estado que contiene todos los grados de libertad del sistema completo. De esta manera, se tiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias con sus condiciones iniciales que constituyen un Problema de Cauchy. Mediante la llamada a una función que resuelve el problema de Cauchy, que no es objeto de este trabajo, se simula el sistema.

```
call Solution_Cauchy_Problem( Domain           = Time_Domain,
                             Initial_condition = IC_Building,
                             System_of_equations = Building_equations,
                             Outputs           = Building_graphs )
```

La clave reside ahora en crear una funcionalidad software que de forma automática a través de las conectividades de los diferentes componentes del sistema ensamble las ecuaciones de cada elemento y haga las conexiones hidráulicas de los diferentes elementos.

2.1 Definición de componentes

Desde el punto de vista de la programación, los componentes del sistema son cajas negras o sistemas abiertos caracterizados por una entrada y una salida y por una superficie que intercambia calor con otros componentes o con el medio exterior. Sin embargo, desde el punto de vista de las ecuaciones que lo gobiernan es importante conocer su naturaleza interna. Esta doble necesidad motiva considerar los componentes como objetos polimórficos para que el tratamiento software sea mucho más sencillo. Es decir, un depósito con agua se puede tratar de forma general como un sistema abierto genérico la hora de vincular su salida con la entrada de otro componente o como un depósito de agua con la particularidad de su funcionamiento. Se define un componente como el objeto siguiente:

```
type component
  integer :: variables
  type (connector) :: inlet(:), outlet(:)
  type (interface) :: interfaces(:)
  character (len=*) :: name
end type
```

Un componente está caracterizado por su número de grados de libertad o variables independientes, un conjunto de conectores de entrada, un conjunto de conectores de salida y un conjunto de interfaces que le permiten el intercambio de calor con el exterior u otros componentes.

```

type connector
    real, pointer :: T
    real, pointer :: m
end type

type interface
    real, pointer :: Q
end type

```

El sistema de climatización del edificio está formado por un conjunto de componentes polimórficas, un conjunto de circuitos y una lista para la conexión de las diferentes fronteras. Las diferentes componentes polimórficas pueden ser: depósitos de agua, ventanas IntelliGlass, intercambiadores de calor, etc.

```

type Building

    type (Polymorphic_Pointer), allocatable :: Components(:)
    type (arc_list), allocatable :: Circuits(:), Interfaces
    real, allocatable :: Q(:)

end type

type :: Polymorphic_Pointer
    class(*), pointer :: p
end type

type arc
    character(len=*) :: source, target
end type

type arc_list
    type (arc), allocatable :: name(:)
end type

```

Los diferentes circuitos que unen estas componentes pueden ser el circuito hidráulico primario o secundario, terciario, etc. A su vez, cada circuito se caracteriza por un conjunto de arcos que son parejas de nombres de vinculan componentes. Por último, la lista para la conexión de las fronteras de los componentes permite transferir calor de un circuito a otro. De esta manera, se puede definir cualquier sistema de climatización de un edificio a través de las componentes que lo conforman. Las vinculaciones entre las entradas y las salidas de las componentes están determinadas por los circuitos y las transferencias de calor entre los componentes están determinadas a través de la lista de conexión de fronteras.

2.2 Depósito de agua para la acumulación de energía

Un depósito de agua está caracterizado por una frontera que puede intercambiar calor con el exterior y por una entrada y por una salida que intercambian masa de agua. La temperatura no uniforme del agua en el interior del depósito y los procesos de mezcla térmica se rigen por la ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, si se considera que la temperatura del agua es uniforme, la temperatura del interior del depósito está gobernada por una ecuación diferencial

ordinaria de primer orden. Lo que es importante hacer notar es que, independiente mente del modelo matemático que se adopte para el depósito, la abstracción del simulador propuesto en este trabajo no cambia. Para el simulador un depósito es un componente adicional con un conjunto de N ecuaciones diferenciales ordinarias.

