



# Proyecto Fin de Carrera

## **Desarrollo de herramientas de simulación de sistemas híbridos de generación de energía para una casa unifamiliar**

*Autor: Pedro Jorquera Ferrat*

*Director: Julien Heintz  
Chef de projets, CETIAT*

*Ponente: Jesús Guallar Paracuellos  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Universidad de Zaragoza*

**Escuela de Ingeniería y Arquitectura**

**INGENIERÍA QUÍMICA  
Zaragoza, diciembre 2013**

**CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES AÉRAULIQUES ET THERMIQUES**

Domaine Scientifique de la Doua - 25, avenue des Arts - BP 52042 - 69603 Villeurbanne Cedex - France  
Tél. +33 (0)4 72 44 49 00 - Fax. +33 (0)4 72 44 49 49 - [www.cetiat.fr](http://www.cetiat.fr) - Email : [commercial@cetiat.fr](mailto:commercial@cetiat.fr)  
Livraisons : Domaine Scientifique de la Doua - 54, avenue Niels Bohr - 69100 Villeurbanne  
Siret 775 686 967 00024 - Ape 7219 Z



## RESUMEN

### Resumen

#### **Desarrollo de herramientas de simulación de sistemas híbridos de generación de energía para una casa unifamiliar**

En un contexto en el cual la energía es cada vez más cara, los sistemas que permiten la calefacción, la producción de agua caliente sanitaria y la ventilación cuyo objetivo es reducir el consumo, toman más y más importancia. Es en esta situación que numerosos industriales buscan soluciones que mejoren el rendimiento de sus productos.

Este proyecto fin de carrera ha sido llevado a cabo en colaboración con CETIAT, centro técnico de estudios termodinámicos situado en Lyon, Francia. El objetivo principal es el de desarrollar tres herramientas independientes de simulación de tres sistemas de generación de energía: calderas híbridas, bombas de calor con colectores solares y aparatos multifunción. Para esto, una unidad de control ha sido creada utilizando técnicas de programación orientada a objetos, lo cual ha permitido generalizar los sistemas a controlar y así utilizar las mismas rutinas para cada uno de los aparatos simulados.

En este documento se presentan los diferentes sistemas objetivo, detallando su principio de funcionamiento y mencionando productos que se encuentran en el mercado francés. Posteriormente, se describen los conceptos aplicados para crear las herramientas de simulación en BOOST, el cual es utilizado por los clientes de CETIAT con propósitos de R&D.

Finalmente, se lleva a cabo un estudio comparativo de diferentes soluciones utilizando las herramientas desarrolladas en este proyecto. Este estudio demuestra que la integración de diferentes fuentes de energía, en particular la energía solar, junto con un sistema de control inteligente, es la clave para reducir el consumo de energía sin sacrificar el confort.

## ***AGRADECIMIENTOS***

### **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco al centro técnico CETIAT por haberme dado la oportunidad de desarrollarme como profesional en el ámbito de las energías y de la simulación.

Mencionar especialmente a Julien Heintz por su confianza y apoyo constante antes, durante y después del proyecto.

A mi director, Jesús Guallar, por su interés y ser un guía en todo momento.

En especial a mi familia y a mis amigos que gracias a su insistencia y persistencia he logrado llegar donde estoy hoy en día.

A todos vosotros.

Muchas gracias.

**TABLA DE CONTENIDOS**

Resumen .....	I
Agradecimientos.....	II
Índice de Figuras .....	V
Índice de Tablas .....	VII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Contexto del proyecto.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivos generales.....	2
1.2.2. Objetivos particulares .....	3
1.3. Alcance del proyecto .....	4
1.4. Contenido de la memoria.....	4
2. LOS SISTEMAS HÍBRIDOS .....	7
2.1. Caldera híbrida .....	7
2.1.1. Estudio de mercado.....	8
2.1.2. Principio de funcionamiento.....	9
2.2. Aparato Multifunción .....	12
2.2.1. Estudio de mercado.....	13
2.2.2. Principio de funcionamiento.....	14
2.3. Acoplamiento bomba de calor-colector solar.....	15
2.3.1. Estudio de mercado.....	16
2.3.2. Principio de funcionamiento.....	17
3. PROGRAMACIÓN .....	19
3.1. BOOST .....	19
3.1.1. Módulos y Metamódulos .....	19
3.1.2. Las alternativas a BOOST .....	22
3.1.3. La programación .....	22
3.2. Bases del modelo desarrollado .....	23
3.2.1. Definición de conceptos .....	23
3.2.2. Hipótesis .....	24
3.3. Abstracción del sistema.....	25
3.4. Descripción en detalle de las variables del vector de estado .....	27
3.5. Descripción de la estructura interna del módulo de control genérico .....	27
3.6. La configuración del sistema.....	28

---

4. LOS METAMÓDULOS .....	31
4.1. Caldera Híbrida – CHYBMS.....	32
4.1.1. Conexión de módulos .....	32
4.1.2. Datos de entrada .....	32
4.1.3. Datos de salida.....	34
4.2. Aparato Multifunción – MULTIF .....	34
4.2.1. Conexión de módulos .....	34
4.2.2. Datos de entrada .....	35
4.2.3. Datos de salida.....	36
4.3. Acoplamiento solar térmico-bomba de calor - SOLPAC.....	37
4.3.1. Conexión de módulos .....	37
4.3.2. Datos de entrada .....	38
4.3.3. Datos de salida.....	39
5. CASOS DE ESTUDIO - RESULTADOS .....	41
5.1. Caldera híbrida .....	41
5.2. Aparato Multifunción .....	43
5.3. Acoplamiento bomba de calor y colector solar .....	45
5.4. Comparación de diferentes generadores – cálculo anual .....	47
6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES .....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXO 1 - Árboles lógicos de control de Caldera Híbrida.....	53
ANEXO 2 - Descripción en detalle de las funciones de RGN13.....	57
ANEXO 3 - Datos de entrada para los casos de estudio .....	61
ANEXO 4 - Datos de entrada para las simulaciones anuales .....	65
ANEXO 5 - Ficha de evaluación de las prácticas .....	71

## Índice de Figuras

Figura 1 – fachada de CETIAT

Figura 2 – esquema de una caldera híbrida acoplada a un tanque de agua caliente sanitaria (AFS: agua fría sanitaria).

Figura 3 – calderas híbridas disponibles en el mercado. Fuentes: ELM LEBLANC a la izquierda y ATLANTIC a la derecha.

Figura 4 – esquema de bivalencia según temperatura exterior

Figura 5 – cálculo de la ley de agua

Figura 6 – esquema de un Aparato multifunción [5]

Figura 7 – aparato multifunción disponible en el mercado. a) Recuperador de calor, b) controlador, c) bomba de calor, d) aparato completo. Fuente: Aldes.

Figura 8 – esquema de un aparato híbrido de bomba de calor y colector solar

Figura 9 – componentes principales de un acoplamiento bomba de calor – colecto solar (colector solar, bomba de calor, tanque de agua). Fuente: Sonnenkraft. Producto: Sol+

Figura 10 – captura de pantalla de la interfaz gráfica de un metamódulo en BOOST

Figura 11 – conexión entre el tanque de agua caliente y el módulo de control.

Figura 12 – representación del proceso de abstracción de un aparato

Figura 13 – representación esquemática de un sistema

Figura 14 – metamódulo de Caldera Híbrida

Figura 15 – parámetros de entrada de caracterización del control

Figura 16 – características de la bivalencia

Figura 17 – características de la producción de ACS

Figura 18 – principales variables de salida del módulo de control genérico

Figura 19 – metamódulo de Aparato Multifunción

Figura 20 – parámetros de entrada de caracterización del control

Figura 21 – datos para el control de la bomba de calor

Figura 22 – características en modo calefacción

Figura 23 – principales variables de salida del módulo de control genérico en un aparato multifunción

Figura 24 – metamódulo de Bomba de Calor Solar Híbrida

Figura 25 – metamódulo de colector solar con tanque de ACS

Figura 26 – parámetros de elección de generador

Figura 27 – características del modo ACS

Figura 28 – características en modo calefacción

Figura 29 – simulación de un día en modo doble servicio

Figura 30 – leyenda de las curvas de la Figura 29

Figura 31 – simulación de aparato multifunción en modo doble servicio

Figura 32 – leyenda de las curvas de la Figura 31

Figura 34 – simulación de un día de una bomba de calor solar híbrida

Figura 35 – leyenda de las curvas de la Figura 34

Figura 36 – metamódulos desarrollados en este PFC

## Índice de Tablas

Tabla 1 – módulos unitarios desarrollados en BOOST

Tabla 2 – componentes del vector de estado de un sistema

Tabla 3 – componentes del vector de estado de una línea

Tabla 4 – traducción de los intitulados de los módulos

Tabla 5 – balance de energía del sistema y COP de la bomba de calor

Tabla 6 – balance de energía del sistema y COP de la bomba de calor en modo calefacción y ACS

Tabla 7 – balance de energía del sistema y COP de la bomba de calor en modo calefacción y ACS

Tabla 8 – resultados de simulaciones anuales de diferentes configuraciones

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología disponible para cubrir las necesidades energéticas del sector residencial está tomando, cada vez más acentuadamente, la dirección hacia aparatos que combinan bombas de calor de baja potencia (2 a 5 kW) con otros tipos de generadores, tal y como captadores solares, resistencias eléctricas o calderas de diferentes tipos.

La principal notoriedad de estos aparatos híbridos es la existencia de un sistema de control único e inteligente capaz de seleccionar el generador de mayor rendimiento según las condiciones de funcionamiento.

### *1.1. Contexto del proyecto*

Los aparatos híbridos capaces de cubrir las necesidades energéticas de una casa pueden permitir varias funciones, como por ejemplo calefacción, refrigeración, ventilación y/o producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS). Dada la corta historia de comercialización de estos productos, las diferentes combinaciones de configuraciones y características posibles y dado el constante desarrollo de la cada vez más estricta reglamentación térmica, se está llevando a cabo un gran esfuerzo para obtener los productos de mayor rendimiento y competitividad.

Con esto en mente, los constructores y productores de estos aparatos tienen dos vías posibles para la mejora de sus productos: realizar ensayos en laboratorio o recurrir a la simulación. Los ensayos en laboratorio, bajo condiciones controladas y/o próximas a la realidad, permiten obtener los mejores resultados en cuanto a cantidad, calidad y aproximación a la realidad de los resultados. No obstante, estos ensayos, debido a la enorme cantidad de parámetros a controlar y medir, a la cantidad de técnicos involucrados y a la duración de los ensayos, resultan en una factura bastante elevada para el fabricante.

En contraste, la simulación permite obtener resultados próximos a la realidad si el modelo utilizado es suficientemente correcto. Además, su coste se reduce al coste de la persona o grupo de personas a cargo del estudio, el cual, normalmente, es ampliamente inferior al incurrido durante los ensayos.

Es en este contexto que se ha realizado el presente Proyecto Fin de Carrera en colaboración con CETIAT (ver Figura 1). Esta empresa se sitúa en Lyon, Francia, y se especializa en estudios termodinámicos y meteorológicos. Debido a su calidad de Centro Técnico Industrial, una gran parte de su presupuesto está constituido por un impuesto que la industria paga al gobierno francés. De esta manera, las empresas de la industria (*Ressortissants* de CETIAT) se organizan en Grupos de Trabajo (GT) del sector de su interés y tienen la posibilidad de solicitar que ciertos estudios se efectúen en las instancias de CETIAT. Así pues, este PFC se

lleva a cabo dentro del GT Sistemas Multi-Energía (GT-SME), en la línea de trabajo de Simulación de Sistemas.



Figura 1 – fachada de CETIAT

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivos generales

Entre los puntos de interés del GT-SME se puede destacar:

- Desarrollar sistemas de generación de energía más respetuosos con el medioambiente,
- Cumplir con la reglamentación térmica (tanto francesa como europea) y
- Comercializar los productos más llamativos tanto por economía como por competitividad

Con esto en mente, el GT-SME busca desarrollar una herramienta de simulación en el programa BOOST (descrito en detalle en la sección 3.1) que le permita predecir el funcionamiento y el rendimiento de sistemas de climatización, y, de esta forma, crear una herramienta de trabajo que ayude a reducir los costes de desarrollo de aparatos de producción de energía al disminuir el número de ensayos de laboratorio necesarios.

En consecuencia, el objetivo de este proyecto es crear y poner a punto una herramienta multifuncional que permita simular y predecir el funcionamiento de una numerosa gama de productos bajo condiciones reales, para poder estudiar y optimizar su rendimiento.

Más concretamente, se desarrollarán tres herramientas de simulación: caldera híbrida, asociación bomba de calor-energía solar y aparatos multifunción. Estos tres sistemas, descritos en detalle en el bloque 2, tienen en común la existencia de una bomba de calor eléctrica que permite aumentar sensiblemente el rendimiento global del aparato. Estas herramientas deben permitir la predicción de la evolución de la respuesta del sistema segundo a segundo en períodos que pueden ir de unos minutos a un año.

### 1.2.2. Objetivos particulares

Las herramientas a desarrollar para cada uno de los sistemas híbridos son parte de proyectos independientes llevados a cabo en el GT-SME, con lo cual los objetivos para cada uno de ellos son ligeramente diferentes.

Para las calderas híbridas se busca:

- Desarrollar una herramienta de simulación de calderas híbridas que permita estudiar el comportamiento del sistema en modo calefacción, modo producción de ACS (acumulación e instantáneo) y modo doble servicio (calefacción y ACS).
- Realizar un caso de estudio para observar la evolución de las curvas de temperatura y potencia de cada uno de los generadores,
- Realizar un caso de estudio anual para observar parámetros como: confort, energía consumida, rendimiento de la instalación,....

En cuanto a los aparatos multifunción, se busca:

- Crear y poner a punto una herramienta de simulación de aparatos multifunción que integre una bomba de calor para producción de ACS y calefacción, dos resistencias eléctricas y un tanque de acumulación de ACS,
- Tomar en cuenta las características y opciones de regulación aportadas por los miembros del GT-SME durante las reuniones del grupo llevadas a cabo a lo largo del 2013.

Con respecto a los acoplamientos bomba de calor – colector solar térmico, los objetivos son:

- Crear una herramienta de simulación que permita estudiar el rendimiento de diferentes configuraciones tales como calefacción por bomba de calor, calefacción por tanque de acumulación, ...
- Comprobar que el consumo de energía se aproxima a la realidad y que el balance interno de energía se cumple,
- Realizar un cálculo anual para observar diferentes indicadores del funcionamiento del sistema

Sin embargo, aunque estos tres proyectos son independientes entre sí, están unidos por un proyecto en común, el cual es el desarrollo de un sistema de control y regulación genérico y universal. Para este proyecto, los objetivos particulares son:

- Desarrollar una metodología que permita adaptar el código fuente a cada caso particular de generador de energía,
- Adaptar el sistema de regulación a los tres proyectos del GT-SME.

### ***1.3. Alcance del proyecto***

Durante los últimos años, los ingenieros de CETIAT han desarrollado en BOOST modelos de simulación de diferentes componentes o sistemas, como bombas de calor, tanques de agua o calderas. Sin embargo, con el objetivo de simular sistemas híbridos, surge la necesidad de desarrollar un sistema de control inteligente para determinar el generador necesario en función de la situación y de las características del sistema.

En adición, CETIAT ha comprobado que el desarrollo de sistemas de control o regulación consume demasiados recursos ya que con cada nuevo proyecto de simulación, por simple que fuera el sistema, un nuevo sistema de regulación tenía que ser desarrollado para cumplir con las características propias de cada producto. Por esto se decidió que, además de desarrollar un sistema de regulación de sistemas híbridos, éste fuera genérico y que pudiera ser utilizado en cualquier otra situación fuera de los tres sistemas objetivo.

De esta forma, para crear el sistema de regulación no sólo es necesario conocer en detalle el comportamiento de los sistemas objetivo, sino también recurrir a técnicas de programación que permitan abstraer el problema para poder generalizarlo y así aplicar una solución válida para cualquier situación.

Una vez desarrollado el módulo de regulación, los diferentes componentes pueden ser conectados entre sí. No obstante, estas herramientas de simulación tienen fines de R&D, con lo cual será necesario prever en el propio sistema de control la posibilidad de simular un extenso abanico de particularidades de los sistemas disponibles en el mercado o que puedan existir.

### ***1.4. Contenido de la memoria***

Este documento presenta el trabajo realizado durante el Proyecto Fin de Carrera realizado en colaboración con CETIAT.

En el capítulo 2 se estudian los tres sistemas objetivo. Para cada uno de estos sistemas, se presenta la siguiente información:

- En primer lugar, se realiza un breve resumen del sistema: su estructura y componentes,
- En segundo lugar, se realiza un estudio de mercado para definir los productos disponibles,
- En tercer lugar, se describen los principios de funcionamiento en los tres modos de producción de energía (calefacción ACS y doble servicio)

En el capítulo 3 se describe en líneas generales el funcionamiento del programa de simulación BOOST utilizado para desarrollar las herramientas de simulación. Además, se detallan las técnicas de programación utilizadas, así como los conceptos claves sobre los cuales este

---

trabajo se apoya para la creación del sistema de control genérico, el cual es utilizado en el conjunto de sistemas objetivo.

En el capítulo 4, las herramientas de simulación desarrolladas son presentadas. Se expone el esquema de conexión de los diferentes módulos, se presentan algunos de los datos de entrada del módulo de control genérico aplicado a cada caso y, finalmente, se explican ciertos parámetros de salida que permiten controlar el resto de sistemas.

En el capítulo 5 se realizan casos de estudios. En primer lugar, para cada metamódulo se realiza una simulación de un día en modo doble servicio para describir el funcionamiento de la herramienta y el tipo de curvas que se obtiene. En segundo lugar, se realiza una serie de simulaciones anuales para comparar diferentes soluciones de producción de energía.

El ANEXO 1 - presenta los árboles lógicos de control que se aplican para la caldera híbrida.

El ANEXO 2 - explica en detalle las funciones implementadas en el módulo de regulación genérica.

El ANEXO 3 - detalla los datos de entrada utilizados para la realización de los casos de estudio presentados en las secciones 5.1, 5.2 y 5.3.

El ANEXO 4 - detalla los datos de entrada utilizados para las simulaciones anuales presentadas en la sección 5.4.

El ANEXO 5 - constituye la ficha de evaluación de prácticas firmada por el tutor en la empresa.



## 2. LOS SISTEMAS HÍBRIDOS

En esta sección se describe en líneas generales el funcionamiento de cada uno de los sistemas objetivo. Esta información es complementada con la presentación de dos ejemplos de sistemas que se encuentran en el mercado francés. Finalmente, se presentan los aspectos que permiten controlar estos sistemas en cada uno de los modos de funcionamiento.

### 2.1. Caldera híbrida

Según[1], se define una Caldera Híbrida como aquel sistema de calefacción y de producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) compuesto de:

- Una caldera a condensación a combustibles líquidos o gaseosos,
- Una bomba de calor (BC) eléctrica aire exterior/agua, que tenga una potencia nominal útil inferior a 5 kW,
- Un sistema de regulación que permita la comunicación entre ambos generadores en función del rendimiento en energía primaria.

Es decir, una caldera híbrida es un sistema que combina una caldera (normalmente de gran potencia) con una bomba de calor (ver Figura 2) de pequeña potencia, siendo el conjunto controlado por un sistema de regulación en función del rendimiento en energía primaria. Este último punto hace referencia al rendimiento de la bomba de calor, también denominado COP.

El COP se calcula normalmente en energía final. La energía final es aquella que es utilizada por el consumidor final luego de transformaciones a partir de la energía primaria, mientras que la energía primaria es la energía en su forma bruta tal y como se encuentra en la naturaleza [2]. Es decir, la energía final hace referencia a la electricidad mientras que la energía primaria hace referencia al gas.

