



**Diagnóstico de fallos de un
sistema de calefacción utilizando
Posibles Conflictos**

Luis Miguel Villarroel Mediavilla

Septiembre 2015

Tutores: Dr. Belarmino Pulido Junquera

Dr. Carlos Alonso González

Agradecimientos

Me gustaría dedicar esta sección a todas las personas que hicieron posible este TFM:

Mis tutores, Belarmino y Carlos, que me dieron la oportunidad de comenzar esta aventura e iniciarme en el mundo de la investigación. Sus ideas, consejos, sugerencias y correcciones me han llevado incluso a planteármelo como idea de futuro.

Greg Provan y Raymond Sterling, profesores de la University College Cork y la National University of Ireland, respectivamente, ya que sin sus modelos, su colaboración y su paciencia a la hora de resolver nuestras dudas, este TFM no habría visto la luz.

Los miembros del GSI, cuya impronta ha quedado reflejada en las diferentes partes del trabajo.

Mi familia y amigos, que se interesaron en todo momento por el avance del proyecto y me animaron a seguir en la brecha.

Y por último, pero no menos importante, mis compañeros de café, el mejor momento del día en estos meses.

Gracias a todos.

Resumen

El siguiente TFM aborda el estudio de un sistema HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning – Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado) real y en funcionamiento, y la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial para posibilitar el diagnóstico de fallos del mismo.

El trabajo tiene como puntos de partida un modelo en Modelica del sistema y varias colecciones de datos de funcionamiento, cedidas por los creadores de la réplica software, que son combinados para localizar posibles fuentes de fallo. Para ello, debe analizarse qué tipo de defectos pueden afectar al aparato y cómo. El objetivo es buscar los Posibles Conflictos (PCs) del sistema y construir sus modelos asociados.

Por otra parte, se construye un pequeño demostrador Java para comprobar la corrección “post-mortem” (a posteriori), tanto en modo nominal como en presencia de diversos modos de fallo.

El marco teórico que engloba el trabajo es el Diagnóstico Basado en Modelos (DBM), y en particular la aproximación de Diagnóstico basado en Consistencia (DBC). La herramienta principal a utilizar son los Posibles Conflictos. Esto permite no sólo detectar cuándo se produce un fallo, sino también localizar la causa del comportamiento anómalo.

Abstract

This Master's Final Thesis addresses the study of a real, up and running HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) system, and the application of Artificial Intelligence techniques to make the diagnosis of its faults possible.

The work initiates from a Modelica model of the system and several operational data collections, handed over by the creators of the software replica, which are combined in order to find eventual fault sources. To do that, the different types of flaws must be analyzed so as to realize how they could affect the device. The main objective is to search for the Possible Conflicts of the system and to build their associated models.

Furthermore, a small Java application must be developed to make a "post-mortem" (this is, a posteriori) correction, in nominal mode as well as under all kinds of identified faults.

The theoretical framework that comprehends this Thesis is the Model-Based Diagnosis (MBD), and more specifically the Consistency-Based Diagnosis (CBD) approach. The main tool to use is called Possible Conflicts (PCs). This allows not only to detect when a fault appears, but also to isolate the cause of the abnormal behaviour.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	3
Resumen.....	5
Abstract	7
Tabla de Contenidos.....	9
1.- Introducción	17
2.- Conceptos básicos.....	21
2.1.- Sistemas HVAC	21
2.1.1.- ¿Qué son?	21
2.1.2.- ¿Cómo funcionan?	22
2.2.- El concepto de fallo.....	23
2.3.- Diagnóstico de fallos	24
2.3.1.- Diagnóstico Basado en Modelos y Posibles Conflictos	24
2.4.- OpenModelica.....	25
3.- Sistema AHU-09	29
3.1.- Suposiciones iniciales.....	31
3.2.- Módulo mezclador (Mixing Box - MB)	31
3.2.1.- Estructura del módulo y variables internas	32
3.2.2.- Ecuaciones de funcionamiento	33
3.2.3.- Componentes asociados	33
3.3.- Módulo calefactor (Heating Coil - HC)	34
3.3.1.- Estructura del módulo y variables internas	36
3.3.2.- Ecuaciones de funcionamiento	37
3.3.3.- Componentes asociados	37
3.4.- Módulo refrigerador (Cooling Coil - CC).....	38
3.4.1.- Estructura del módulo y variables internas	39
3.4.2.- Ecuaciones de funcionamiento	40
3.4.3.- Componentes asociados	40
3.5.1.- Estructura del módulo y variables internas	41
3.5.2.- Ecuaciones de funcionamiento	42
3.5.3.- Componentes asociados	42
3.6.- Experimentos reales sobre el AHU-09	43
3.6.1.- Experimento 1: Funcionamiento nominal (1 de Junio de 2013).....	44