Con este modelo, el depósito se puede definir como la extensión de un componente. Es un objeto que hereda las propiedades y la forma de un componente.

```
type, extends(Component) :: Water_tank
  real, pointer :: T
  real :: Tdot
  real :: c = 4180
  real :: flow = 30 ! l/min
  real :: Volume = 15 ! m3
  real :: Surface = 20 ! m2
  real :: density = 1000 ! kg/m3
  real :: hext = 10 ! W/m2K
  contains
  procedure :: Constructor => Constructor_Water_tank
  procedure :: Equations => Equations_Water_tank
  procedure :: Ini => Ini_Water_tank

end type
```

El objeto Buffer_Tank está caracterizado por su temperatura T (única variable independiente), por todas las propiedades de un componente y por las propiedades específicas que lo definen: masa, calor específico,... Por otra parte, el depósito de agua incluye sus ecuaciones constitutivas así como sus condiciones iniciales.

2.3 Ventana activa con cámara de agua en circulación

La complejidad del modelo matemático para una ventana con una cámara de agua en circulación depende del grado de aproximación física que se quiera obtener. En el caso más simple la ventana se puede tratar como un sistema abierto que intercambia calor con el exterior mediante sus superficies de la delimitan y mediante un flujo convectivo asociado a su entrada y su salida. Así, la temperatura uniforme de la ventana considerada está gobernada, como en el caso del depósito, por una ecuación diferencial ordinaria de primer orden.

Como contraposición a este caso simplificado se podría simular de forma genérica la transferencia de calor que se produce en cada unas de las partes que constituyen la ventana: láminas de vidrio, cámara de agua t cámaras de aire. Así, los mecanismos de transferencia de calor son: radiación, conducción y convección. La ecuación de calor para las láminas de vidrio y las ecuaciones de Navier-Stokes para la cámara de agua y la cámara de aire gobiernan las evolución de las temperaturas de la ventana. Estas ecuaciones que constituyen un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales se deben completar con condiciones de contorno y condiciones iniciales que provienen de las diferentes capas. El problema planteado es de una dificultad extrema.

En el término medio entre estos dos modelos, se podría plantear un modelo más simple tanto para las cámaras de agua y de aire como para las láminas de vidrio. Debido a que la

cámara de aire tiene muy poca inercia térmica, ésta se modela mediante una ecuación algebraica que mediante un coeficiente de transferencia que vincula el calor que transporta la cámara desde un panel de vidrio al otro. Por otra parte, si se considera la temperatura del agua uniforme, la temperatura del agua de la cámara se gobierna por una ecuación diferencial ordinaria. En el caso de los paneles de vidrio se considera que la transferencia de calor es perpendicular al panel y su temperatura está gobernada por la ecuación del calor unidimensional no estacionaria. Aún en este modelo intermedio, la dificultad para simular una ventana aislada es grande. Si se piensa en la complejidad de un sistema completo de climatización de un edificio, se entiende que es necesario hacer un esfuerzo de abstracción para poder abordar el problema.

En este caso, la definición del tipo ventana activa es más complicado. Una ventana es la extensión de un componente que está formada por capas polimórficas de agua, aire o vidrio.

```

type, extends(Component) :: Active_Window

    type (Polymorphic_Pointer), pointer :: Layer(:)

    real, allocatable :: T_I(:)    ! temperatures at interfaces between layers
    real, allocatable :: alpha_I(:)! absorption at interfaces (PVB)

    type (Surface) :: S

contains

    procedure :: Constructor => Constructor_Active_window
    procedure :: Equations => Equations_Active_window
    procedure :: Ini => Ini_Active_window

end type

```

Además, la ventana activa incluye las ecuaciones de gobiernan la temperatura de la ventana. Estas ecuaciones se obtienen mediante la agrupación de las ecuaciones para cada una de las capas. Las ventanas activas que intervienen en el sistema son, en principio, diferentes entre sí. Sin embargo, el objeto definido anteriormente sirve para todas ellas. Incluso para el modelo simple elegido anteriormente para la ventana el problema no es sencillo. La ventana es un conjunto de capas polimórficas: vidrio, agua y aire. La determinación de la temperatura en cada una de las capas exige integrar al menos una ecuación diferencial con condiciones de contorno que dependen del resto de las capas. Para llevar a cabo este proceso, se plantean de forma genérica las ecuaciones de conservación para los contornos de todas las capas y el sistema resultante se resuelve mediante un Newton. Una vez determinados los valores de las temperaturas en las entrefases se pueden calcular los flujos de calor en los puntos interiores de cada una de las capas.

```

function Equations_Active_window( W )
    class (Active_window), target :: W

    ! ** Solve temperatures at interfaces i = 0...N, unknowns:
    call Newton( F_Interface, W % T_I )