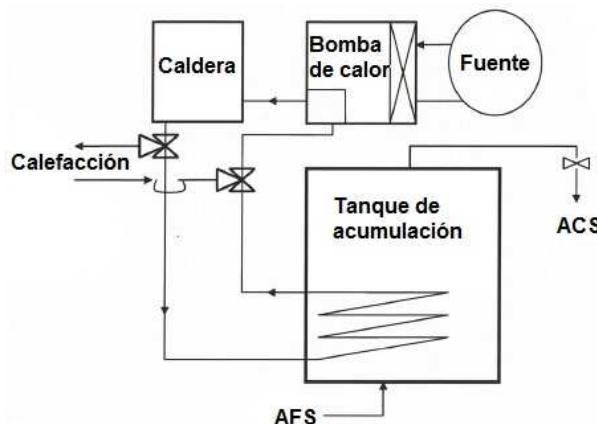


Figura 2 – esquema de una caldera híbrida acoplada a un tanque de agua caliente sanitaria (AFS: agua fría sanitaria).

El sistema de regulación, para determinar el generador que ha de funcionar, debe comparar el rendimiento de cada uno de los generadores, los cuales han de estar expresados en la misma base: COP en energía primaria. La transformación de COP en energía final en energía primaria se realiza mediante el coeficiente de energía primaria. Este coeficiente de conversión tiene en cuenta el hecho que una fuente de energía primaria tendría que atravesar muchas transformaciones y ser transportada para poder ser consumida como energía final por el consumidor. En Francia, el coeficiente de conversión de energía final (electricidad) en energía primaria (gas) es de 2.58 [3].

Por otra parte, la bomba de calor es un componente fundamental en la mayoría de los aparatos híbridos. Su importancia recae en el hecho que permite generar más energía de la que consume: si, por ejemplo, una bomba de calor tiene un COP de 3, por cada kWh de electricidad que consuma, se obtendrán 3kWh de efecto útil<sup>1</sup>.

### 2.1.1. Estudio de mercado

Un estudio de mercado de calderas híbridas ha sido llevado a cabo por los ingenieros de CETIAT. Este apartado busca resumir los datos más comunes de las calderas híbridas que se pueden encontrar en el mercado.

Las características técnicas de las calderas híbridas son:

- Funciones aseguradas: calefacción, ACS y ventilación (ciertos productos),
- Potencia térmica de la bomba de calor: 2 a 10 kW (con algunos productos hasta 16 kW)<sup>2</sup>,
- COP a 7/35°C comprendido entre 3.4 y 4,
- Tecnología del compresor de la bomba de calor: Todo o Nada (0 o 100% de la potencia del compresor) o *Inverter* (Modulación de la potencia del compresor es posible),
- Caldera gas a condensación,
- Funcionamiento Alternado o en Simultáneo (en serie) de la caldera y la bomba de calor,
- Producción de agua caliente sanitaria: en Instantáneo por medio de la caldera o en Acumulación con precalentamiento por la bomba de calor,

---

<sup>1</sup>Este ejemplo es válido cuando la PAC trabaja en las condiciones nominales de temperatura de fuente fría y fuente caliente.

<sup>2</sup>Según la normativa francesa [1], sólo los aparatos cuyas bombas de calor tienen una potencia nominal de menos de 5 kW pueden ser denominados como “calderas híbridas”.

- Regulación según criterios de confort (temperatura interior de la vivienda, temperatura de salida del agua), criterios energéticos (COP de la bomba de calor, temperatura exterior por debajo de la cual se degrada el COP, consumo de energía primaria), criterios económicos (coste medio de energías, coste de la electricidad en tarifa normal o nocturna).
- Rango de precios: a partir de 4000€

La Figura 3 muestra dos calderas híbridas del mercado francés.



*Figura 3 – calderas híbridas disponibles en el mercado. Fuentes: ELM LEBLANC a la izquierda y ATLANTIC a la derecha.*

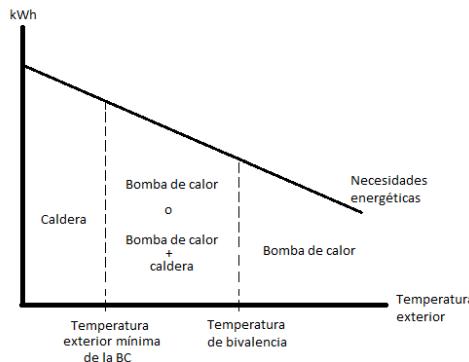
### 2.1.2. Principio de funcionamiento

El funcionamiento de una caldera híbrida depende principalmente del modo de producción de energía: calefacción, producción de ACS o doble servicio (calefacción y ACS). Otro factor influyente es la arquitectura del sistema de producción de ACS: acumulación (mediante tanque) o en instantáneo (intercambiador). Finalmente, un parámetro influyente es el principio de regulación.

En la definición de caldera híbrida[1], se tiene en cuenta únicamente el COP de la bomba de calor. Sin embargo, los principios de control de los productos que se encuentran en el mercado y que se implementarán en el módulo de regulación son:

- Coste de la energía: si el cociente entre el COP de la bomba de calor y el rendimiento de la caldera expresado en PCS es superior al cociente entre el coste del kWh eléctrico y el kWh de gas, entonces la bomba de calor puede funcionar.
- COP en energía primaria: si el COP de la bomba de calor transformado en energía primaria (COP/2.58) es superior a la unidad, entonces la bomba de calor puede funcionar.
- Bivalencia clásica: se definen dos umbrales de temperatura exterior que delimitan las zonas de funcionamiento de la BC, BC+caldera o caldera. Como se puede ver en la Figura 4, si la temperatura exterior es superior a la temperatura de bivalencia, la BC

puede proporcionar toda la energía. Si la temperatura se encuentra entre la temperatura de bivalencia y la temperatura mínima de la BC, las necesidades de energía serán cubiertas por la BC y la caldera en serie o alternadas. Finalmente, si la temperatura es menor que la temperatura mínima, las necesidades de energía son cubiertas por la caldera.



*Figura 4 – esquema de bivalencia según temperatura exterior*

Ver el ANEXO 1 - para conocer más en detalle el procedimiento de control de una caldera híbrida.

#### 2.1.2.1. Modo calefacción

En modo calefacción, el módulo de regulación comprueba que la temperatura de la vivienda se encuentre sobre la consigna. Para asegurar esto, la caldera híbrida puede arrancar la bomba de calor (BC) y/o la caldera, siendo la bomba de calor el generador de mayor prioridad. La condición de arranque depende del principio de control.

El caudal de la caldera híbrida que alimenta al sistema de calefacción queda determinado en función del estado de la BC y de la caldera. Además, la temperatura de consigna a la salida de la caldera viene determinada por la Ley de Agua (ver Figura 1), la cual es una ecuación lineal que permite calcular la temperatura de consigna del flujo a la entrada del emisor de la vivienda. Esta ecuación tiene en cuenta la temperatura exterior, la cual es corregida mediante la máxima y la mínima temperatura de entrada a los emisores y la mínima temperatura exterior.

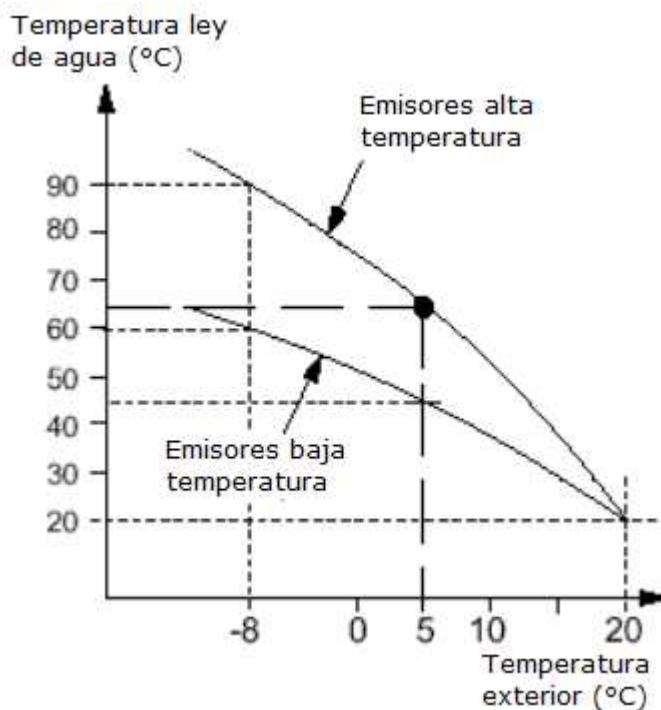


Figura 5 – cálculo de la ley de agua

#### 2.1.2.2. Modo producción de ACS

Dos formas de producción de agua caliente sanitaria han sido estudiadas en este proyecto: producción instantánea y acumulación.

En una caldera híbrida, la producción instantánea de ACS se lleva a cabo normalmente por medio de la caldera y un intercambiador de calor externo. El intercambiador de calor externo es necesario ya que no se debe mezclar el agua del circuito primario (calefacción) con la producción de ACS. En algunas configuraciones, la bomba de calor puede precalentar el caudal que entra en la caldera. Sin embargo, esta solución es, normalmente, poco eficiente.

La producción de ACS por acumulación se realiza mediante un tanque de unos 100-300 litros de volumen. La bomba de calor puede intentar cubrir las necesidades de ACS, pero normalmente su potencia no es suficiente, con lo cual la caldera proporciona las calorías restantes.

#### 2.1.2.3. Modo doble servicio

En modo doble servicio, la caldera híbrida intentará cubrir tanto las necesidades de calefacción como de ACS cuando éstas se produzcan.

Sin embargo, la producción de ACS es prioritaria, es decir, si una demanda simultánea de ACS y calefacción se produce, el sistema intentará proporcionar las calorías necesarias para calentar el agua sanitaria, dejando en un segundo plano las necesidades de calefacción.

No obstante a lo anterior, existen productos que permiten ambos servicios en paralelo. En este caso, la bomba de calor funciona en modo calefacción mientras que la caldera se encarga del ACS.

## 2.2. Aparato Multifunción

Un Aparato Multifunción es aquel sistema que permite cubrir, además de calefacción y producción de ACS, la ventilación y la refrigeración. Un Aparato Multifunción está compuesto por, al menos, una bomba de calor, la cual está acompañada, normalmente, de resistencias eléctricas de apoyo, tanto para la producción de ACS por acumulación (tanque) como de calefacción (ver Figura 6).

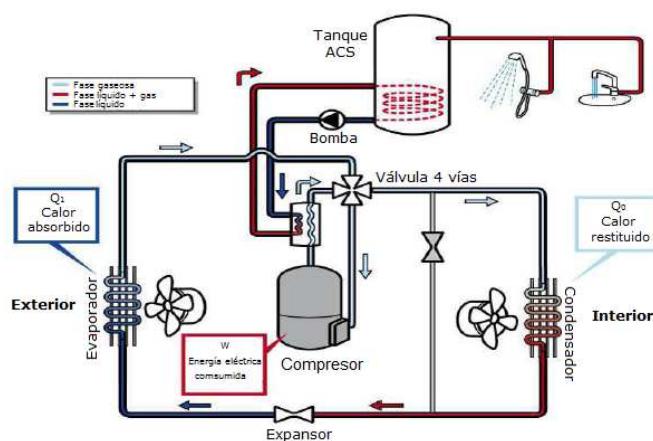


Figura 6 – esquema de un Aparato multifunción [5]

Estos sistemas han sido concebidos en vista de la evolución actual del consumo energético de las casas y edificios. De hecho, las construcciones nuevas hacen cada vez más hincapié en la disminución del consumo energético por medio de la disminución de las pérdidas de energía así como el favoritismo hacia los aportes gratuitos de energía (utilización de electrodomésticos, aportes solares). Esto conlleva no sólo la reducción de las necesidades de energía, sino que incluso hace necesario a veces el enfriamiento de la casa.

En Francia, se pueden utilizar tres etiquetas para caracterizar estos inmuebles de alta eficacia energética [6]:

- Casas de Bajo Consumo energético (BBC por sus siglas en francés, *Bâtiment de Basse Consommation*): consumo energético total de 50 kWhep/m<sup>2</sup> de SHON y año (kWhep: kWh de energía primaria como definido en la RT2012 [4]; SHON: superficie habitable) y ventilación de doble flujo de 80% de rendimiento,
- Casas *Effinergie*: consumo energético total de 35 kWhep/m<sup>2</sup> de SHON·año y ventilación por doble flujo de rendimiento 90%,

- Casas pasivas: consumo energético total de 15 kWh/m<sup>2</sup> de SHON·año y ventilación por doble flujo de 90% de rendimiento acoplado a un pozo canadiense<sup>3</sup>.

### 2.2.1. Estudio de mercado

Un estudio de mercado de Aparatos Multifunción ha sido llevado a cabo por los ingenieros de CETIAT en 2011. Este apartado busca resumir las características principales, los rendimientos y las estrategias de regulación de las funciones de calefacción y de producción de ACS de los productos que se pueden encontrar en el mercado.

- Funciones aseguradas: producción de ACS, calefacción, ventilación y refrigeración,
- Potencia térmica de la bomba de calor: 1 a 1.8 kW en calefacción, 1.5k a 2.1kW en ACS,
- Bomba de calor sobre el aire extraído con condensador en serie o en paralelo<sup>4</sup>: aire/aire para calefacción y aire/agua para ACS,
- COP comprendido entre 3.4 y 5,
- Tecnología del compresor de la bomba de calor: Todo o Nada (0 o 100% de la potencia del compresor) o *Inverter* (Modulación de la potencia del compresor es posible),
- Recuperador de calor: intercambiador de calor aire/aire que permite recuperar las calorías del aire extraído por ventilación para aportarlas al flujo de aire exterior que será insuflado en la vivienda. Rendimiento de 78 a 93%,
- Tanque de acumulación de 200 a 300 litros de volumen, calentado por la bomba de calor y una resistencia eléctrica sumergida en el tanque de 2kW,
- Calefacción por vector aire: bomba de calor aire/aire complementada con una resistencia eléctrica en el conducto de aire caliente,
- Caudal de ventilación de 50 a 300m<sup>3</sup>/h,
- Potencia absorbida por los ventiladores: 100W,
- Posibilidad de conectar un pozo canadiense para precalentar el aire caliente o un colector solar para alimentar el tanque de acumulación<sup>5</sup>,
- Rango de precios: 12000€,
- Peso del aparato: 140 a 260kg.

La Figura 7 muestra un aparato multifunción disponible en del mercado francés.

<sup>3</sup>Un pozo canadiense [7] consiste en una red de canalizaciones situada horizontalmente en el suelo antes que entre en un edificio para precalentarlo en invierno. El efecto inverso se obtiene en verano y se denomina pozo provenzal.

<sup>4</sup>En este PFC sólo se ha tenido en cuenta el condensador en serie y alternado

<sup>5</sup>En la simulación de Aparatos Multifunción no se han tenido en cuenta estos dispositivos



Figura 7 – aparato multifunción disponible en el mercado. a) Recuperador de calor, b) controlador, c) bomba de calor, d) aparato completo. Fuente: Aldes.

### 2.2.2. Principio de funcionamiento

Un aparato multifunción se encarga de la calefacción, la producción de ACS, la ventilación y, eventualmente, la refrigeración de la vivienda<sup>6</sup>. El control de los diferentes generadores depende del modo de funcionamiento del aparato. El sistema intentará arrancar la bomba de calor en prioridad cuando las condiciones exteriores y de funcionamiento sean favorables.

#### 2.2.2.1. Ventilación

Las normas estipulan que la ventilación ha de ser constante durante todo el día, incluso si la unidad se encuentra produciendo ACS: la renovación del aire debe ser suficiente del punto de vista de la higiene, pero tiene que ser la mínima para limitar las pérdidas térmicas [9].

De esta forma, para reducir al máximo las pérdidas de energía, un aparato multifunción está normalmente dotado de un recuperador de energía del aire extraído. El aire que se extrae de la casa es llevado a un intercambiador de calor donde cede sus calorías al flujo de aire frío exterior que, posteriormente, es inyectado en la vivienda.

#### 2.2.2.2. Calefacción

Si la temperatura del aire de la casa es inferior a la consigna (19°C según la RT2012 [8]) entonces la bomba de calor funciona para calentar el aire de ventilación. Si al cabo de un tiempo la temperatura del edificio sigue estando por debajo de la consigna entonces se activa un modo de funcionamiento especial llamado modo Boost: el caudal de ventilación es aumentado y parte del aire extraído del edificio es reciclado al interior del mismo pasando

<sup>6</sup>Para el desarrollo actual de este proyecto, la opción de refrigeración no ha sido tomada en cuenta.

---

antes por la bomba de calor. Este aumento de caudal permite aumentar la potencia proporcionada por la bomba de calor y así la temperatura de ventilación. Si al cabo de un determinado tiempo las necesidades de calefacción aún no son cubiertas, entonces la resistencia eléctrica es arrancada.

#### 2.2.2.3.ACS

Debido a la baja potencia de los generadores de energía, el sistema que se utiliza para generar el agua caliente sanitaria es un tanque de acumulación. Dos sondas permiten controlar los dos generadores: la sonda de la resistencia eléctrica, situada a pocos centímetros de la resistencia, y la sonda del intercambiador de calor, cuya posición puede variar en función del tipo de intercambiador.

Cada sonda tiene asociada una temperatura de consigna y una histéresis. Si la temperatura leída por la sonda es inferior a la consigna menos la histéresis entonces el generador correspondiente a la sonda se pone en marcha. El o los generadores se detendrán una vez que la sonda de agua caliente sanitaria alcance la temperatura de consigna del agua caliente sanitaria.

#### 2.2.2.4.Doble servicio

El sistema puede generar calor paralelamente tanto para la generación de ACS como para calefacción. Sin embargo, la bomba de calor funcionará con prioridad en modo calefacción, debido a que los tiempos de calefacción por vector aire son considerablemente más cortos que en calefacción mediante vector agua. De esta forma, un confort mínimo de ACS es asegurado por la resistencia eléctrica mientras que la bomba de calor funciona en calefacción.

### ***2.3.Acoplamiento bomba de calor-colector solar***

Este tipo de sistema híbrido se sirve de una bomba de calor que es utilizada como un generador de apoyo a un colector solar térmico para calentar el agua de un depósito de agua que suministra las necesidades de agua caliente sanitaria de la casa. La Figura 8 muestra un esquema de estos aparatos.

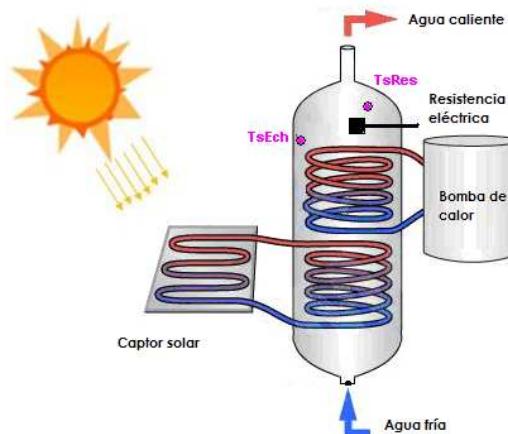


Figura 8 – esquema de un aparato híbrido de bomba de calor y colector solar

El colector solar transfiere las calorías recibidas del sol a un volumen de agua, elevando su temperatura. Si la temperatura de este volumen es superior a la temperatura del depósito de agua caliente entonces la bomba de recirculación se activa permitiendo el intercambio de energía entre el agua calentada por el colector y el agua almacenada en el tanque. Si la energía aportada por el sol no es suficiente para alcanzar el mínimo de confort entonces la bomba de calor se pone en marcha para proporcionar las calorías necesarias para el buen funcionamiento del sistema.

### 2.3.1. Estudio de mercado

Este apartado busca resumir las características principales de los sistemas presentes en el mercado que acoplan bombas de calor y colectores solares térmicos.