3.6.2.- Experimento 2: Funcionamiento nominal (6 de Septiembre de 2012)	47
3.6.3.- Experimento 3: Funcionamiento nominal (7 de Febrero de 2013)	51
3.6.4.- Experimento 4: Fuga en la bobina enfriadora (27 de Marzo de 2013).....	55
4.- DBC con PCs del sistema AHU-09.....	63
4.1.- Obtención de Posibles Conflictos.....	63
4.2.- PCs en el AHU-09	65
4.2.1.- PC1 – Temperatura de salida	68
4.2.2.- PC2 – Humedad de salida.....	75
4.3.- Modos de fallo	77
4.3.1.- Matriz de Firmas de Fallo Cualitativa.....	81
5.- Validación Sistema de Diagnósis	87
6.- Resultados de la diagnóstico	111
6.1.- Resultados del diagnóstico	111
7.- Conclusiones	115
7.3.- Posibles líneas de trabajo futuras.....	115
Lista de términos.....	117
Referencias.....	121
Apéndice A: Código del AHU-09.....	125
Ejemplo de componente principal: HVAC_GSI.Mixing_Box.....	¡Error! Marcador no definido.
Ventilador: HVAC_GSI.Sources.Fan_Simplified.....	¡Error! Marcador no definido.
Bomba de agua: HVAC_GSI.Sources.Pump_Simplified	¡Error! Marcador no definido.
Fuente de aire: HVAC_GSI.Sources.Pneumatic_Volume	¡Error! Marcador no definido.
Fuente de agua: HVAC_GSI.Sources.Hydraulic_Volume.....	¡Error! Marcador no definido.
Válvula de paso: HVAC_GSI.Sources.Valve	¡Error! Marcador no definido.
Apéndice B: Herramienta de cálculo de residuos y detección de fallos	127
Requisitos	127
Casos de Uso	127
Diagrama de Clases	128
Diagramas de Secuencia.....	130

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama psicrométrico con la zona de confort higrotérmico .	21
Figura 2: El sistema AHU09 real sobre el tejado de la escuela de música en Cork, Irlanda.....	29
Figura 3: Modelo esquemático del sistema AHU09	30
Figura 4: Módulo mezclador del modelo esquemático del AHU-09	32
Figura 5: Mapeo de la señal de entrada al Módulo Mezclador	34
Figura 6: Módulo calefactor del modelo esquemático del AHU-09.....	34
Figura 7: Intercambiador de calor con flujo paralelo.....	35
Figura 8: Intercambiador de calor con flujo a contracorriente.....	35
Figura 9: Intercambiador de calor con flujo cruzado sin mezcla de corrientes	36
Figura 10: Histéresis de la válvula de los intercambiadores de calor	37
Figura 11: Sección de un deshumidificador de aire genérico	38
Figura 12: Módulo deshumidificador completo del modelo del AHU-09	38
Figura 13: Módulo humidificador y salida de aire del modelo esquemático del AHU-09	41
Figura 14: Temperaturas de entrada al MB del experimento 1 (01/06/2013)	45
Figura 15: Humedades específicas de entrada al MB del experimento 1.....	45
Figura 16: Señales de control de componentes del experimento 1	46
Figura 17: Temperatura por componentes. Experimento 1	46
Figura 18: Detalle de las temperaturas por componentes. Experimento 1.....	47
Figura 19: humedad específica por componentes. Experimento 1	47
Figura 20: Temperaturas de entrada al MB del experimento 2 (06/09/2012)	48
Figura 21: Humedades específicas de entrada al MB del experimento 2.....	48
Figura 22: Temperaturas del agua calefactora y enfriadora. Experimento 2	49
Figura 23: Señales de control de componentes del experimento 2	49
Figura 24: Efecto del enfriamiento de la bobina refrigeradora en la temperatura. Experimento 2.....	50
Figura 25: Efecto completo de la deshumidificación en la temperatura. Experimento 2	50
Figura 26: Resultado de la deshumidificación en la humedad específica. Experimento 2	51
Figura 27: Temperaturas de entrada al MB del experimento 3 (07/02/2013)	51
Figura 28: Humedades específicas de entrada al MB del experimento 3.....	52
Figura 29: Señales de control de componentes. Experimento 3	52
Figura 30: Resultado del enfriamiento en la temperatura. Experimento 3.....	53
Figura 31: Resultado del enfriamiento en la temperatura (zoom). Experimento 3.....	53
Figura 32: Resultado del enfriamiento y posterior calentamiento en la temperatura. Experimento 3.....	54
Figura 33: Resultado del calentamiento y la humidificación sobre la temperatura. Experimento 3.....	54
Figura 34: Temperaturas de salida del MB y del humidificador del experimento 3.....	54
Figura 35: Humedad específica por componentes. Experimento 3.....	55
Figura 36: Temperaturas de entrada al MB del experimento 4 (27/03/2013)	56
Figura 37: Humedades específicas de entrada al MB del experimento 4.....	56
Figura 38: Temperaturas del agua calefactora y enfriadora del exp. 4	57
Figura 39: Señales de control de componentes. Experimento CC_Leakage del 07/02/2013	57