```

```
! ** Energy balance for each layer
do i = 1, N layers
  select type ( A => W % Layer(i) % p )
    type is (Water_layer)
      Equations_active_window(:) = A % Equations( T_agua, ie)
    type is (Glass_layer)
      Equations_active_window(:) = A % Equations(ie)
    type is (Air_layer)
      Equations_active_window(:) = A % Equations()
  end select
end do

contains

function F_Interface(T_interface)

  Q(0, 1) = q_ext
  Q(N, 2) = q_int

  do i=1, N
    select type ( A => W % Layer(i) % p )
      type is (Glass_layer)
        Qb = A % Fluxes()
      type is (Water_layer)
        Qb = A % Fluxes(Inclination)
      type is (Air_layer)
        Qb = A % Fluxes(Inclination)
    end select
    Q(i-1,2) = Qb(1)
    Q(i,1) = Qb(2)
  end do

  F_Interface(:) = Q(:,1) - Q(:,2) + W % alpha_I(:) * ie
end function

end function
```

2.4 Intercambiador de calor de placas

Generalmente, la inercia térmica de un intercambiador de calor de placas es pequeña frente a la inercia térmica del sistema por lo que el conjunto de ecuaciones que gobiernan el proceso de intercambio de calor se pueden considerar estacionarias o cuasiestacionarias. Por otra parte, el diseño del intercambiador está muy vinculado a su funcionamiento y, en consecuencia, a su modelo matemático. La empresa que ha desarrollado el intercambiador de calor, como conocedor de su producto, ofrece un modelo simplificado para el mismo que constituye dos ecuaciones algebraicas no lineales que relacionan las entradas y las salidas del circuito primario y del circuito secundario.

2.5 Esquema de principio mediante la conexión de componentes

La idea consiste ahora en vincular componentes mediante el esquema de principio de la instalación térmica de climatización. Desde el punto de vista matemático, esas conexiones

constituyen un grafo. Los nodos o los vértices del grafo son las componentes y las aristas o arcos del grafo pueden ser o bien las tuberías hidráulicas que unen cada una de los elementos o componentes del esquema de principio o bien uniones virtuales entre componentes que simbolizan la transferencia de calor entre los diferentes componentes. De esta manera, el grafo está definido mediante un conjunto de sus componentes o nodos y mediante el conjunto tuberías o aristas que unen componentes. Se consideran todas las tuberías para vincular parejas de componentes. Una vez vinculadas todas las entradas con todas las salidas, queda vincular todas las fronteras o superficies de los componentes para indicar el flujo de calor entre los mismos. Así, un grafo puede representar el flujo de agua de un circuito cerrado y el flujo de calor entre las componentes viene representado por otro grafo superpuesto a este primero. Tanto las vinculaciones de entradas o salidas de los componentes como la vinculación entre las fronteras se puede hacer de forma genérica sin conocer si se trata de una ventana o se trata de un depósito.

En los siguientes pseudocódigos se muestra como se realizan estas vinculaciones mediante punteros. La temperatura de la entrada de un componente se apunta a la temperatura de salida otro componente. Cuando la temperatura de la salida cambia, la temperatura de la entrada cambia porque es la misma variable.

```

subroutine Connections(inlet, outlet, C)

  select type ( A => C(outlet) % p )
    class is (Component)
      select type ( B => C(inlet) % p )
        class is (Component)
          ! inlet of the component A points to outlet of B
          A % inlet % T => B % outlet % T
          A % inlet % m => B % outlet % m
        end select
      end select
    end select
end subroutine

```

De igual manera se realiza la vinculación entre las componentes que están en contacto mediante sus superficies e intercambian calor a través de las mismas.

Tanto la conexión entre las entradas y las salidas así como las conexiones entre las superficies de los diferentes componentes se realiza en la inicialización del problema una única vez. Estas conexiones garantizan la continuidad de temperaturas superficiales y temperaturas entrada/salida para las componentes que intervienen el sistema o edificación.