- Funciones aseguradas: producción de ACS y calefacción,
- Potencia térmica de la bomba de calor: 4.5 a 12kW,
- Bomba de calor sobre el aire extraído,
- COP comprendido entre 3.5 y 5,
- Tecnología del compresor de la bomba de calor: Todo o Nada (0 o 100% de la potencia del compresor) o *Inverter* (Modulación de la potencia del compresor es posible),
- Paneles solares térmicos de rendimiento 80-85%,
- Superficie por panel: 2 a 3m<sup>2</sup>,
- Peso por panel: 30 a 40kg,
- Volumen de agua de un colector: 1 a 2 litros,
- Caudal nominal: 20 a 50 litros por hora y metro cuadrado de panel,
- Tanque de acumulación de 300 a 1000 litros de volumen, calentado por los paneles solares, la bomba de calor y una resistencia eléctrica sumergida en el tanque de 2-6kW,

- Calefacción por vector agua: mediante bomba de calor aire/agua complementada con una resistencia eléctrica en salida de la bomba de calor o mediante tanque de acumulación,
- Rango de precios: a partir de 5000€,
- Peso del aparato: 190 a 1000 kg.

La Figura 9 muestra los componentes principales de uno de los productos de bombas de calor y colectores solares disponibles en el mercado [10].



*Figura 9 – componentes principales de un acoplamiento bomba de calor – colecto solar (colector solar, bomba de calor, tanque de agua). Fuente: Sonnenkraft. Producto: Sol+*

### 2.3.2. Principio de funcionamiento

Un aparato solar térmico y bomba de calor permite cubrir principalmente las necesidades de producción de agua caliente sanitaria. En función del tipo de aparato y la tecnología utilizada, es posible también producir calefacción y refrigeración. La diferencia principal se encuentra a nivel de las conexiones de la bomba de calor y del tanque de agua caliente. Dado el carácter gratuito de la energía solar, si está disponible entonces será utilizada en prioridad.

#### 2.3.2.1. Calefacción

La producción de calefacción puede ser llevada a cabo de dos formas:

- Mediante la bomba de calor en directo junto con el apoyo de una resistencia eléctrica: si la temperatura del aire del edificio cae por debajo de la temperatura de consigna, entonces la bomba de calor se pone en marcha para alcanzar la temperatura de la ley de agua de los emisores de calor (suelo radiante o radiadores de pared). Si la bomba de calor no tiene la potencia suficiente luego de un período determinado por el usuario entonces la resistencia viene en su apoyo,
- Mediante un tanque de agua caliente: una extracción de agua adicional puede practicarse en el tanque para alimentar los emisores de calor del edificio. Debido a la

tecnología utilizada (generadores de baja temperatura), es necesario que estos emisores sean ellos mismos de baja temperatura (suelo radiante). De esta forma, si la temperatura del aire del edificio disminuye, la bomba extrae agua del tanque y la envía hacia los radiadores, volviendo al tanque con una temperatura más fría. Si la temperatura de la sonda de la extracción de agua para calefacción cae por debajo de la consigna de ley de agua y si la energía solar no es suficiente para calentar el agua del tanque entonces la bomba de calor se pone en marcha para calentar el tanque. Ciertas configuraciones están dotadas de una resistencia eléctrica dentro del tanque que permite proporcionar la energía necesaria en el caso que la bomba de calor no sea suficiente.

#### 2.3.2.2.ACS

Independientemente del modo de calefacción, el principio de producción de ACS es el mismo. Si la temperatura de la parte alta del tanque cae por debajo de la consigna entonces el colector solar, la bomba de calor y/o la resistencia eléctrica se ponen en marcha para proporcionar las calorías necesarias.

El modo de calefacción influye en la configuración del sistema:

- Si la calefacción es mediante la bomba de calor en directo entonces el agua sanitaria es el flujo de agua extraído de la parte superior del tanque,
- Si la calefacción es mediante tanque, entonces el agua sanitaria es producida mediante un intercambiador externo en el cual se pone en contacto el agua caliente de la parte alta del tanque con el agua sanitaria fría. El agua sanitaria es calentada y el flujo de agua obtenido del tanque es retornao al mismo.

#### 2.3.2.3.Doble servicio

El aparato puede suministrar simultáneamente ACS y calefacción.

- Si la calefacción es mediante la bomba de calor en directo, entonces ésta se encarga de calentar el caudal de agua que circula por los radiadores mientras que los colectores solares y la resistencia eléctrica del tanque se encargan de calentar el agua sanitaria,
- Si la calefacción es mediante el tanque, es necesario que tanto la temperatura del caudal extraído para calefacción como la del caudal extraído para producción de ACS estén por encima de las respectivas consignas. De esta forma, los tres generadores (colector solar, bomba de calor y resistencia eléctrica) envían sus calorías al tanque de agua caliente.

### **3. PROGRAMACIÓN**

En este apartado se presenta, en primer lugar, la tecnología utilizada durante el desarrollo de este trabajo. El principal programa utilizado ha sido BOOST, una aplicación desarrollada por CETIAT en el ámbito de la simulación de sistemas.

En segundo lugar, se describen los conceptos utilizados así como el método seguido para el desarrollo de la herramienta de control genérico.

#### ***3.1. BOOST***

BOOST (“BOiler Optimization and Simulation Tool”) es una interfaz gráfica desarrollada por CETIAT que permite modelar y simular el comportamiento de todo tipo de sistemas: bombas de calor, intercambiadores, emisores de calor y controladores.

Estos sistemas pueden ser “simples” como el quemador de una caldera, o “complejos”, es decir, el resultado de la unión de varios sistemas “simples”. De esta forma, la modelización de una caldera (sistema “complejo”) resulta en la unión de varios sistemas simples como la alimentación de gas, la eliminación de gases de combustión, el quemador, el intercambiador de calor, etc.

##### **3.1.1. Módulos y Metamódulos**

Los numerosos elementos que representan estos sistemas pueden ser desarrollados independientemente e implementados bajo la forma de DLL (“Dynamic Library Link”), los cuales, en teoría, podrían ser utilizados por otras interfaces de cálculo externas a BOOST.

BOOST es, por tanto, una aplicación que gestiona documentos que comprenden, simultáneamente, sistemas de ecuaciones, su documentación, datos de entrada y los resultados de cálculo. Al estar organizado como una interfaz de multi-documentos clásico de Windows, permite gestionar uno o varios documentos a través de “vistas”. Por lo tanto, el usuario puede cargar y gestionar varios documentos de forma simultánea. Estos documentos, llamados “módulos” están asociados a ficheros que poseen la extensión “boo”.

Un documento o “módulo” posee:

- La fuente del sistema de ecuaciones,
- Las DLL de los módulos, así como las conexiones entre ellos,
- El último conjunto de datos de entrada y de resultados.

Finalmente, cabe mencionar que cada documento puede contener otros documentos, con la única limitación de la memoria del ordenador. Esta característica permite construir los “metamódulos” que constituyen un conjunto de módulos.

En la Tabla 1, se presentan de forma concisa los principales módulos que se han utilizado durante este proyecto. Su mayor parte ha sido desarrollada por los ingenieros de CETIAT. Únicamente el módulo de cálculo de rendimientos (CPerf) y el módulo de regulación genérica (RGN13) han sido desarrollados durante este PFC.

*Tabla 1 – módulos unitarios desarrollados en BOOST*

Módulo	Siglas	Símbolo	Descripción
Meteorología	MET12	 MET 13	Base de datos de la evolución de condiciones meteorológicas de 8 zonas geográficas RT 2005 y 2012 y 5 ciudades europeas
Tanque	BAL12	 BAL 12	Tanque de agua caliente sanitaria
Intercambiador externo	ECH10	 ECH 13	Unidad externa de intercambio de calor. Se utiliza el método NTU.
Generador universal	GUN13	 GUN 13	Módulo que implementa los modelos de Bomba de Calor, Caldera y Resistencia eléctrica.
Casa	BAT12	 BAT 13	Vivienda mono-habitación.
Caldera	CMH10	 CMH 10	Caldera a gas adaptada a la producción de ACS y a la calefacción de una vivienda.
Acoplamiento solar	Colector solar + tanque	 COLE 13	Bucle solar: acoplamiento de un captador solar y de un tanque de agua caliente sanitaria.
Colector solar	CSE11	 CSE 11	Colector solar validado mediante ensayos de Belenos <sup>7</sup>
Volumen de la instalación	RES12	 RES 12	Corresponde al volumen de agua dentro del circuito solar.
Bomba solar	POS11	 POS 11	Bomba con control interno que permite proporcionar un caudal variable.
Agua con glicol	PEG10	 EAU + GLYCOL PEG 10	Permite tomar en cuenta las propiedades del agua con glicol como fluido de la instalación.
Pérdidas por canalizaciones	TUB12	 TUB 12	Permite simular los conductos del circuito solar y sus correspondientes pérdidas.

<sup>7</sup>Belenos es un laboratorio de ensayos y de desarrollo de sistemas solares. <http://www.belenos.pro/default.cfm>

Extracción de agua	TAP11		Escenarios de utilización de agua según las normas EN13203, EN16147 y RT2012.
Cálculo de rendimientos	CPerf		Módulo de cálculo de rendimientos
Regulación	RGN13		Módulo de control genérico y universal.

En la Figura 10 se muestra una captura de pantalla de la interfaz gráfica de un metamódulo en BOOST. A la izquierda se encuentra el menú de selección de módulo, el cual permite entrar al módulo seleccionado e introducir los datos de entrada. A la derecha se encuentra el esquema de conexión de los módulos, formando el metamódulo. Como se puede observar, este metamódulo contiene 7 módulos, de los cuales la caldera (*Chaudière gaz*) es a su vez un metamódulo formado por 6 módulos.

Las líneas que unen los distintos módulos son las conexiones entre datos de salida y de entrada de estos módulos. Para acceder a estas conexiones se puede hacer doble clic sobre la línea y así realizar las conexiones correspondientes (ver Figura 11).

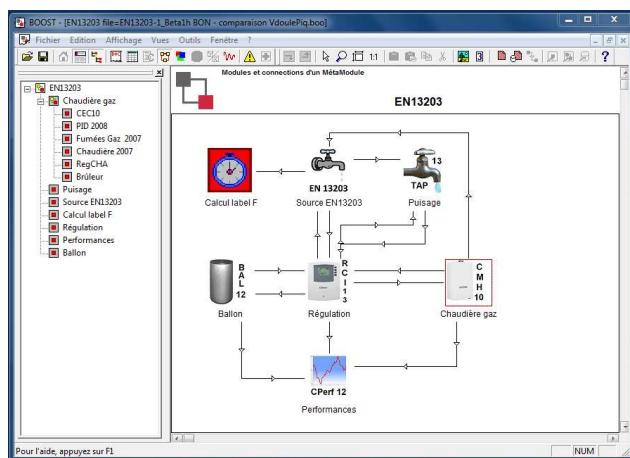


Figura 10 – captura de pantalla de la interfaz gráfica de un metamódulo en BOOST

Como se puede ver en la Figura 11, el módulo de control recupera los datos de salida del tanque (temperatura de sondas y de extracciones) para poder utilizarlos posteriormente en los cálculos.

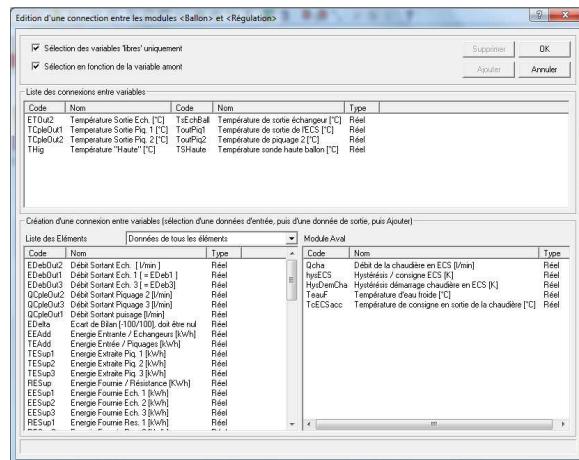


Figura 11 – conexión entre el tanque de agua caliente y el módulo de control.

### 3.1.2. Las alternativas a BOOST

Existen numerosas alternativas a BOOST, las cuales son más utilizadas y conocidas como el lenguaje de modelización y simulación Modelica, SimuLink, o incluso MatLab.

Sin embargo, la principal ventaja que posee BOOST es el hecho de ser un programa “hecho en casa” y que, por ende, responde exactamente a las necesidades actuales de CETIAT. Además, resulta ser un programa muy intuitivo, permitiendo que cualquier persona, con conocimientos básicos de programación, cree un modelo simple que le permita adaptar el funcionamiento de los sistemas a su caso particular.

Aún así, se están barajando las opciones de que esta interfaz gráfica sea descartada para migrar hacia un lenguaje que ofrezca más oportunidades y conexiones con el resto del mercado. Aunque esta medida pueda parecer dramática, varios estudios han sido llevados a cabo por los ingenieros de CETIAT, en los cuales se ha comprobado que, efectivamente, los modelos desarrollados bajo BOOST son utilizables bajo otras interfaces gráficas por medio de “conexiones dll”.

### 3.1.3. La programación

Para poder simular el funcionamiento de un sistema es necesario crear un modelo informático compuesto de una serie de ecuaciones y procedimientos, el cual a partir de datos de entrada o iniciales permita predecir su comportamiento.

En BOOST, se utiliza el lenguaje C para programar los modelos informáticos. Esta sección no intenta entrar en los detalles de la programación en C, sino hacer una explicación sintética de la herramienta utilizada durante este proyecto, el lenguaje C.

En C, se han de definir variables mediante palabras clave que permiten determinar el tipo de información al que pertenecen (entero, real, carácter,...). Estas variables pueden ser evaluadas para obtener unos resultados.

Los cálculos son realizados linealmente, es decir, cada línea escrita es evaluada una a una desde el inicio hasta el fin del programa principal. Una evaluación completa del programa constituye una iteración. La simulación dinámica realizada en las herramientas desarrolladas implica que estas iteraciones representan una fracción del tiempo total. Una vez terminada una iteración, cada módulo recupera la información de entrada para comenzar la iteración siguiente.

Para el desarrollo del módulo de control genérico ha sido necesario aplicar conceptos de programación orientada a objetos. Este tipo de programación consiste en la creación de clases o estructuras que sirven como guía o molde para crear objetos, los cuales utilizan estas guías para guardar una cierta información. De esta forma, se tienen objetos sobre los cuales pueden crearse operaciones. Esto permite un tratamiento genérico de datos ya que lo importante es el objeto en sí y no los valores que caracterizan cada instancia de una estructura.

Entre las ventajas de la programación orientada a objetos puede nombrarse [11]:

- Facilitar el mantenimiento del código,
- Reutilizar el código escrito,
- Hacer el código más fiable,
- Simplificar problemas con un gran número de intercambios de información.

### **3.2. Bases del modelo desarrollado**

El modelo desarrollado para el módulo de regulación genérica se basa en conceptos específicos y una serie de hipótesis sobre los sistemas a controlar que permiten discretizar los sistemas objetivo.

#### **3.2.1. Definición de conceptos**

Para poder comprender el resto de este documento, es necesario presentar algunas definiciones de los conceptos utilizados.

- Sistema: un Sistema es una entidad que intercambia energía y/o materia con su entorno. Un ejemplo de un Sistema es una bomba de calor, una vivienda o un recuperador de calor. La meteorología y la extracción de ACS también son sistemas ya que dependen del tiempo transcurrido. Sin embargo, en los metamódulos desarrollados hasta el presente, únicamente aquellas unidades cuyas conexiones pueden ser controladas por el módulo de regulación son considerados como un sistema.

- Aparato: un Aparato es un conjunto de Sistemas,
- Línea: una Línea es la conexión entre dos Sistemas en un Aparato,
- Device: el Device representa el tipo de conexión entre una Línea y un Sistema. Se distinguen dos tipos de Device: conexión estándar y conexión no estándar. La conexión estándar es el tipo de conexión normalmente utilizado entre una línea y un sistema. La conexión no estándar es el tipo de conexión que representa un caso particular en la arquitectura de un aparato. Ejemplo: un tanque puede tener simultáneamente conexiones de Device Estándar (conexión entre línea e intercambiador de tanque) y Device No Estándar (conexión directa entre línea y el agua del tanque),
- Disponible: indica si el sistema puede arrancar. Es una variable intrínseca a cada sistema e indica su estado actual cuando está detenido. Por ejemplo, si una bomba de calor se detiene, hay un período de algunos minutos llamado de anti-ciclo que permite la protección del compresor. Durante este período, la bomba de calor no puede arrancar, luego no está Disponible,
- Servicio: un sistema está en servicio si está conectado al resto de sistemas. Si un sistema no está en servicio (desconectado), entonces no es tomado en cuenta en los cálculos.

### 3.2.2. Hipótesis

Para poder terminar de definir el funcionamiento de los sistemas a controlar, una serie de hipótesis han sido tomadas:

- Un Sistema puede tener como máximo una conexión de Device Estándar:
  - El caso de una bomba de calor con doble condensador en serie para una doble salida de energía no es considerado,
  - Si un tanque posee varios intercambiadores y alimentación/extracción de agua sanitaria entonces una de estas conexiones es definida como Device Estándar mientras que el resto será definida como No Estándar,
- Una línea tiene que estar conectada a dos sistemas (aguas arriba y aguas abajo),
- Un sistema puede proporcionar energía en calefacción o en agua caliente sanitaria si está en este modo (doble servicio para proporcionar los dos),
- Un sistema puede funcionar únicamente si está Disponible y En Servicio,
- Un sistema tiene que estar En Servicio para estar conectado a una línea,
- Una resistencia sumergida en un tanque de ACS tiene que ser tratada como un sistema independiente que el módulo de regulación puede controlar a voluntad. De esta forma, un tanque y su resistencia eléctrica son dos sistemas.

### 3.3. Abstracción del sistema

Cada aparato está compuesto de sistemas y de líneas de conexión. Las líneas de conexión de sistemas son objetos que, por tanto, deben ser caracterizados por un conjunto de datos. En la Figura 12 se representa un ejemplo de abstracción de sistema. A la izquierda se puede ver que un sistema es esquematizado por 3 sistemas y 4 líneas de conexión mientras que a la derecha se muestran las configuraciones posibles de funcionamiento de este aparato.

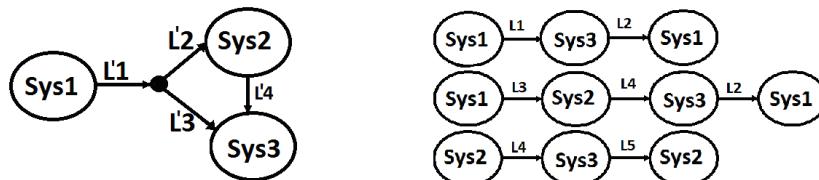


Figura 12 – representación del proceso de abstracción de un aparato

De esta forma, un aparato puede ser caracterizado por un conjunto de sistemas, líneas y de configuraciones de funcionamiento. Se puede observar que un aparato con 3 sistemas que permite el funcionamiento en serie de dos de sus sistemas será caracterizado por 3 sistemas, 5 líneas y 3 configuraciones de funcionamiento.

En cada instante, el funcionamiento de un sistema puede ser caracterizado por un flujo de entrada, un flujo de salida y una potencia intercambiada, como muestra la Figura 13.