La simulación del problema completo consiste en integrar el problema de Cauchy o de condiciones iniciales que resulta de juntar todas las ecuaciones constitutivas del sistema. Un vez más este proceso se puede realizar de manera automática mediante el siguiente pseudocódigo.

```

subroutine Building_equations(t, U, F )

  B % Heat_fluxes_at_interfaces(t)

  do i=1, Nc

```

```

select type( A => B % Component(i) % p )
  class is (Component)
    select type( A => B % Component(i) % p )
      type is (Water_tank)           F(:) = A % Equations(t)
      type is (Active_window)       F(:) = A % Equations(t)
      type is (Air_Zone)             F(:) = A % Equations(t)
    end select
  end select
enddo
end subroutine

```

En primer lugar, se obtienen los flujos de calor entre las diferentes interfaces de las componentes del sistema que constituye un sistema de M ecuaciones donde M es el número de interfaces. Cada una de estas ecuaciones impone que el flujo por la derecha coincide con el flujo por la izquierda de la interfaz. Cada una de las componentes está acoplada con el resto a través de las condiciones de contorno que son los flujos de calor en las interfaces. En esta subrutina $U(t)$ representa el vector de estado del sistema y $F(U,t)$ su variación con respecto al tiempo. El problema de Cauchy así planteado es de dimensión N . Las variables independientes del sistema o grados de libertad son las variables independientes de cada uno de las componentes. En la inicialización, las variables independientes de cada componente se apuntan a una parte del vector de estado.

Finalmente, el resultado de la ecuaciones de cada una de las componentes se empaqueta en el vector columna $F(:)$ y el problema se lanza a un integrador temporal.

3. Conclusiones

Los sistemas de climatización de las edificaciones son cada día sistemas más complejos. El tratamiento matemático de los mismos exige entenderlos como sistemas termodinámicos formados por subsistemas abiertos. En este trabajo se ha definido un componente como un sistema abierto caracterizado por sus entradas, salidas y una superficie no permeable por la que se intercambia calor con otros componentes. Así, los diferentes subsistemas de un sistema de climatización se pueden considerar como componentes o sistemas abiertos. Los diferentes componentes intercambian energía con otras componentes mediante dos mecanismos bien diferenciados: (i) transporte de energía forzado mediante un fluido asociado a sus entradas y salidas y (ii) intercambio térmico a través de las fronteras de cada componente.

Se han definido arcos azules direccionales que unen diferentes componentes para indicar el mecanismo de transferencia (i) y arcos rojos no direccionales para indicar el mecanismo de transferencia (ii). De esta manera, se construye un grafo formado por los diferentes componentes que intervienen en el sistema y por los diferentes arcos azules y rojos.

Se ha mostrado que la introducción de los grafos en este tipo de sistemas de climatización tiene las siguientes ventajas:

1) permite explicar los sistemas de climatización de una forma mucho más rápida. Los caminos que puede llevar el calor en las transferencias de energía se hacen evidentes. En

consecuencia, la estrategia energética del sistema se consigue entender sin entrar en los mecanismos físicos de la transferencia de calor más complicados.

2) permite identificar en diseño errores en la topología del sistema. Bucles abiertos o caminos de transferencia de energía no usados.

3) permite simular instalaciones muy complejas sin necesidad de escribir un programa específico para ello. Se ha descrito un simulador basado en componentes polimórficas que permita determinar las transferencias de calor entre los componentes de un grafo genérico. Para simular una determinada instalación, el usuario tan solo tiene que introducir las listas de las componentes y las listas de los arcos que definen una instalación específica.

Referencias

- [1] BUILDINGS ENERGY DATA BOOK. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY.
<http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/>
- [2] DOCUMENTO BÁSICO HE. AHORRO DE ENERGÍA. Septiembre 2013. Ministerio de Fomento.
- [3] DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO DE 19 DE MAYO DE 2010 RELATIVA A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS.
- [4] HERNÁNDEZ, J.A., ZAMECNIK, M.A. *FORTRAN 95: Programación Multicapa para la Simulación de Sistemas Físicos*, Editorial ADI, Madrid, 2001.

Sobre los Autores:

Nombre: Juan Antonio Hernández Ramos

Correo Electrónico: juanantonio.hernandez@upm.es

Institución: Departamento de Matemática Aplicada y Estadística. E.T.S.I.Aeronáuticos. UPM. Madrid.

Nombre: Fernando del Ama Gonzalo

Correo Electrónico: ama.eps@ceu.es

Institución: Departamento de Arquitectura y Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad CEU San Pablo. Madrid