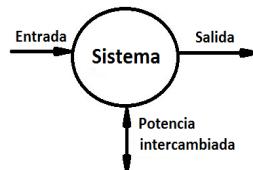


Figura 13 – representación esquemática de un sistema

Es decir, cada sistema puede ser reducido a un problema de intercambiador de calor. De esta forma, se pueden encontrar parámetros comunes a todos los sistemas, los cuales pueden ser organizados en un vector que llamaremos Vector de Estado. Este vector está compuesto por las variables presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2 – componentes del vector de estado de un sistema

Nombre	Tipo	Descripción
nType	int	Identificación del tipo de sistema: caldera, bomba de calor, casa.
nGenMode	int	Tipo de energía que el sistema puede proporcionar
pDnLine	struct	Línea a la cual el sistema está conectado aguas abajo
bAvlabltyChnge	bool	Indica si la Disponibilidad del sistema puede ser modificada
bCurntAvlablty	bool	Disponibilidad del sistema a ser arrancado
bService	bool	Indica si el sistema está conectado o no
bEtat	bool	Estado actual de funcionamiento del sistema: funcionando o detenido
bSysECS	bool	Indica si el sistema tiene que arrancar en modo calefacción

bSysCHFc	bool	Variable para determinar si el sistema tiene que arrancar en modo calefacción
dTsystem	double	Temperatura interior del sistema
dTout	double	Temperatura de salida del sistema
dTin	double	Temperatura de entrada del sistema en conexión estándar
dQ	double	Caudal que atraviesa el sistema en Device estándar
dTc	double	Temperatura de consigna del Device estándar
dHysA	double	Histéresis de detención del sistema con respecto a la temperatura de salida
dHysD	double	Histéresis de arranque del sistema con relación a la temperatura de salida
dtFonc	double	Tiempo de funcionamiento en modo calefacción
dtECS	double	Tiempo de funcionamiento en modo ACS
dTimeInStop	double	Tiempo que el sistema ha pasado en detención mientras era demandado

Análogamente, las líneas de conexión pueden estar representadas por un vector de estado, cuyas componentes se muestran en la Tabla 3.

*Tabla 3 – componentes del vector de estado de una línea*

Nombre	Tipo	Descripción
bEnService	bool	Línea En Servicio o Fuera de Servicio.
bEtat	Bool	Estado de la línea: En funcionamiento o En detención. La línea estará en funcionamiento solamente si los dos sistemas conectados a ella están en funcionamiento
pDnSystem	struct	Sistema aguas abajo de la línea
pUpSystem	struct	Sistema aguas arriba de la línea
nLineMode	Int	Modo de la línea: calefacción o ACS
nDeviceSys	int	Parámetro que indica el tipo de conexión entre el UpSystem y el DnSystem
dTemperature	double	Temperatura del fluido que atraviesa la línea
dQ	double	Caudal volumétrico del fluido que atraviesa la línea
dHysArret	double	Histéresis de detención del UpSystem con respecto a la temperatura de consigna del DnSystem
dHysMarche	double	Histéresis de arranque del UpSystem con respecto a la temperatura de consigna del DnSystem
dtVerif	double	Tiempo que hay que esperar antes de verificar si el UpSystem tiene la potencia necesaria para cubrir las necesidades energéticas del DnSystem

Con esta generalización, cada objeto dentro de nuestro sistema queda representado por una unidad equivalente dentro del código fuente, lo que permite un tratamiento genérico de su información.

Es decir, las rutinas implementadas podrán leer los datos almacenados dentro de estos vectores, procesar la información de una forma genérica y así determinar el funcionamiento del sistema global en función de los parámetros de regulación introducidos por el usuario en cada simulación.

### ***3.4.Descripción en detalle de las variables del vector de estado***

La mayor parte de las variables del vector de estado son fáciles de comprender. Sin embargo, esto no resulta evidente en todos los casos. En esta sección se realiza una descripción más en detalle de algunas de las variables del vector de estado, cuya importancia radica en el hecho de constituir los pilares del funcionamiento del módulo de regulación.

- bEtat, bCurntAvlablty y bService: estas tres variables tienen una relación interna:
  - bService: esta variable indica si el sistema está conectado o no al resto del aparato.
  - bCurntAvlablty: indica si el sistema está disponible y listo a arrancar, es decir, el sistema va a arrancar si recibe la orden de hacerlo. Sin embargo, si el sistema no está conectado, no está disponible.
- bEtat: indica si el sistema está funcionando o no. Si el sistema no está conectado o no está disponible, entonces no puede funcionar.
- bSysECS y bSysCHF: estas dos variables indican si el sistema tiene que funcionar en modo ACS (bSysECS) o en modo calefacción (bSysCHF). Estas variables pueden ser modificadas dentro del programa numerosas veces. Su objetivo final es permitir determinar la configuración del aparato y, por tanto, el estado de funcionamiento de cada sistema.
- nDeviceSys: este parámetro indica el tipo de conexión entre los sistemas aguas arriba y aguas debajo de una línea. Su propósito es el de distinguir las conexiones de un sistema cuando éste está conectado simultáneamente a más de dos sistemas. Éste es el caso de un tanque de agua: la bomba de calor puede estar conectada a un intercambiador dentro del tanque, una extracción de agua puede ser realizada para producir agua caliente sanitaria y otra para alimentar los radiadores de una casa, unos colectores solares pueden alimentar un segundo intercambiador,...

### ***3.5.Descripción de la estructura interna del módulo de control genérico***

En este apartado, la estructura interna del módulo de regulación genérica es descrita de una forma general para permitir al lector entender en líneas generales el proceso de control. Para una descripción más precisa de los procedimientos y argumentos de cada función, ver el ANEXO 2 -.

Una descripción sencilla del módulo puede ser la división de su código en tres partes. La primera parte realiza los cálculos y acciones preliminares. La segunda parte es la determinación de las necesidades de energía y de los sistemas que deberán cubrirlas. La tercera parte está compuesta por los cálculos finales y la salida de datos.

Dentro de cada una de estas partes se pueden identificar una serie de rutinas y acciones que es necesario llevar a cabo:

1. Cálculos y acciones preliminares: inicializar los sistemas y líneas
  - a. Los Vectores de Estado de los sistemas son inicializados en principio de simulación y mediante los parámetros y conexiones de entrada.
  - b. En función de los parámetros de entrada, la disponibilidad de cada sistema es actualizada
  - c. Las líneas que unen los sistemas son creadas.
  - d. Los Vectores de Estado son actualizados: los datos de entrada que provienen del resto de sistemas son guardados en sus vectores correspondientes.
2. Determinación de necesidades de energía y sistemas necesarios
  - a. Determinación de las necesidades de energía (bECS y bCHF) en modo ACS y calefacción en función de las características del aparato.
  - b. Gestionar los sistemas (bSysECS y bSysCHF) en función de las necesidades energéticas y las elecciones de control realizadas por el usuario. Una vez determinados bSysECS y bSysCHF para cada sistema, se puede determinar la configuración del sistema.
3. Cálculos finales y la salida de datos:
  - a. Hacer conexiones. En función de la configuración del sistema, se ponen en marcha los sistemas y las líneas de conexión. Para cada línea, se determina el caudal y se realizan las equivalencias de datos entre el UpSystem y el DnSystem. El Device de cada línea se tiene en cuenta en este paso.
  - b. Calcular el tiempo transcurrido desde el arranque de cada sistema.
  - c. Obtener los datos de salida: las variables de salida son extraídas de los vectores de estado para ser enviadas a los sistemas correspondientes.

### ***3.6. La configuración del sistema***

Como ha sido presentado en la sección 3.3, el funcionamiento de un aparato queda caracterizado por un conjunto de sistemas, de líneas y de configuraciones de funcionamiento. Las configuraciones de funcionamiento son combinaciones de conexiones entre los diferentes sistemas que componen el sistema por medio de líneas que existen entre ellos. Una configuración representa entonces la actividad del flujo de energía entre los sistemas en un momento dado.

Existen diferentes parámetros para determinar las posibilidades de funcionamiento de un sistema o configuraciones. De esta forma, una configuración del sistema engloba un conjunto de parámetros elegidos por el usuario en el momento de lanzar la simulación. En consecuencia, existen configuraciones exclusivas (dos configuraciones que no pueden suceder

---

durante la misma simulación). Este es un aspecto clave para la verificación interna del funcionamiento del módulo.

Para determinar una configuración es necesario conocer si los sistemas son demandados en ACS, calefacción o ambos. En función del aparato, los sistemas demandados serán distintos (bomba de calor, caldera, resistencia eléctrica, tanque).



## 4. LOS METAMÓDULOS

En este capítulo se explican rápidamente las herramientas de simulación desarrolladas. Para cada una de ellas, se presenta el esquema de conexión de los módulos que componen el sistema. A continuación, se explican ciertos parámetros de entrada del módulo de regulación característicos del sistema en cuestión. Finalmente, se exhiben algunos de los parámetros de salida más importantes del módulo de control que permiten pilotar el resto de sistemas.

En primer lugar, para una mejor comprensión de los esquemas de conexión de cada metamódulo, en la Tabla 4 se presenta la traducción de los diferentes intitulados da cada módulo o sistema.

*Tabla 4 – traducción de los intitulados de los módulos*

Intitulado en francés	Traducción español
Pompe à chaleur – PAC	Bomba de calor
Chaudière Gaz -	Caldera a gas
Ballon	Tanque de agua caliente
Régulation	Sistema de control genérico
Bâtiment	Casa/edificio
Performances	Calculador de rendimientos
Puisage	Extracción de agua
Echangeur	Intercambiador externo
Météo	Meteorología
Capteur Solaire	Colector solar
Circulateur Solaire	Bomba del circuito solar
Volume nstallation	Volumen de la instalación
Canalisation aller	Tuberías de ida
Canalisation retour	Tuberías de retorno
Eau+Glycol	Agua con glicol

En segundo lugar, cabe destacar que los datos de entrada presentados en las siguientes secciones son aquellos que conciernen únicamente el módulo de control genérico. Los datos de entrada (potencia nominal, rendimiento, volumen, dimensiones) relativos al resto de sistemas (bomba de calor, caldera, tanque,...) se pueden introducir dentro de cada módulo de una forma análoga a la presentada en esta sección. Sin embargo, estos datos no son presentados en este documento ya que no son parte del objetivo de este PFC.

En tercer lugar, es necesario mencionar que dentro de cada uno de los metamódulos existe un módulo de cálculo, creado durante este PFC, con el objetivo de obtener rápidamente los distintos indicadores, como el consumo de la instalación, las facturas energéticas, el COP de la instalación, entre otros.

## 4.1. Caldera Híbrida – CHYBMS

### 4.1.1. Conexión de módulos

En la Figura 14 se presentan los diferentes módulos utilizados para la creación del metamódulo de caldera híbrida. Como se puede observar, un gran número de sistemas interviene en el funcionamiento global del aparato. Es principalmente la existencia de dos generadores de energía (caldera y bomba de calor) lo que ha hecho necesario el desarrollo de un módulo de regulación genérica. Como se comprobará en esta sección y en las siguientes, los diferentes sistemas comparten el hecho de que el módulo de control genérico RGN13 es el punto neurálgico del aparato, desde donde salen y hasta donde llegan la gran mayoría de conexiones.

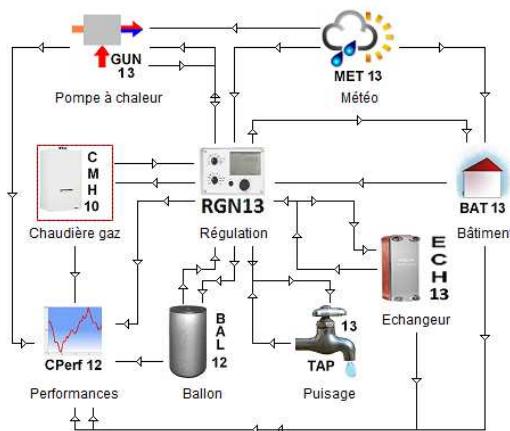


Figura 14 – metamódulo de Caldera Híbrida

El funcionamiento del metamódulo de caldera híbrida es el siguiente: el módulo de control RGN13 recupera los datos de los distintos sistemas (temperatura interior, temperatura de salida, temperatura de sondas, temperatura exterior, caudal de extracción de agua,...) para determinar si los generadores, bomba de calor y caldera a gas, tienen que funcionar o no. En función del estado de estos generadores, el módulo RGN13 envía los datos de retorno correspondientes a cada sistema (caudal, temperatura de entrada,...).

### 4.1.2. Datos de entrada

En las siguientes figuras se presentan distintos parámetros de entrada del módulo de regulación que caracterizan el funcionamiento del aparato.

En la Figura 15 se muestran los parámetros que permiten elegir el test de funcionamiento de la bomba de calor (COP en EP, bivalencia clásica,...), el tipo de energía a producir (ACS, calefacción o doble servicio) y, en caso de doble servicio, si el aparato es capaz de producir ACS y calefacción al mismo tiempo.

Caractéristiques de la régulation		
• nTypReg	Type de régulation [Menu]	COP sur EP COP sur EP Coût énergie Bivalence Classique Aucun
• nmodeFSys	Mode de fonctionnement de la chaudière hybride [Menu]	DOUBLESERV ECS CHAUFFAGE DOUBLESERV
• bCHFpliECS	Permettre chauffage et ECS en même temps ? [O/N]	OUI

Figura 15 – parámetros de entrada de caracterización del control

La Figura 16 muestra las opciones de control en modo calefacción: modo de funcionamiento de ambos generadores (en serie o alternado), la temperatura de bivalencia y la temperatura mínima de funcionamiento de la bomba de calor.

Caractérisation bivalence		
• nTypBiv	Type bivalence [Menu]	Simultanée Alternée Simultanée
• dTbival	Température de bivalence [°C]	3
• dTextMnPAC	T° extérieure mini fonctionnement PAC [°C]	-2

Figura 16 – características de la bivalencia

La Figura 17 muestra los diferentes parámetros que permiten caracterizar el funcionamiento del sistema en modo ACS. Este bloque permite introducir las consignas de temperatura para el tanque y el ACS, así como elegir el modo de producción de ACS (mediante tanque en acumulación o mediante intercambiador en instantáneo) y otras opciones de funcionamiento como la posibilidad de funcionamiento en serie o en alterno de la bomba de calor y la caldera.

Production ECS		
• dTcECS	Température de consigne ECS [°C]	52.5
• dHsDCHAecs	Hystérésis de déclenchement de la chaudière en ECS [°C]	10
• dHsDPACecs	Hystérésis de déclenchement PAC en ECS [°C]	6
• dDelPACecs	Temps max de fonctionnement PAC en mode ECS [min]	90
• dHysBal	Hystérésis ECS [°C]	1
• nModeECS	Mode de production ECS [Menu]	HYDROAC INSTANTANE HYDROAC
• nModSysECS	Mode de couverture des besoins ECS [Menu]	PAC plus CHA CHA seule PAC plus CHA
• nTypPuisag	Type de cycle de puisage [Menu]	Débit Energie Débit
• bRegTseuil	Température seuil départ PAC pour démarrage CHA en ECS ? [O/N]	NON
• dTseuilPAC	Température seuil pour déclenchement chaudière [°C]	49
• dTdMaxCHA	Température de départ maximale de la chaudière (consigne) [°C]	60

Figura 17 – características de la producción de ACS

Para más información de los parámetros de entrada del módulo de control genérico aplicado a una caldera híbrida, consultar el documento [12].

#### 4.1.3. Datos de salida

Los datos de salida del módulo RGN13 permiten pilotar los sistemas de bomba de calor y caldera. La Figura 18 expone los diferentes comandos binarios que permiten controlar ambos sistemas y determinar su estado:

- **bPACON**: estado de la bomba de calor. En marcha o detenida.
- **bCHAON**: estado de la caldera. En marcha o detenida.
- **bCHF**: modo calefacción encendido.
- **bECS**: modo ACS encendido.
- **bCondCoutE**: condición de coste de la energía cumplida o no.
- **bCndCOPsEP**: condición COP en EP cumplida o no.
- **bPACforECS, bPACforCHF**: bomba de calor en modo ACS o calefacción.

Control		
<input checked="" type="checkbox"/> bPACON	Demande PAC ? [O/N]	NON
<input checked="" type="checkbox"/> bCHAON	Demande chaudière ? [O/N]	NON
<input checked="" type="checkbox"/> bCHF	Besoin chauffage? [O/N]	NON
<input checked="" type="checkbox"/> bECS	Besoin d'ECS ? [O/N]	NON
<input checked="" type="checkbox"/> bCondCoutE	Condition coût de l'énergie accomplie ? [O/N]	NON
<input checked="" type="checkbox"/> bCndCOPsEP	Condition COP sur EP accomplie ? [O/N]	OUI
<input checked="" type="checkbox"/> bPACforECS	Pac en mode ECS ? [O/N]	NON
<input checked="" type="checkbox"/> bPACforCHF	PAC en chauffage [O/N]	NON
<input checked="" type="checkbox"/> nmCHYBs	Mode de fonctionnement du système [Menu]	
<input checked="" type="checkbox"/> nmodeECSS	Mode de fonctionnement CHYB en ECS [Menu]	

Figura 18 – principales variables de salida del módulo de control genérico

Otras variables de salida son las temperaturas de retorno y de caudal de cada sistema.

#### 4.2. Aparato Multifunción – MULTIF

##### 4.2.1. Conexión de módulos

En la Figura 19 se presentan los diferentes módulos utilizados para la creación del metamódulo de aparato multifunción. En este aparato, hasta tres generadores pueden funcionar simultáneamente para la generación de energía.

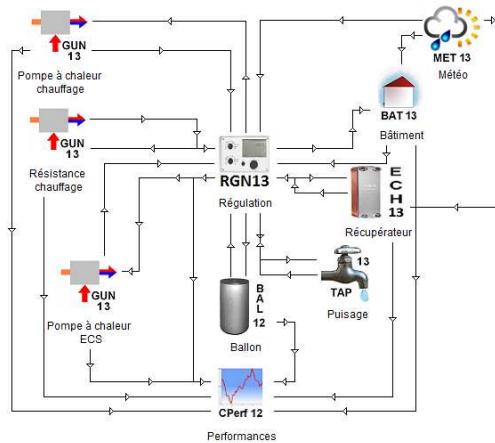


Figura 19 – metamódulo de Aparato Multifunción

El funcionamiento del metamódulo de aparato multifunción es el siguiente: el módulo de control RGN13 recupera los datos de los distintos sistemas (temperatura interior, temperatura de salida, temperatura de sondas, temperatura exterior, caudal de extracción de agua,...) para determinar si los generadores, bomba de calor y resistencias eléctricas, tienen que funcionar o no. En función del estado de estos generadores, el módulo RGN13 envía los datos de retorno correspondientes a cada sistema (caudal, temperatura de entrada,...).

#### 4.2.2. Datos de entrada

Un gran número de variables de entrada deben ser determinadas en el módulo de control genérico antes de lanzar una simulación.

En la Figura 20 se muestran los parámetros que permiten elegir el tipo de energía a producir (ACS, calefacción o doble servicio) y la forma de controlar las resistencias: mediante funcionamiento constante o mediante matrices de permisión/negación horaria (el usuario introduce hora por hora los períodos en los que se permite el funcionamiento de las resistencias).

Caractéristiques de la régulation		
<b>nmodeFSys</b>	Mode de fonctionnement du système [Menu]	DOUBLESERV
<b>nTypCtrlAP</b>	Type de contrôle des résistances électriques [Menu] Si contrôle Constant => renseigner dTcRESecs et dTcRESchf Si contrôle Tableaux => renseigner tableau de demande et Tc	Constant

Figura 20 – parámetros de entrada de caracterización del control

La Figura 21 muestra las diferentes variables que es necesario introducir para el control de la bomba de calor: temperatura de consigna en modo ACS y calefacción, temperatura mínima de funcionamiento, histéresis de marcha/stop y temperatura exterior mínima.

Régulation PAC		
dTcPACchf	Température départ de consigne de PAC en CHF [°C]	42
dTcPACecs	Température départ de consigne de PAC en ECS [°C]	65
dTdMinPACc	Température minimale de départ de la PAC en CHF [°C]	5
dTdMinPACe	Température minimale de départ de la PAC en ECS [°C]	5
dHysEauD	Hystérésis démarrage PAC [°C]	0
dHysEauA	Hystérésis arrêt PAC [°C]	3
bRegTmin	Prise en compte T° extérieure mini fonctionnement PAC ? [O/N]	OUI
dTextMnPAC	Température extérieure minimale PAC [°C]	-10

Figura 21 – datos para el control de la bomba de calor

La Figura 22 muestra los diferentes parámetros que permiten caracterizar el funcionamiento del sistema en modo calefacción: bomba de calor y resistencia en serie o no, temperatura de consigna de la vivienda en período normal y de reducción, tiempo de verificación de la potencia de la bomba de calor, modo Boost, tiempo de verificación en modo Boost, entre otros.

Chaudage		
bCHFserie	PAC et résistance en série en chauffage ? [O/N]	OUI
dTcBatJ	Température consigne Bâtiment normal [°C]	19
dTcBatN	T° consigne selon scénario réduit RT2012 [°C]	16
dDelPACchf	Délai vérifier si PAC répond au besoin - sinon démarrage appoint [min]	30
dHysB	Hystérésis consigne bâtiment [°C]	1
bModeBoost	Permettre mode Boost ? [O/N]	OUI
dDelBoost	Délai pour démarrer mode Boost [min]	20
dTcRESchf	Température maximale de soufflage d'air [°C]	48
arDemTcRc	Demande et T° de consigne Résistance chauffage [Dem - Tc]	Demande [0-1] - Tc

Figura 22 – características en modo calefacción

Para más información de los parámetros de entrada del módulo de control genérico aplicado a un aparato multifunción, consultar el documento [13].

#### 4.2.3. Datos de salida

Los datos de salida del módulo RGN13 en el aparato multifunción son esencialmente los mismos que en el caso de caldera híbrida. Éstos permiten el control de los 4 generadores que constituyen el aparato:

- bPACchfON: estado de la bomba de calor en calefacción. En marcha o detenida,
- bPACecsON: estado de la bomba de calor en ACS. En marcha o detenida,
- bAPPchfON: estado de la resistencia en calefacción. En marcha o detenida,
- bAPPecsON: estado de la resistencia en ACS. En marcha o detenida,
- bCHF: modo calefacción encendido,
- bECS: modo ACS encendido,
- bSsEnBoost: modo Boost encendido.

Contrôle	
<input checked="" type="checkbox"/> bPACchfON	Demande PAC-chauffage? [O/N]
<input checked="" type="checkbox"/> bPACecsON	Demande PAC-ECS [O/N]
<input checked="" type="checkbox"/> bAPPchfON	Demande appoint de chauffage ? [O/N]
<input checked="" type="checkbox"/> bAPPEcsON	Besoin de résistance en ECS [O/N]
<input checked="" type="checkbox"/> bCHF	Besoin chauffage? [O/N]
<input checked="" type="checkbox"/> bECS	Besoin d'ECS ? [O/N]
<input checked="" type="checkbox"/> bSsEnBoost	Système en Mode Boost ? [O/N]
<input checked="" type="checkbox"/> nModeFsysS	Mode de fonctionnement du système [Menu]

Figura 23 – principales variables de salida del módulo de control genérico en un aparato multifunción

Otras variables de salida son las temperaturas de retorno y de caudal de cada sistema.

#### 4.3. Acoplamiento solar térmico-bomba de calor - SOLPAC

Éste es el aparato más complejo en el que el módulo de control genérico ha sido integrado. Este sistema dispone de 5 generadores: colectores solares térmicos, bomba de calor, resistencia eléctrica en ACS, resistencia eléctrica en calefacción y tanque de agua caliente. Este último sistema ha sido tomado en cuenta como un generador ya que permite utilizar sus calorías para producir agua caliente sanitaria o enviarlas hacia los radiadores del edificio sin necesidad de que la bomba de calor, las resistencias o el colector solar esté en funcionamiento. Gracias a las técnicas implementadas en el módulo de control genérico, se puede simular el funcionamiento de un aparato en el cual sus generadores funcionen simultáneamente.

##### 4.3.1. Conexión de módulos

En la Figura 24 se presentan los diferentes módulos utilizados para la creación del metamódulo SOLPAC (SOLAire+PAC: energía solar y bomba de calor).

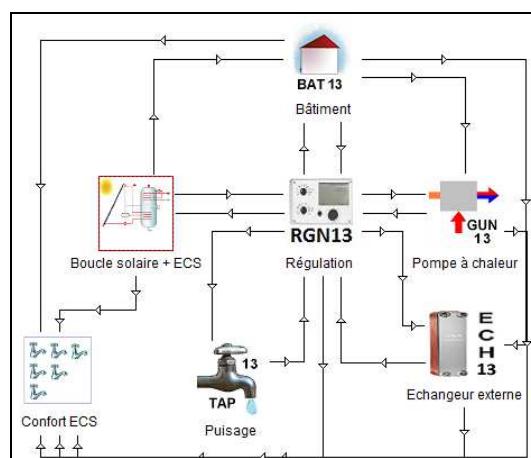


Figura 24 – metamódulo de Bomba de Calor Solar Híbrida

El módulo conectado a la izquierda del módulo RGN13 es un metamódulo que integra el tanque de agua caliente con el colector solar. La Figura 25 muestra la conexión de este metamódulo, desarrollado en 2011 por los ingenieros de CETIAT.

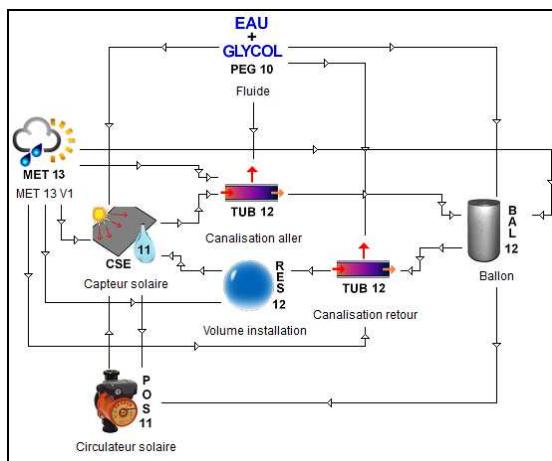


Figura 25 – metamódulo de colector solar con tanque de ACS

Este sistema simula el comportamiento de un colector solar al recibir la radiación del sol. Un flujo de agua con glicol es calentado y enviado hacia el tanque de ACS a través de tuberías donde, eventualmente, sufre pérdidas térmicas. El flujo es impulsado por una bomba que permite regular el caudal en función de la diferencia de temperatura entre la sonda del intercambiador sumergido en el tanque y la temperatura a la salida del colector.

#### 4.3.2. Datos de entrada

Una parte de los datos de entrada del módulo de control genérico son mostrados en las siguientes figuras.

En la Figura 26 se muestran los parámetros que permiten elegir los generadores a utilizar durante la simulación: colector solar, bomba de calor y resistencias eléctricas.

Choix des générateurs		
<input checked="" type="checkbox"/> bStatSOL	Utilisation boucle solaire ? [En Service?]	OUI
<input checked="" type="checkbox"/> bStatPAC1	Utilisation PAC ? [En Service?]	OUI
<input checked="" type="checkbox"/> bStatRES1	Utilisation appoint électrique ECS ? [En Service?]	OUI
<input checked="" type="checkbox"/> bStatRES2	Utilisation appoint électrique chauffage ? [En Service?]	OUI

Figura 26 – parámetros de elección de generador

La Figura 27 muestra las diferentes variables que es necesario introducir para caracterizar la producción de ACS: temperatura de consigna de ACS, funcionamiento en serie de la bomba de calor y de la resistencia, modo de control de la resistencia (horas punta o permanente), entre otros.

Production ECS		
• dTcECS	Température de consigne ECS du ballon [°C]	52.5
• dHysECS	Hystérésis / consigne ECS du ballon [°C]	4
• bFSimulECS	Fonctionnement simultané PAC et appoint ?	OUI
• bFForce	Fonction marche forcée appoint ?	Activé
• dTMinElec	Température mini déclenchement appoint mode confort ECS [°C]	35
• dDelPACecs	Délai arrêt PAC/démarrage appoint [min]	60
• nModeHour	Type de fonctionnement de l'appoint en ECS [Menu]	H. Creuse/H. Plein H. Creuse/H. Plein Permanent
• dAbaissTc	Abaissement de la température de consigne d'ECS en heure pleine [K]	8
• dDébutHP	Début heure pleine [h]	8
• dFinHP	Fin heure pleine [h]	22

Figura 27 – características del modo ACS

La Figura 28 muestra los diferentes parámetros que permiten caracterizar el funcionamiento del sistema en modo calefacción: bomba de calor y resistencia en serie o no, temperatura de consigna del edificio en período normal y de reducción, tiempo de verificación de la potencia de la bomba de calor, modo Boost, tiempo de verificación en modo Boost, entre otros.

Chaudage		
• bCHFserie	PAC et résistance en série en chauffage ? [O/N]	OUI
• dTcBatJ	Température consigne Bâtiment normal [°C]	19
• dTcBatN	T° consigne selon scénario réduit RT2012 [°C]	16
• dDelPACchf	Délai vérifier si PAC répond au besoin - sinon démarrage appoint [min]	30
• dHysB	Hystérésis consigne bâtiment [°C]	1
• bModeBoost	Permettre mode Boost ? [O/N]	OUI
• dDelBoost	Délai pour démarrer mode Boost [min]	20
• dTcRESchf	Température maximale de soufflage d'air [°C]	48
• arDemTcRc	Demande et T° de consigne Résistance chauffage [Dem - Tc]	Demande [0-1] - Tc

Figura 28 – características en modo calefacción

Para más información de los parámetros de entrada del módulo de control genérico aplicado a un aparato multifunción, consultar el documento [13].

#### 4.3.3. Datos de salida

Los datos de salida del módulo RGN13 en el metamódulo SOLPAC son esencialmente los mismos que en el resto de aparatos. Éstos permiten el control de los 5 generadores que constituyen el aparato:

- **bPACON**: estado de la bomba de calor en calefacción. En marcha o detenida,
- **bAPPchfON**: estado de la resistencia en calefacción. En marcha o detenida,
- **bAPPecsON**: estado de la resistencia en ACS. En marcha o detenida,
- **bSolON**: estado de la bomba del colector solar. En marcha o detenida,
- **bCHF**: modo calefacción encendido,
- **bECS**: modo ACS encendido.

Otras variables de salida son las temperaturas de retorno y de caudal de cada sistema.



## 5. CASOS DE ESTUDIO - RESULTADOS

En este apartado se realizan casos de estudio de un día de simulación y anuales para cada uno de los sistemas objetivo. Con estos casos de estudio se busca principalmente validar el funcionamiento de cada sistema.

Para cada uno de los aparatos se presentará un caso de estudio en modo doble servicio en el cual se analizará la evolución de las curvas de temperatura y potencia proporcionada. Las características de los sistemas simulados se pueden encontrar en el ANEXO 3 -. Los cálculos anuales presentados al final de este capítulo permiten hacer una comparación de diferentes soluciones de producción de energía en las mismas circunstancias de zonas climáticas y necesidades energéticas.

### 5.1. Caldera híbrida

En la Figura 29 se muestran los resultados de simulación durante un día de una caldera híbrida con regulación de COP en energía primaria y utilizando un tanque de acumulación para la producción de ACS. La Figura 30 muestra la leyenda correspondiente a las curvas de Figura 29.

En modo doble servicio, al comenzar la simulación, una doble demanda de ACS y de calefacción se produce: el agua del tanque de ACS está fría y la temperatura del aire del edificio está por debajo de la consigna. Como el sistema de regulación da prioridad al ACS, entonces la bomba de calor y la caldera arrancan. Esto se puede comprobar al observar el pico de potencia y temperatura de la caldera y la bomba de calor (1 y 2).

Al transcurrir unos minutos, las necesidades de ACS quedan cubiertas, con lo cual los generadores cambian a modo calefacción (3). Como la temperatura de ley de agua es mucho menor que la temperatura de consigna en ACS, se observa que los generadores disminuyen su potencia para aproximar la temperatura de salida a la temperatura de consigna (4).

Una vez cubiertas las necesidades de energía, el sistema entra en estado de espera, hasta que alrededor de las 7 de la mañana, la temperatura del aire del edificio cae por debajo de la consigna. La bomba de calor arranca en modo calefacción (5), pero luego del período de verificación y al no haber cubierto las necesidades energéticas, la caldera es arrancada para terminar de cubrir las necesidades (6). El proceso se repite un par de horas más tarde (7).

Finalmente, entre las 1 y las 2 de la tarde, debido a las extracciones de agua y a la pérdida de energía del tanque, la bomba de calor debe arrancar en modo ACS. Aunque la bomba de calor parece tener la potencia suficiente para cubrir las necesidades de ACS (8), tarda demasiado en

alcanzar las condiciones de consigna, entonces la caldera ha de arrancar (9). Este proceso se repite a las 8 de la noche (10)

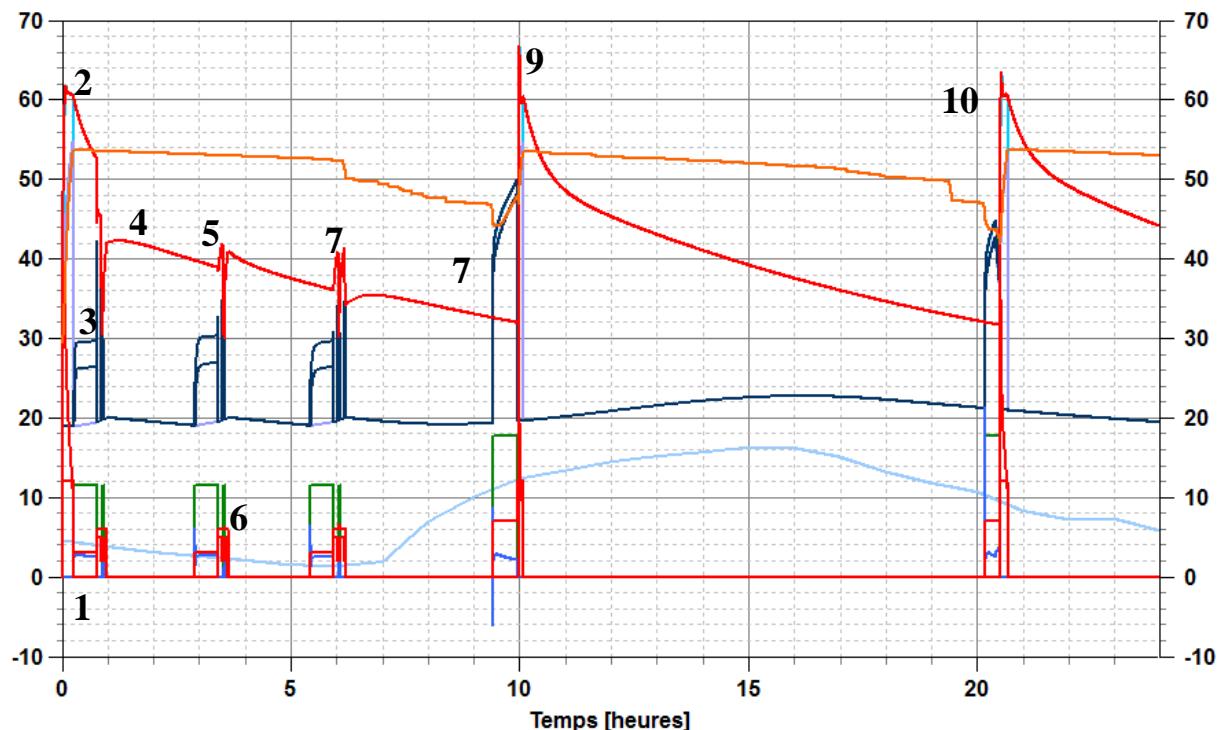


Figura 29 – simulación de un día en modo doble servicio

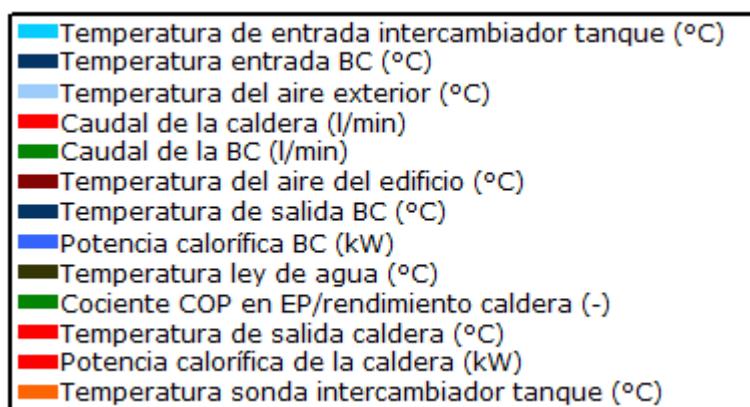


Figura 30 – leyenda de las curvas de la Figura 29

La Tabla 5 muestra el balance de energía de la instalación. Se comprueba que la energía proporcionada entre la entrada y la salida del generador híbrido es igual a la energía aportada entre la entrada y salida de los radiadores de la casa y del intercambiador del tanque. Se observa que esta diferencia es del 5%, lo cual es debido al incremento de tiempo de la simulación (delta t).

Tabla 5 – balance de energía del sistema y COP de la bomba de calor

Parámetro	Valor	Unidad
-----------	-------	--------

Energía producida bomba de calor+caldera	17.2	kWh
Energía consumida tanque+casa	16.28	kWh
Balance de energía (producida)	5.35	%
COP real de la bomba de calor	2.89	-

## 5.2. Aparato Multifunción

La Figura 31 muestra la simulación del funcionamiento de un aparato multifunción durante un día en modo doble servicio. La Figura 32 muestra la leyenda de las curvas de la Figura 31. Como se puede observar, hay dos ciclos de calefacción (enmarcados por elipses de trazo discontinuo de color negro) y tres ciclos de producción de ACS (enmarcados por elipses de trazo discontinuo de color rojo).

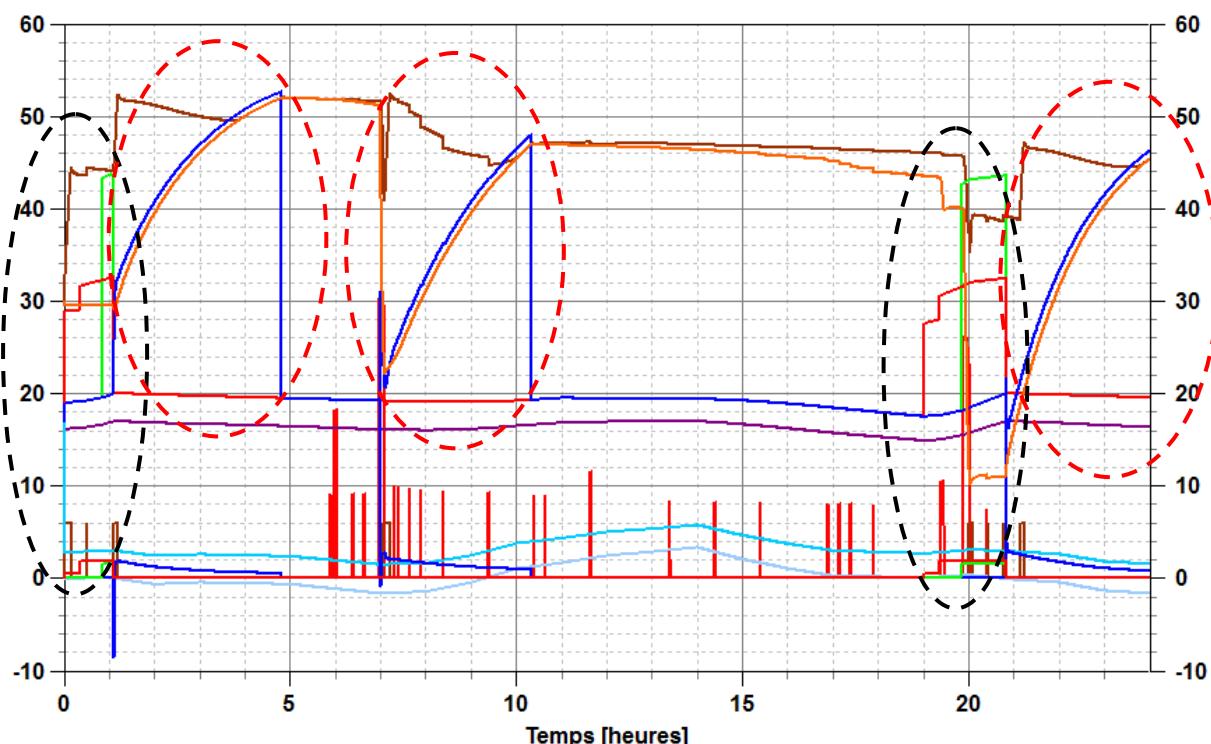


Figura 31 – simulación de aparato multifunción en modo doble servicio

■	Potencia extraída del tanque (kW)
■	Temperatura de la sonda de la resistencia del tanque (°C)
■	Potencia calorífica de la resistencia del tanque (°C)
■	Temperatura del aire del edificio (°C)
■	Temperatura salida recuperador del aire precalentado (°C)
■	Temperatura salida recuperador del aire de extracción (°C)
■	Temperatura del aire exterior (°C)
■	Potencia calorífica de la BC en ACS (°W)
■	Potencia calorífica de la resistencia en calefacción (kW)
■	Temperatura de salida de la resistencia en calefacción (kW)
■	Potencia calorífica de la BC en calefacción (kW)
■	Temperatura de salida de la BC en calefacción (°C)
■	Temperatura de salida de la BC en ACS (°C)
■	Temperatura de la sonda de intercambiador del tanque (°C)

*Figura 32 – leyenda de las curvas de la Figura 31*

La Figura 33 muestra en detalle las primeras horas de simulación. Como se puede observar, hay simultáneamente una demanda de calefacción y producción de ACS. Como las necesidades de calefacción son prioritarias con respecto a la producción de ACS, entonces el sistema arranca la bomba de calor alcanzando una temperatura en el aire de ventilación de 30°C (1).

Sin embargo, se observa que el agua del tanque está demasiado fría (2), con lo cual la resistencia de apoyo es arrancada para cumplir un confort mínimo. La resistencia se detiene cuando la temperatura del agua leída por su sonda alcanza la temperatura de confort mínimo (3).

Transcurrido el tiempo de verificación de la bomba de calor, como las necesidades de calefacción no han sido cubiertas, el modo Boost se pone en marcha. De esta forma, la bomba de calor aumenta su caudal y la temperatura de ventilación (4). Transcurrido un segundo período de verificación, se comprueba que aún existen las necesidades de calefacción, entonces la resistencia eléctrica en el conducto de aire arranca, observando un gran aumento en la temperatura de ventilación, la cual se corresponde ahora a la salida de la resistencia (5).

Una vez cubiertas las necesidades de calefacción, la bomba de calor cambia a modo ACS ya que aunque la temperatura de la parte alta del tanque es suficiente (6), la parte más baja, correspondiente al intercambiador de la bomba de calor, sigue fría (7).

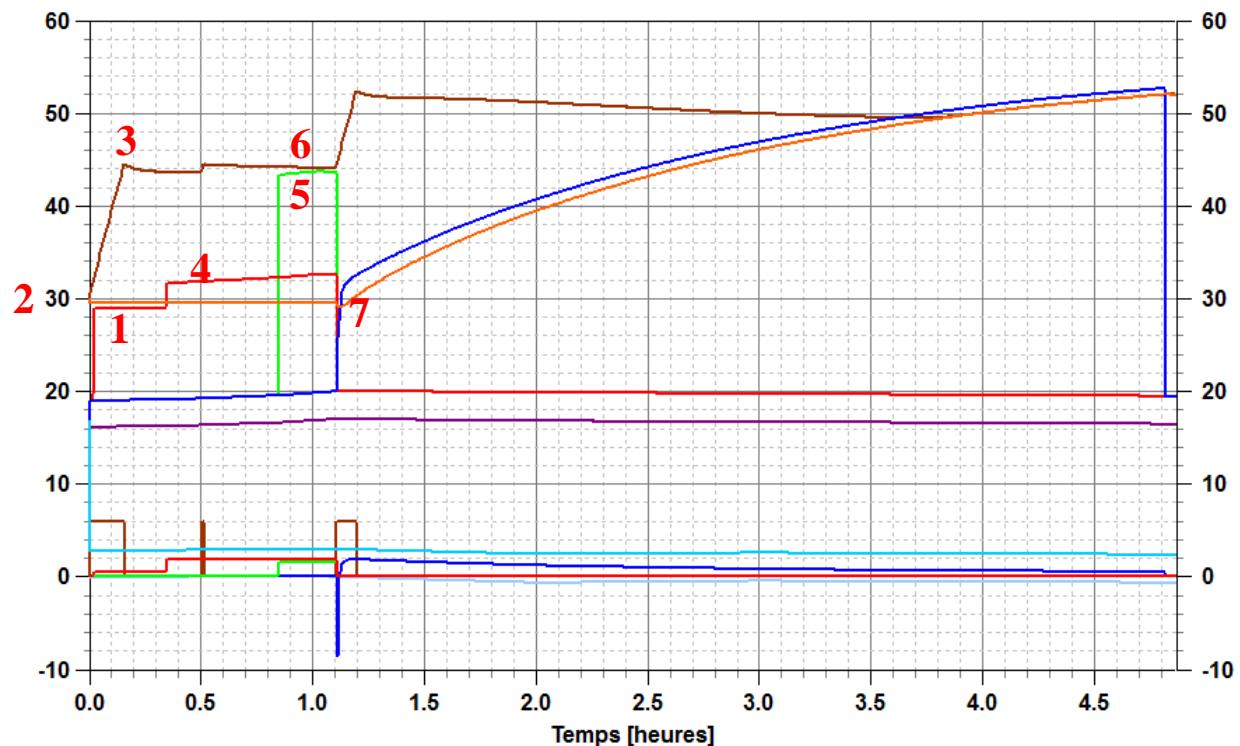


Figura 33 – primeras horas de simulación del caso presentado en la Figura 32

La Tabla 6 muestra distintos parámetros que permiten verificar el buen funcionamiento del sistema híbrido. Con un incremento de tiempo de 20 segundos, el balance de energía es aceptable (5% de diferencia entre energía producida, consumida y perdida).

Tabla 6 – balance de energía del sistema y COP de la bomba de calor en modo calefacción y ACS

Parámetro	Valor	Unidad
Energía producida bomba de calor+resistencia	23.57	kWh
Energía consumida tanque+edificio	19.51	kWh
Pérdidas por ventilación	2.75	kWh
Balance de energía (producida)	5	%
COP real de la bomba de calor en ACS	2.35	-
COP real de la bomba de calor en calefacción	1.14	-

### 5.3. Acoplamiento bomba de calor y colector solar

La Figura 34 muestra la simulación de un día de un acoplamiento de bomba de calor y colector solar. El aparato funciona en doble servicio con calefacción por tanque.

Durante las 10 primeras horas de simulación se puede observar un gran número de ciclos de la bomba de calor (ver elipse de trazo intermitente de color negro). En esta configuración, la bomba de calor se encarga de mantener a temperatura la parte media del tanque, de donde se hace la extracción de agua para alimentar los radiadores de la casa. De esta forma, la bomba

de calor se encarga de que la temperatura de este flujo sea siempre superior a la temperatura de ley de agua de los radiadores cuando haya una necesidad de calefacción.

Por otra parte, la resistencia eléctrica sumergida en el tanque mantiene un nivel de confort necesario para producir el agua caliente sanitaria (ver elipse de trazado intermitente de color violeta). Una vez que la temperatura del colector solar es superior a la temperatura leída por la sonda del intercambiador de calor del tanque (1), entonces la bomba se pone en marcha para hacer circular el agua con glicol del circuito solar, calentando hasta una elevada temperatura el agua del tanque (2).

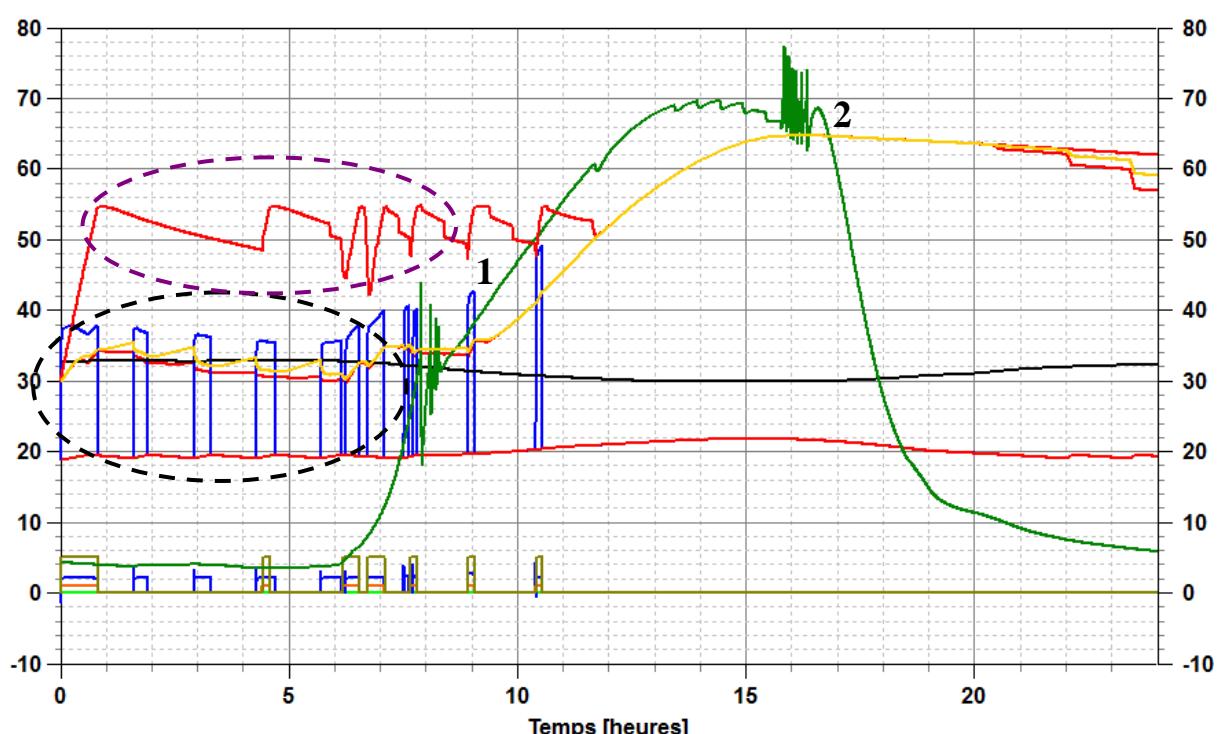


Figura 34 – simulación de un día de una bomba de calor solar híbrida

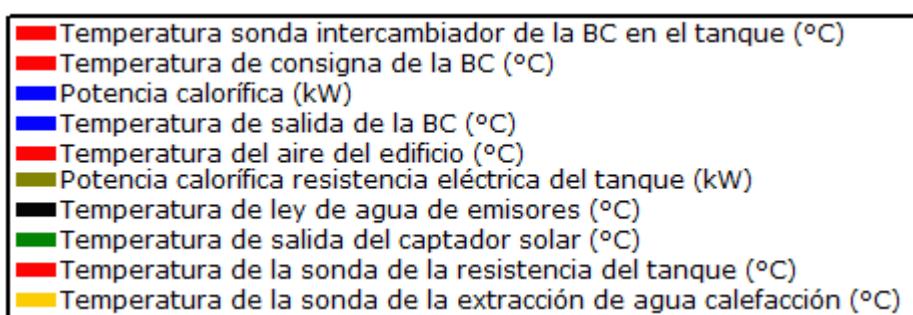


Figura 35 – leyenda de las curvas de la Figura 34

La Tabla 7 muestra distintos parámetros que permiten verificar el buen funcionamiento del sistema híbrido. Con un incremento de tiempo de 20 segundos, el balance de energía es aceptable (5% de diferencia entre energía producida, consumida y perdida).

Tabla 7 – balance de energía del sistema y COP de la bomba de calor en modo calefacción y ACS

Parámetro	Valor	Unidad
Energía producida bomba de calor+colector solar+resistencia+energía extraída del tanque	56.3	kWh
Energía aportada por los intercambiadores del tanque y de la casa	50.9	kWh
Pérdidas de la instalación	2.1	kWh
Balance de energía (producida)	5	%
COP real de la bomba de calor	3.03	-

#### 5.4. Comparación de diferentes generadores – cálculo anual

En esta sección, se presenta una serie de resultados de simulaciones anuales llevadas a cabo con un incremento de tiempo de 20 segundos. Los datos de entrada utilizados para realizar las simulaciones son presentados en el ANEXO 4 -. El objetivo es mostrar la capacidad de cálculo de las herramientas utilizadas.

Se han utilizado las mismas características de edificios, zona climática y ciclos de extracción de agua para las diferentes configuraciones. Lo que varía en cada caso son los tipos de generadores, sus potencias nominales, máximas y mínimas y los caudales. Se busca comparar los siguientes resultados: consumo total por los generadores, factura eléctrica y COP del aparato

El rendimiento del sistema es calculado mediante el cociente entre la energía aportada por los generadores (resistencia, bomba de calor y colector solar) y la energía eléctrica consumida por estos. El confort en calefacción será determinado haciendo el cociente entre el tiempo en que la temperatura del aire es superior a la consigna y el tiempo total de simulación. Análogamente, el confort en ACS será determinado haciendo el cociente entre el tiempo que la temperatura del ACS es superior a la consigna y el tiempo total de simulación.

Los resultados presentados en la Tabla 8 permiten extraer una serie de observaciones:

- El acoplamiento de una bomba de calor y colectores solares consumen la menor cantidad de energía para mantener las consignas de ACS y calefacción. El aprovechamiento de la energía solar sería una de las mejores soluciones en la zona climática simulada (Trappes, Francia). Una bomba de calor de gran potencia (10kW) o un aparato multifunción serían igualmente buenas soluciones.
- Los aparatos que utilizan colectores solares permiten obtener los mejores rendimientos gracias al aporte de energía gratuita del sol. Nuevamente, la bomba de calor se sitúa como el segundo sistema de mayor rendimiento.

- En cuanto al confort, son los aparatos que combinan una caldera a gas los que obtienen un mejor resultado. La ganancia en confort se obtiene gracias a un mayor gasto de energía, con lo cual una factura más elevada.
- La caldera y las resistencias eléctricas son los sistemas que necesitan un mayor consumo de energía para cubrir las necesidades energéticas y, por ende, tienen un menor rendimiento.

Tabla 8 – resultados de simulaciones anuales de diferentes configuraciones

Aparato	Factura anual (€)	Energía consumida (kWh) <sup>8</sup>	Rendimiento del sistema	Confort calefacción (%)	Confort ACS (%)
<b>BC solar híbrida</b>	141.55	1373.97	3.31	98.91	46.78
<b>Bomba de calor</b>	184.66	1775.58	2.93	98.31	55.46
<b>Resistencias eléctricas</b>	552.54	5326.79	0.96	94.58	21.59
<b>Captador solar<sup>9</sup></b>	338.76	2904.23	3.25	74.94	33.94
<b>Caldera Híbrida</b>	575.21	1112.27/6555 <sup>10</sup>	2.45	95.1	93
<b>Caldera</b>	575.38	8078.3	2.35	98.94	95.23
<b>Aparato Multifunción</b>	204.11	2053.8	2.43	99.88	58.39

<sup>8</sup> Debido a un problema en el modelo de edificio, los resultados de Factura anual y Energía consumida podrían no ser representativos.

<sup>9</sup> Para esta configuración, una resistencia eléctrica en el tanque ha sido necesaria para los meses de temperaturas mas bajas. Esta resistencia se encarga de mantener el agua del tanque a una temperatura mayor a 30°C

<sup>10</sup> Energía eléctrica consumida por la BC/energía gas consumida por la caldera

## 6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

En este proyecto se ha descrito paso a paso la metodología seguida para el desarrollo de tres herramientas de simulación: calderas híbridas, bombas de calor solares híbridas y aparatos multifunción. Estos aparatos han sido estudiados y luego conceptualizados para el desarrollo de un módulo de control genérico que, como se ha visto, es utilizable para todo tipo de generador.

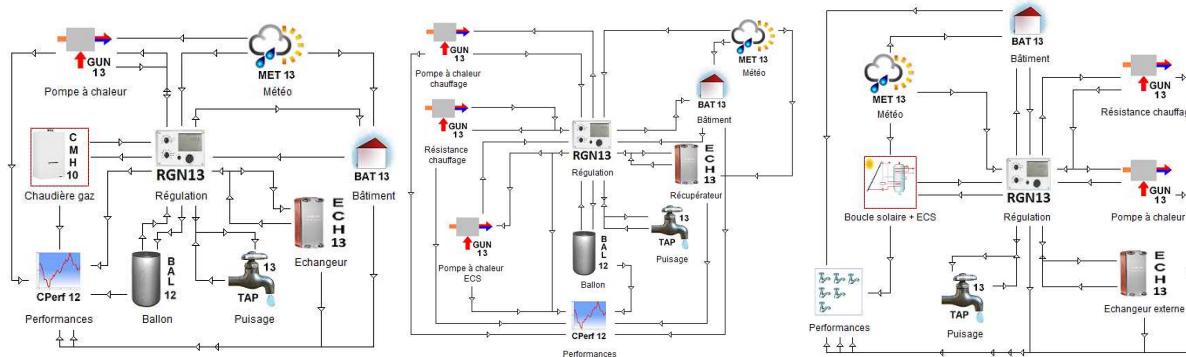


Figura 36 – metamódulos desarrollados en este PFC

El objetivo inicial de este proyecto era de desarrollar, únicamente, una herramienta de simulación de aparatos multifunción. Sin embargo, gracias a la realización de este PFC, se han logrado desarrollar tres herramientas, unidas todas por un módulo de control genérico, el cual será utilizado en los futuros proyectos de CETIAT dentro del campo de la simulación. Estos metamódulos están disponibles en el sitio Web de CETIAT y son de acceso gratuito para sus colaboradores, quienes los utilizan cotidianamente aportando un retorno de información que permite un desarrollo continuo de estas herramientas.

No obstante, incluso si todos los objetivos (y otros no mencionados en este documento) han sido logrados, cabe mencionar un número de dificultades que han tenido que ser superadas:

- El idioma: la capacidad de expresarse resulta clave en el desarrollo de un proyecto para poder intercambiar ideas y así avanzar. Los idiomas son hoy en día esenciales y ya no basta con conocer sólo dos. El conocimiento de tres lenguas debería ser obligatorio.
- El programa utilizado: los modelos de los diferentes componentes presentan a veces muchas limitaciones. Por ejemplo, una de las mayores dificultades en la simulación de aparatos multifunción ha sido el modelo de la bomba de calor, el cual no simula componente por componente. Por esto, las bombas de calor con condensadores en serie para intercambio de energía en dos corrientes distintas no ha podido ser simuladas.

- La experiencia en empresa: mientras que en las mejores universidades francesas (*école des mines de Paris, INSA de Lyon*) la realización de prácticas una vez al año es obligatorio para obtener el título de ingeniero, en el antiguo plan de Ingeniero Químico del CPS se pueden otorgar como máximo 12 créditos a la realización de prácticas en empresas. Esta diferencia no ha sido una dificultad únicamente en la realización del proyecto, sino que incluso antes del comienzo del mismo: una persona sin experiencia que solicita un trabajo está en clara desventaja con respecto a una persona experimentada.
- La información: para la realización del proyecto, una gran cantidad de información ha sido necesaria para determinar el funcionamiento de cada sistema y, más específicamente, determinar los principios de regulación. Este tipo de información celosamente guardada: la competencia entre los propios miembros del GT-SME implica que el acceso a esta información es difícil.

El futuro de estos proyectos y los objetivos para el 2014 están aún por fijar. Sin embargo, ciertas debilidades de estos modelos serán fortalecidas en el futuro, como es el caso del modelo de bomba de calor y edificio. Por otra parte, el desarrollo de BOOST continuará para mantenerse como una herramienta de gran versatilidad.

Este Proyecto Fin de Carrera ha dado lugar a una oferta de trabajo como ingeniero de estudios.

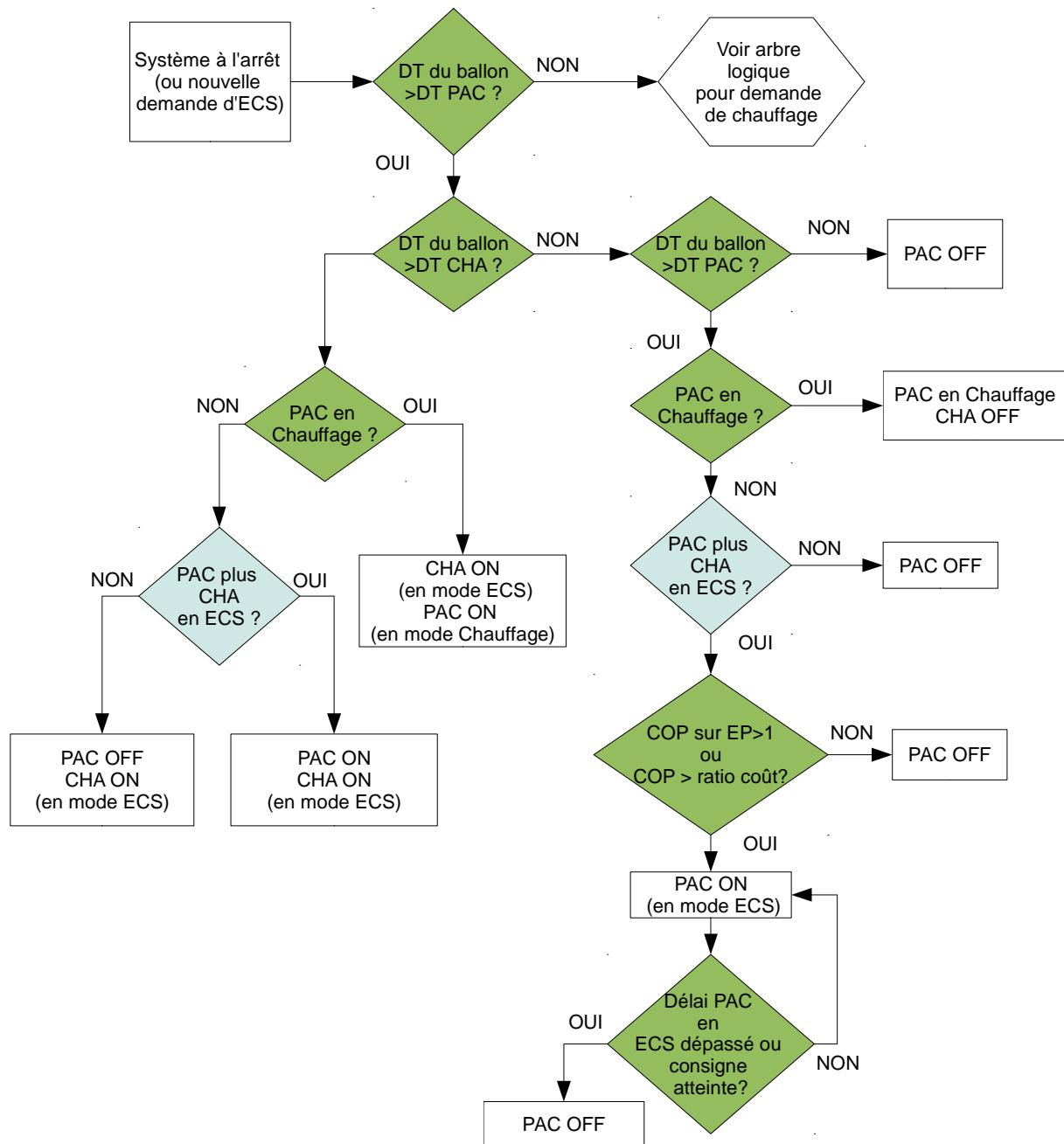
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arrêté du 29 octobre 2012 relatif à l'agrément de la demande de titre V relative à la prise en compte du système « générateur hybride » dans la réglementation thermique 2012, 22 novembre 2012, numero 0272, pagina 18414.
- [2] Paul Mathis: *Les énergies: Comprendre les enjeux*, (2011)
- [3] Alain Garnier. *Le bâtiment à énergie positive: Comment maîtriser l'énergie dans l'habitat*? (2011)
- [4] *Réglementation thermique 2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs*, Avril 2011
- [5] Aldes, *Les systèmes de Températion Domestique :T.Zen 400*, febrero 2011
- [6] Brigitte Vu, *Maison basse consommation (BBC)*, (2010)
- [7] Bruno Herzog, *Le puits canadien*, (2007)
- [8] *RT2012 : L'essentiel à savoir sur la nouvelle réglementation thermique*, PROJECTIM
- [9] *Réglementation thermique 2005 des bâtiments confortables et performants*, (2005)
- [10] Web del fabricante del producto Sol+ <http://www.sonnenkraft.fr/accueil/les-solutions/pompe-a-chaleur-solaire/#hp12m>
- [11] José Luis Llopis Borrás, *Curso práctico de programación en C y C++*, segunda edición, 2001, sección 8.5
- [12] Pedro Jorquera Ferrat, *Modélisation et simulation des chaudières hybrides en mode chauffage et ECS*, septiembre 2012, CETIAT.
- [13] Pedro Jorquera-Ferrat, *Modélisation et simulation d'appareils multifonction pour la production d'ECS et chauffage*, septiembre 2013, CETIAT.
- [14] Pedro Jorquera-Ferrat, *Modélisation et simulation des systèmes couplant solaire thermique et PAC pour la production d'ECS et chauffage au niveau individuel à l'aide du logiciel BOOST*, octubre 2013, CETIAT.



## ANEXO 1 - Árboles lógicos de control de Caldera Híbrida

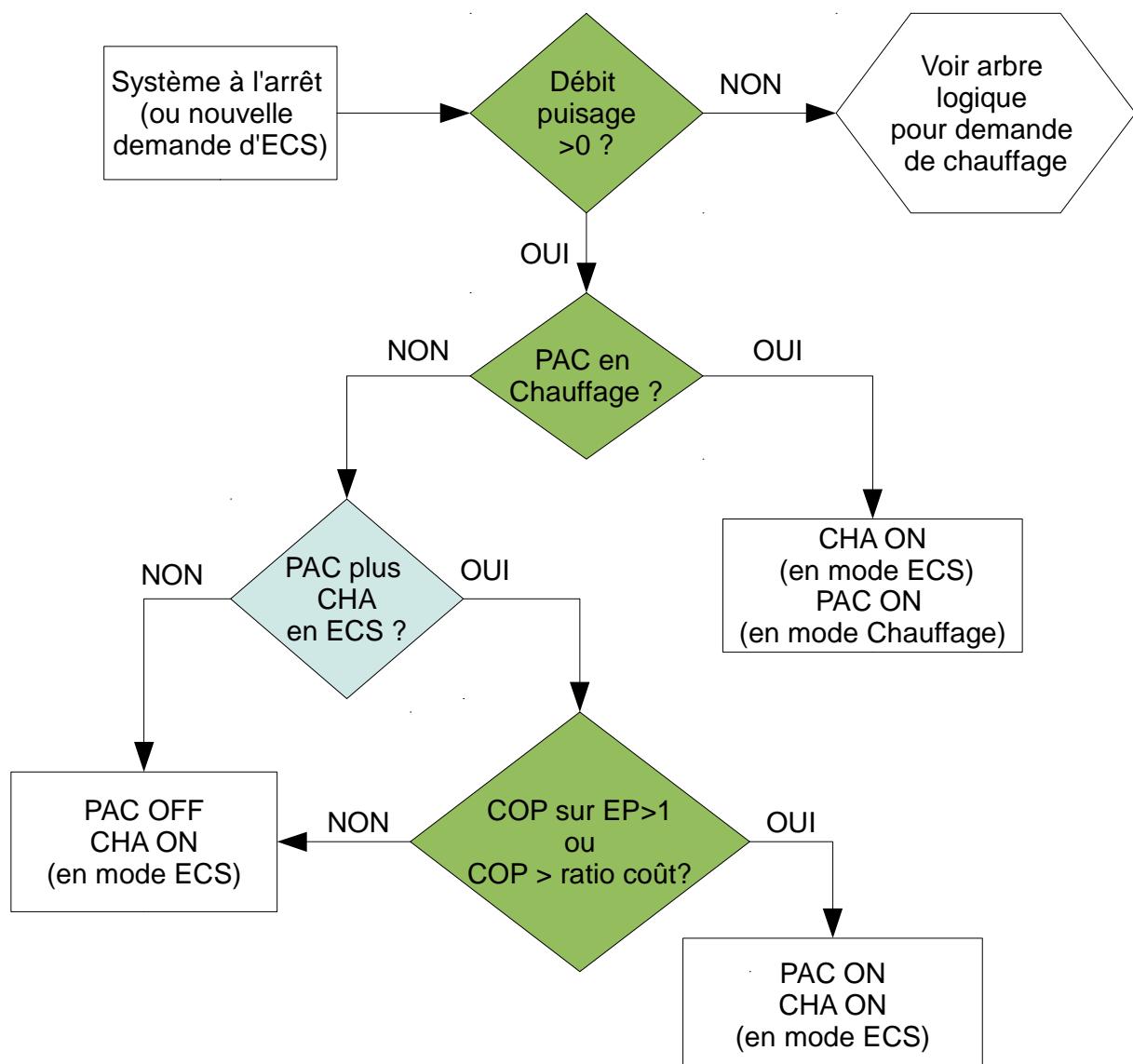
### A. Modo ACS en acumulación (mediante tanque)



#### Code de couleurs

- ◇ Choix utilisateur
- ◆ Tests de régulation

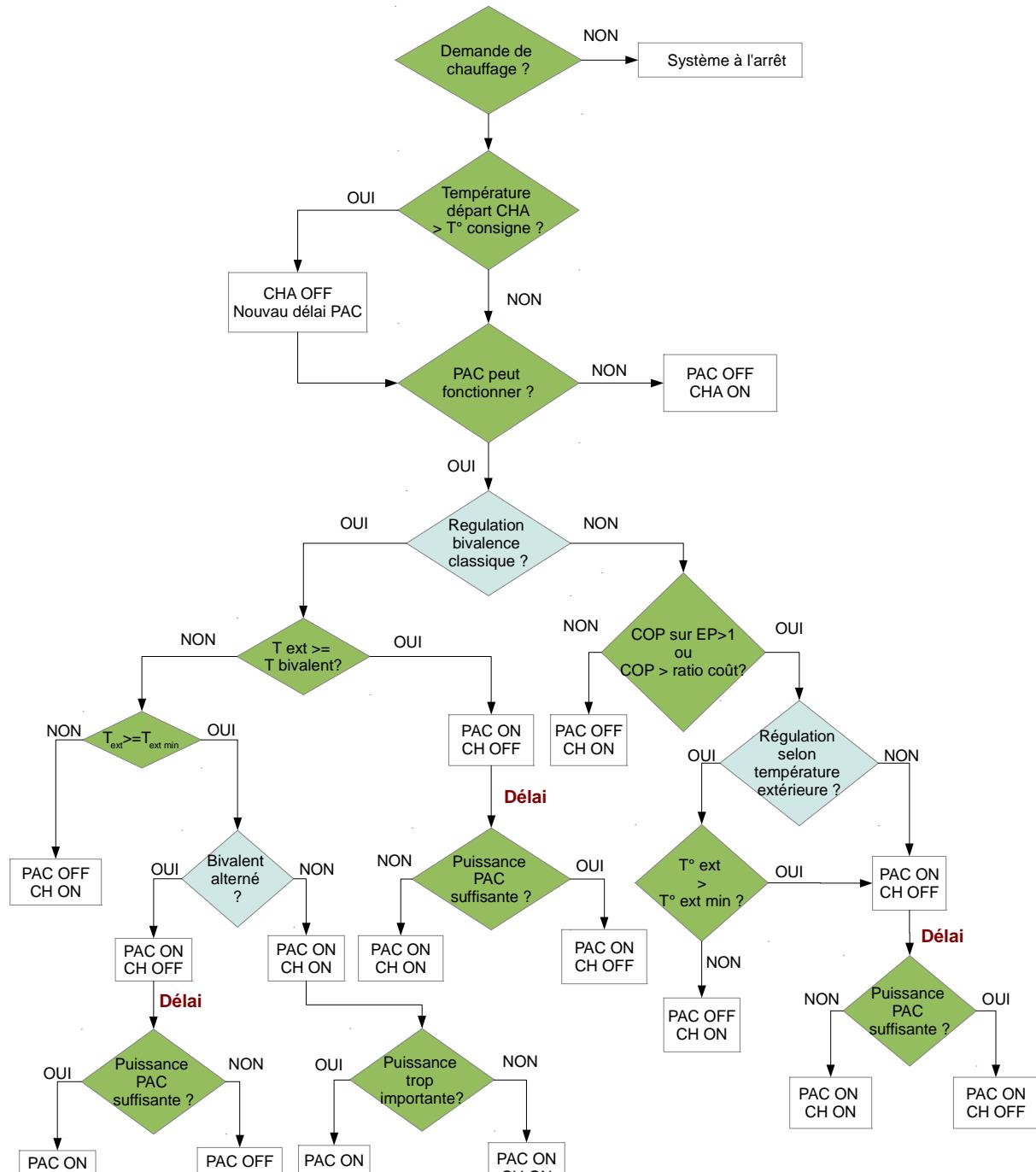
B. Modo ACS en instantáneo (mediante intercambiador de calor)



Code de couleurs

- ◊ Choix utilisateur
- ◊ Tests de régulation

### C. Modo calefacción



#### Code de couleurs

- ◆ Choix utilisateur
- ◆ Tests de régulation



## ANEXO 2 - Descripción en detalle de las funciones de RGN13

El módulo de control posee un conjunto de procedimientos que ejecuta en cada iteración para controlar el sistema. Estos procedimientos permiten adaptar el módulo a cualquier sistema. Por el momento, los aparatos en los cuales el módulo ha sido implementado son: Caldera Híbrida, Acoplamiento de bomba de calor con captor solar y Aparatos Multifunción.

En este anexo, los procedimientos implementados en el módulo genérico son descritos en detalle, presentando su nombre y los datos de entrada y salida.

- Initialisation des systèmes et lignes
  - RGN\_InitSysteme : La fonction va initialiser toutes les variables du système à t=0. Les arguments sont :
    - Système à démarrer,
    - Type de système (chaudière, PAC,...),
    - type d'énergie fournie (CHF, ECS ou les deux),
    - bivalence en chauffage (permission de fonctionner en série ou alterné)
  - RGN\_SetSysServiceDispoEtat : La fonction va déterminer si le système est En Service et Disponible. Les arguments sont :
    - Système à démarrer,
    - Etat de connexion du système
    - Disponibilité du système (bonnes conditions de fonctionnement)
  - RGN\_SetLineState : La fonction permet de mettre au point les lignes qui caractérisent l'appareil. Les arguments sont :
    - Ligne à mettre au point,
    - Hystérésis de démarrage de l'Up système par rapport au Dn Système.
    - Type de service à couvrir par la ligne (ECS ou chauffage),
    - Type de connexion entre les systèmes (Standard si connexion normal),
    - Système en amont de la ligne,
    - Système en aval de la ligne
  - RGN\_SetDataInput : Cette fonction permet de garder les données d'entrée du module dans le vecteur d'état de chaque système. Les arguments sont :
    - Système à rentrer données
    - Température de départ du système
    - Hystérésis d'arrêt du système par rapport à sa température de départ
    - Hystérésis de démarrage du système par rapport à sa température de départ (valeur haut pour ne pas court-circuiter le système).

- Température de consigne du système par rapport à sa température de départ.
- Détermination des besoins d'énergie et besoins de système
  - En fonction de bCHF et bECS gérer les systèmes :
    - RGN\_SetNeededSystem : Fonction qui détermine si le système doit démarrer en ECS ou en Chauffage. Les arguments son :
      - Système à déterminer le besoin
      - Condition qui doit s'accomplir pour demander le système. Au cas contraire, si cette condition ne s'accomplice pas, alors il doit être arrêté.
      - Mode pour lequel le système est demandé.
    - CFG\_GetSystemConfig : Déterminer la configuration du système en fonction des systèmes demandés et du type d'énergie demandé pour chaque système. Les arguments son :
      - Vecteur avec tous les systèmes
      - Mode de production d'ECS (Accumulation-instantané)
      - Sortie : configuration du système
  - Faire connections
    - RGN\_ResetAllLines : La fonction va effacer l'état antérieur des lignes.
    - CFG\_SetLinesToWork : En fonction de la configuration du système, la fonction va mettre en marche les lignes qui conforment la configuration.
    - CFG\_SetSysFlowRate : En fonction de la configuration du système, le débit qui traverse les lignes sera déterminé. Les arguments sont :
      - Vecteur avec tous les systèmes
      - Débit en chauffage de l'appoint ou de la boucle d'appoint
      - Débit en ECS de l'appoint ou de la boucle d'appoint
      - Débit du générateur de chaleur en chauffage
      - Débit du générateur de chaleur en ECS
    - RGN\_MakeLinesConnections : La fonction va parcourir les lignes de l'appareil et si une ligne est En Marche (démarrée en SetLinesToWork) et si la ligne est une ligne de Device Standard, alors les paramètres d'entrée du système en aval de la ligne prendra la valeur des paramètres en amont de la ligne.
    - RGN\_MakeNonStandardConnection : S'il existe de lignes qui sont connectées en Device non Standard (exemple, un piquage supplémentaire du ballon pour alimenter la boucle de chauffage) alors cette fonction se charge d'établir les liens correspondants entre le système en aval et en amont de la ligne. Les arguments sont :

- Lignes non standard d'aller et retour de connexion
- Température d'entrée du système en aval de connexion
- Débit du système en aval de la connexion
- Température de retour du système (en amont de la ligne) en connexion non standard
- Débit du système en connexion non standard en amont de la ligne
- Température de retour du système en aval
- Température de départ du système en connexion non Standard en amont de la ligne
- Débit de la boucle entre le système en amont de la ligne et le système en aval.
- RGN\_CountWorkingTime : La fonction va compter le temps de fonctionnement du système
- Sortir données :
  - RGN\_SetDataOutput : La fonction va récupérer la valeur correspondant au vecteur d'état du système. Les arguments de la fonction sont :
    - Système à récupérer données
    - Besoin de démarrer le système
    - Débit du système
    - Température de retour du système
    - Température de consigne du système
    - Temps de fonctionnement du système



## ANEXO 3 - Datos de entrada para los casos de estudio

### A. Caldera híbrida

Módulo	Dato	Valor	Unidad
Bomba de calor	COP nominal	4	-
	Tipo compresor BC	Inverter	-
	Potencia nominal	4	kW
	Caudal nominal (calefacción)	11.48	l/min
	Caudal nominal (ACS)	17.77	l/min
Edificio	Nivel de inercia	Fuerte	-
	Coeficiente G	0.6	W/m <sup>3</sup> .°C
	Temperatura inicial	19	°C
	Temperatura consigna edificio (normal)	19	°C
	Escenario de reducción RT2012	16	°C
	Tipo emisor	Suelo radiante	-
	Numero emisores	5	u
	Potencia P50 por emisor	3	kW
	Volumen de agua por emisor	7	l
Caldera gas	Potencia mínima	6	kW
	Potencia máxima en calefacción	28	kW
	Potencia máxima en ACS	35	kW
	Caudal nominal en calefacción	10	l/min
	Caudal nominal en ACS	21.5	l/min
Meteo.	Modo de funcionamiento	Calefacción+ACS	-
	Zona	RT2012 : Trappes	-
Extracción	Ciclo de extracción de agua	Ciclo n°2 (EN13203)	
Tanque	Volumen real del tanque	120	l
	Masa del tanque vacío	0	kg
Control	Tipo de regulación	COP en EP	-
	Tiempo verificación potencia BC	30	min
	Temperatura exterior mínima (ley de agua)	-9	°C
	Temperatura exterior máxima (ley de agua)	15	°C
	T° de entrada de emisores a T° exterior min.	25	°C
	T° de entrada de emisores a T° exterior max.	35	°C
	T° de salida máxima BC en calefacción	48	°C
	T° de salida máxima BC en ACS	48	°C
	Temperatura de consigna ACS	52,5	°C
	Histéresis arranque caldera en ACS	10	°C
	Histéresis arranque BC en ACS	6	°C
	Tiempo max. de funcionamiento BC en ACS	90	Min
	Tipo de extracción de agua	Energía	-

### B. Aparato Multifunción

Módulo	Dato	Valor	Unidad
BC calefacción	Potencia nominal	2	kW
	COP nominal	3	-
	Rho*Cp del fluido	1.214	KJ/m <sup>3</sup> .kg
	Caudal nominal	120	m <sup>3</sup> /h
	Tipo compresor	Inverter	-
BC ACS	Potencia nominal	3	kW
	COP nominal	4	-
	Rho*Cp del fluido	4185	kJ/m <sup>3</sup> .kg
	Caudal nominal	16.8	l/min
	Tipo compresor	Inverter	-
Resistencia calefacción	Potencia nominal	1.5	kW
	Rho*Cp del fluido	1.214	KJ/m <sup>3</sup> .kg
	Caudal nominal	120	m <sup>3</sup> /h
Casa	Nivel de inercia	Fuerte	-
	Coeficiente G	0.4	W/m <sup>3</sup> .°C
	Temperatura inicial	19	°C
	Temperatura de consigna	19	°C
	Escenario de reducción RT2012	16	°C
	Ventilación	ON	On/Off
	Calefacción por emisores	OFF	On/Off
Meteo.	Zona (RT2012)	Trappes	-
	Dia	25	-
Extracción	Ciclo de extracción	Ciclo n°3	-
Tanque	Volumen del tanque	150	L
	Masa del tanque vacío	80	kg
	Diámetro interior del tanque	0.45	M
	Constante de enfriamiento	0.2	Wh/24h.l.K
	Posición intercambiador	0.45	0-1
	Posición resistencia	0.65	0->1
	Potencia resistencia	6000	W
Control	Temperatura consigna BC en calefacción	42	°C
	Temperatura consigna BC en ACS	60	°C
	BC y resistencia en serie	Si	S/N
	Tiempo máximo de funcionamiento BC en calefacción	30	min
	Temperatura máxima de aire caliente	48	°C
	Permitir modo Boost	Si	O/N
	Tiempo para encender modo Boost	20	min
	Histéresis de producción de ACS	2	K
	Temperatura de consigna ACS	50	°C
	Histéresis de arranque resistencia ACS	6	K
	Histéresis de arranque BC en ACS	2	°C
	Tipo de ciclo de extracción	Energía	Menú
	Tiempo máximo de funcionamiento BC en ACS	60	min
	Tipo de control de resistencia	Tarifa horaria	Menú
	Reducción de consigna en ACS	5	K

	Sonda de control de ACS	Sonda de resistencia	-
--	-------------------------	----------------------	---

### C. Bomba de calor solar híbrida

Módulo	Dato	Valor	Unidad
Circuito solar	Superficie del colector	6	m <sup>2</sup>
	Rendimiento óptico	0.8	-
	Coeficiente de pérdidas de 1er orden	3.5	W/m <sup>2</sup> .K
Bomba de calor	Potencia nominal	3	kW
	COP nominal	4	-
	Fuente de aire	Exterior	-
Res. calefacción	Potencia nominal	4	kW
Casa	Nivel de inercia	Fuerte	-
	Coeficiente G	0.6	W/m <sup>3</sup> .°C
	Temperatura inicial	19	°C
	Temperatura consigna	19	°C
	Escenario de reducción RT2012	16	°C
	Tipo de emisor	Suelo radiante	-
Extracción	Ciclo de extracción de agua	Ciclo n°4 (EN13203)	-
Meteo.	Zona	RT2012 : Trappes	-
Tanque	Volumen del tanque	500	1
	Posición del intercambiador solar	0.05	[0-1]
	Altura del intercambiador solar	0.25	[0-1]
	Posición de la sonda solar	0.15	[0-1]
	Posición del intercambiador BC	0.31	[0-1]
	Altura intercambiador BC	0.35	[0-1]
	Posición sonda BC	0.6	[0-1]
	Potencia resistencia eléctrica	5	kW
	Posición de la resistencia	0.75	[0-1]
	Posición de la sonda de la resistencia	0.8	[0-1]



## ANEXO 4 - Datos de entrada para las simulaciones anuales

### A. Acoplamiento bomba de calor y colector solar

Módulo	Variable	Valor
Meteorología	Origen de datos	RT 2012, Trappes, Francia
Bomba de calor	Tipo	Aire-agua
	Tecnología compresor	Inverter
	COP nominal (7/35°C)	4
	Potencia nominal	3kW
	Caudal	6l/min
	Tiempo de anti-ciclaje	300s
Casa	Superficie	100m <sup>2</sup>
	Inercia	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Coeficiente UBat	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Caudal ventilación	120m <sup>3</sup> /h
	Emisores	Suelo radiante
	Volumen emisores	70l
Intercambiador externo	Potencia a 50°C	15kW
	Tipo	Rendimiento constante
	Rendimiento	90%
Extracción de agua	Caudal circuito ACS	6l/min
	Ciclo	nº4 (EN13203)
Colector solar	Superficie	6m <sup>2</sup>
	Coeficiente de primer orden (a1)	3.5W/m <sup>2</sup> /K
	Coeficiente perdidas segundo orden	0.01 W/m <sup>2</sup> /K
	Coeficiente de pérdidas por viento	0J/m <sup>3</sup> /K
	Capacidad térmica efectiva	350J/m <sup>2</sup> /K
	Inclinación	45°
Tanque	Volumen	500l
	Diámetro interior	0.7m
	Resistencia eléctrica	5kW
	Posición resistencia	0.75
Bomba solar	Caudal	4l/min
	Potencia nominal	70W
Control	Temperatura consigna ACS	52.5°C
	Funcionamiento BC y resistencia	Alternado
	Control resistencia	Tarifa período nocturno/diurno
	Tipo de calefacción	Por tanque

### B. Bomba de calor

Módulo	Variable	Valor
Meteorología	Origen de datos	RT 2012, Trappes, Francia
Bomba de calor	Tipo	Aire-agua
	Tecnología compresor	Inverter

	COP nominal (7/35°C)	4.3
	Potencia nominal	10kW
	Caudal	12l/min
	Tiempo de anti-ciclaje	300s
Casa	Superficie	100m <sup>2</sup>
	Inercia	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Coeficiente UBat	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Caudal ventilación	120m <sup>3</sup> /h
	Emisores	Suelo radiante
	Volumen emisores	70l
	Potencia a 50°C	15kW
Extracción de agua	Ciclo	n°4 (EN13203)
Tanque	Volumen	150l
	Diámetro interior	0.4m
Control	Temperatura consigna ACS	52.5°C
	Tipo de calefacción	Directo bomba de calor

### C. Resistencias eléctricas

Módulo	Variable	Valor
Casa	Origen de datos	RT 2012, Trappes, Francia
	Superficie	100m <sup>2</sup>
	Inercia	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Coeficiente UBat	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Caudal ventilación	120m <sup>3</sup> /h
	Emisores	Suelo radiante
	Volumen emisores	70l
Extracción de agua	Potencia a 50°C	15kW
Tanque	Ciclo	n°4 (EN13203)
	Volumen	500l
	Diámetro interior	0.7m
	Potencia resistencia	6kW
	Posición	0.75
Resistencia calefacción	Potencia resistencia	6kW
	Caudal de resistencia	6l/min
Control	Temperatura consigna ACS	52.5°C
	Control resistencia	Tarifa período nocturno/diurno
	Tipo de calefacción	Directo resistencia

### D. Colector solar

Módulo	Variable	Valor
Casa	Origen de datos	RT 2012, Trappes, Francia
	Superficie	100m <sup>2</sup>
	Inercia	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Coeficiente UBat	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Caudal ventilación	120m <sup>3</sup> /h
	Emisores	Suelo radiante

	Volumen emisores	70l
	Potencia a 50°C	15kW
Intercambiador externo	Tipo	Rendimiento constante
	Rendimiento	90%
	Caudal circuito ACS	6l/min
Extracción de agua	Ciclo	nº4 (EN13203)
Colector solar	Superficie	12m <sup>2</sup>
	Coeficiente de primer orden (a1)	3.5W/m <sup>2</sup> /K
	Coeficiente perdidas segundo orden	0.01 W/m <sup>2</sup> /K
	Coeficiente de pérdidas por viento	0J/m <sup>3</sup> /K
	Capacidad térmica efectiva	350J/m <sup>2</sup> /K
Tanque	Inclinación	45°
	Volumen	1000l
	Diámetro interior	0.7m
Bomba solar	Potencia resistencia eléctrica	6kW
	Caudal	4l/min
Control	Potencia nominal	70W
	Temperatura consigna ACS	52.5°C
	Tipo de calefacción	Por tanque
	Temperatura de arranque resistencia	30°C

## E. Caldera Híbrida

Módulo	Variable	Valor
Meteorología	Origen de datos	RT 2012, Trappes, Francia
Bomba de calor	Tipo	Aire-agua
	Tecnología compresor	Todo o nada
	COP nominal (7/35°C)	4
	Potencia nominal	3kW
	Caudal nominal (calefacción – ACS)	11.48l/min – 17.77l/min
	Tiempo de anti-ciclaje	300s
Casa	Superficie	100m <sup>2</sup>
	Inercia	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Coeficiente UBat	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Caudal ventilación	120m <sup>3</sup> /h
	Emisores	Suelo radiante
	Volumen emisores	75l
	Potencia a 50°C	15kW
Extracción de agua	Ciclo	nº4 (EN13203)
Caldera	Potencia nominal máxima	28kW/35kW <sup>11</sup>
	Potencia nominal mínima	6kW
	Caudal nominal calefacción - ACS	10l/min - 21.5l/min
	Pérdidas en detención (a DT30°C)	97W
	Volumen de intercambiador	10l
	Volumen caldera	20l

<sup>11</sup> Potencia máxima en modo calefacción/ACS

	Control PID (proporcional/integral/derivado)	0.2/0.8/0
Tanque	Volumen	500l
	Diámetro interior	0.7m
	Posición del intercambiador (0-1)	0.3
	Altura del intercambiador (0-1)	0.7
Bomba solar	Caudal	4l/min
	Potencia nominal	70W
Control	Temperatura consigna ACS	52.5°C
	Funcionamiento BC y caldera	En serie
	Temperatura máxima salida BC en ACS	50
	Tipo de regulación	COP en EP

## F. Caldera

Módulo	Variable	Valor
Meteorología	Origen de datos	RT 2012, Trappes, Francia
Caldera	Potencia nominal máxima	28kW/35kW <sup>12</sup>
	Potencia nominal mínima	6kW
	Caudal nominal calefacción - ACS	10l/min - 21.5l/min
	Pérdidas en detención (a DT30°C)	97W
	Volumen de intercambiador	10l
	Volumen caldera	20l
	Control PID (proporcional/integral/derivado)	0.2/0.8/0
	Superficie	100m <sup>2</sup>
	Inercia	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
Casa	Coeficiente UBat	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Caudal ventilación	120m <sup>3</sup> /h
	Emisores	Suelo radiante
	Volumen emisores	70l
	Potencia a 50°C	15kW
Extracción de agua	Ciclo	n°4 (EN13203)
Tanque	Volumen	500l
	Diámetro interior	0.7m
	Resistencia eléctrica	5kW
	Posición resistencia	0.75
	Temperatura consigna ACS	52.5°C
Control	Temperatura consigna edificio – (normal)	19°C
	Temperatura consigna edificio (reducida)	16°C

## G. Aparato Multifunción

<sup>12</sup> Potencia máxima en modo calefacción/ACS

Módulo	Variable	Valor
Meteorología	Origen de datos	RT 2012, Trappes, Francia
Bomba de calor	Tipo (calefacción/ACS)	Aire-Aire/Aire-agua
	Tecnología compresor	Inverter
	COP nominal (7/35°C, calefacción/ACS)	3/4
	Potencia nominal (calefacción/ACS)	2kW/3kW
	Caudal nominal (calefacción – ACS)	120m <sup>3</sup> /h – 16.8l/min
	Tiempo de anti-ciclaje	300s
Resistencia calefacción	Potencia nominal	1.5kW
	Tiempo de anti-ciclaje	200s
Casa	Superficie	100m <sup>2</sup>
	Inercia	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Coeficiente UBat	0.4W/m <sup>2</sup> /°C
	Caudal ventilación	120m <sup>3</sup> /h
	Emisores	Suelo radiante
	Volumen emisores	70l
	Potencia a 50°C	15kW
Recuperador de calor	Tipo	Rendimiento constante
	Rendimiento	85%
Extracción de agua	Ciclo	n°4 (EN13203)
Tanque	Volumen	150l
	Diámetro interior	0.45m
	Resistencia eléctrica	6kW
	Posición resistencia	0.8
Control	Temperatura consigna ACS	52.5°C
	Funcionamiento BC y resistencia	Alternado
	Control resistencias	Tarifa período nocturno/diurno
	Caudal de aire extraído suplementario en modo Boost	280m <sup>3</sup> /h



## ANEXO 5 - Ficha de evaluación de las prácticas

41959



UniVersa  
Servicio de Orientación  
y Empleo  
Universidad Zaragoza  
1542

### EVALUACIÓN FINAL DE LA PRÁCTICA

(Cumplimentar por el alumno. Si alguno de los datos no es correcto modificalo)

Si quieres el CERTIFICADO de tus prácticas. Sólicitalo en UNIVERSA cuando entregues esta evaluación.

#### DATOS PERSONALES

Apellidos y Nombre: JORQUERA FERRAT, PEDRO ADOLFO

Teléfono Móvil: 657/666654 E-mail: 580412@celes.unizar.es

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

#### CARACTERÍSTICAS DE LA PRÁCTICA

Fecha de inicio de la práctica: 15/04/2013 Fecha de fin de la práctica: 30/09/2013

Horas realizadas: 0

Tutor Académico: D. Jesús Guallar Paracuellos

Nombre de la Entidad: CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES AÉRAULIQUES ET THERMIQUES

Tutor en la Entidad: D. Julien Heintz

¿Has recibido contraprestación económica por la realización de la práctica? Sí  No

#### Tareas realizadas:

\* Desarrollo del Proyecto Fin de Carrera en el Área de Simulación de Sistemas Térmicos. Sistemas de climatización que integran bomba de calor. Estudio de las eficiencias energéticas mediante simulación numérica.

(Ampliarlas si es necesario)

### ❖ VALORACIÓN PERSONAL

	BAJO	2	3	4	ALTO
	1				5
Contenido de la práctica				X	
Adecuación de las tareas a la titulación				X	
Formación recibida					X
Ambiente de trabajo					X
Cooperación de la empresa					X
Experiencia adquirida					X
Adecuación de la duración de la práctica					X

### ❖ TRAS EL PERIODO DE PRÁCTICA

- No has recibido oferta de trabajo  
 Has recibido oferta de trabajo y la has aceptado

Modalidad de contrato: *Contrato de duración indeterminada*

Duración del contrato: *Indeterminada*

Fecha de incorporación: *Diciembre*

- Has recibido oferta de trabajo y la has rechazado

Motivos:

.....

### ❖ CONCLUSIONES

*Los 6 meses de prácticas en CETIAT me han permitido desarrollarme como profesional. He aprendido habilidades no sólo técnicas, sino también personales, las cuales considero fundamentales para el éxito en un ambiente laboral y empresarial.*

*Gracias a Universidad y CETIAT he vivido una experiencia enriquecedora, la cual debería ser obligación en el Plan de Estudios y tomar una gran importancia para la obtención del título.*

Fecha de presentación: *4 de noviembre de 2013*



Fdo: JORQUERA FERRAT, PEDRO ADOLFO



**ASSESSMENT QUESTIONARIE**  
(To be completed by the Tutor in the Company)

NAME OF THE STUDENT: JORQUERA FERRAT, PEDRO ADOLFO

UNIVERSITY GRADE: INGENIERÍA QUÍMICA

NAME OF THE TUTOR IN THE COMPANY: D. Julien Heintz

NAME OF THE COMPANY: CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES AÉRAULIQUES ET THERMIQUES

START DATE: 15/04/2013

END DATE: 30/09/2013

HOURS WORKED: 1000

**STUDENT STATUS IN THE COMPANY**

- Department: *ventilation* Division
- Department:

**TASKS PERFORMED.** Specify the tasks carried out by the student and the percentage of time devoted

	%
<i>Development of a simulation tool for small fresh air systems within buildings</i>	80
<i>Calculation for the European directive on energy related products</i>	5
<i>Documentation - state of the art on ventilation system design by NAFS</i>	5
<i>Development of a simulation tool for tanks following the standard EN 13207 (comparison with existing data)</i>	10
<b>TOTAL</b>	<b>100 %</b>

**COMPUTER**

- *Office 2003, word, excel, power point, internet, company software*
- *Autodesk AutoCAD*
- *Microsoft Word, Excel, Power Point, Internet, company software*

**APPLIED KNOWLEDGE**

- *Programmation in C++*
- *Industrial Software: Thermodynamics, heat transfer, system HVAC, fluid dynamics*
- *...*

**FUTURE EXPECTATIONS AFTER THE INTERNSHIP:**

Area and activity in which the student is more gifted:

- *Programmation, system control, fluid dynamics*
- *Industrial Software: Thermodynamics, heat transfer, system HVAC, fluid dynamics*

Hiring expectations after the internship

The student has been hired at the end of the internship

Yes  No

The student will be offered a position in a near future:

Yes  No

Would you recommend to another company the hiring of the student?

Yes  No

**COMENTS**

.....  
.....

## ASSESSMENT (1=low; 5=high)

1 2 3 4 5

## PROFESIONAL ASSESSMENT

Knowledge:				X
Learning:				X
Efficiency:				X
Responsibility:				X
Autonomy:				X
Speed and mental agility:				X
Quality on the entrusted tasks:				X

## SOCIAL SKILLS

Communication and written fluency:				X
Negotiation:			X	
Teamwork:				X
Courtesy and kindness:				X
Collaboration:				X

## PERSONAL ASSESSMENT

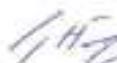
Self-confidence and maturity:				X
Constancy:				X
Flexibility:				X
Ambition:				X
Enthusiasm and vitality:				X
Initiative:			X	
Discipline:				X
Attendance and punctuality:				X
Professional appearance:				X

## GLOBAL MARK OF THE INTERNSHIP

9

This questionnaire, in addition to evaluate the student, is used by UNIVERSA to prepare a certificate of the internship period. Once the certificate is delivered to the student, he/she will take it personally for its signature; therefore, we ask for your consent to use the certificate  YES  NO

Signature: D. Julien Heintz



Once filled up this questionnaire, please send it scanned by e-mail to: universa@unizar.es

Correlado Cntdor: False