Figura 40: Resultado del enfriamiento en la temperatura. Experimento 4	58
Figura 41: Resultado del calentamiento en la temperatura. Experimento 4.....	58
Figura 42: Resultado de la humidificación en la temperatura. Experimento 4	59
Figura 43: Resultado de la humidificación en la temperatura (zoom). Experimento 4	59
Figura 44: Temperatura por componentes. Experimento 4	59
Figura 45: Humedad específica por componentes. Experimento 4.....	60
Figura 46: Subgrafo de diagnóstico de la temperatura en el módulo humidificador	64
Figura 47: Modelo gráfico genérico de los posibles conflictos en OpenModelica	66
Figura 48: Representación del módulo de fuga de aire con $k = 0.9$	79
Figura 49: Cálculo de residuos para detección de fallos	80
Figura 50: Experimento del 1 de Junio de 2013. Señal de control del módulo mezclador en modo nominal, y sujeta al Modo de Fallo 01 a partir de los 20.000 segundos.	87
Figura 51: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF01 en $t = 20000s$. Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01... 88	88
Figura 52: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF01 en $t = 20000s$. Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02... 88	88
Figura 53: Experimento del 1 de Junio de 2013. Señal de control del módulo mezclador en modo nominal, y sujeta al Modo de Fallo 01 a partir de los 20.000 segundos.	89
Figura 54: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF01b en $t = 50000s$. Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01. 90	90
Figura 55: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF01b en $t = 50000s$. Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02. 90	90
Figura 56: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Señal de control del módulo refrigerador en modo nominal, y sujeta al Modo de Fallo 03 a partir de los 45.000 segundos.	91
Figura 57: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF03 en $t = 45000s$. Abajo, valor del residuo del PC01.	91
Figura 58: Experimento del 6 de Sept. de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal y con el fallo MF03 en $t = 45000s$. Abajo, valor del residuo del PC02.	92
Figura 59: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Señal de control del módulo recalentador en modo nominal, y sujeta al Modo de Fallo 04 a partir de los 45.000 segundos.93	93
Figura 60: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF04 en $t = 45000s$. Abajo, valor del residuo del PC01	93
Figura 61: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF04 en $t = 45000 s$. Abajo, valor del residuo del PC02	94
Figura 62: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Señal de control del módulo recalentador en modo nominal, y sujeta al Modo de Fallo 04b a partir de los 45.000 segundos.	94
Figura 63: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF04b en $t = 45000s$. Abajo, valor del residuo del PC01	95
Figura 64: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF04b en $t = 45000s$. Abajo, valor del residuo del PC02	95
Figura 65: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Señal de control del módulo humidificador en modo nominal, y sujeta al Modo de Fallo 05 a partir de los 50.000 segundos.	96
Figura 66: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF05 en $t = 50000s$. Abajo, valor del residuo del PC01	96

Figura 67: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF05 en t = 50000s. Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02...	97
Figura 68: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Señal de control del módulo humidificador en modo nominal, y sujeta al Modo de Fallo 05b a partir de los 50.000 segundos.	98
Figura 69: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF05b en t = 50000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	98
Figura 70: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF05b en t = 50000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	98
Figura 71: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF06 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	99
Figura 72: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF06 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC01	99
Figura 73: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF06 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	100
Figura 74: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal y con el fallo MF06 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	100
Figura 75: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal y con el fallo MF06 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	100
Figura 76: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal y con el fallo MF06 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 02.....	101
Figura 77: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF07 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	101
Figura 78: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF07 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	102
Figura 79: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF07 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	102
Figura 80: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF07 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	103
Figura 81: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF07 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	103
Figura 82: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF07 en t = 43000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	103
Figura 83: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF08 en t = 45000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	104
Figura 84: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal y con el fallo MF08 en t = 45000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	104
Figura 85: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF09 en t = 40000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	105
Figura 86: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal y con el fallo MF09 en t = 40000s. Abajo, valor del residuo del PC02.	106
Figura 87: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal y con el fallo MF10 en t = 50000s. Abajo, valor del residuo del PC01.	106

Figura 88: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal y con el fallo MF10 en t = 40000s. Abajo, valor del residuo del PCO2.	107
Figura 89: Diagrama de Casos de Uso de la aplicación de cálculo de residuos y detección de fallos	127
Figura 90: Diagrama de Clases de la aplicación de cálculo de residuos y detección de fallos..	128
Figura 91: Interfaz gráfica de la aplicación de cálculo de residuos y detección de fallos	129
Figura 92: Diagrama de secuencia: CalcularResiduos	130
Figura 93: Diagrama de secuencia: RellenarCampos	131
Figura 94: Diagrama de secuencia: LimpiarDatos	131

Capítulo 1:

Introducción

1.- Introducción

El siguiente apartado presenta la introducción del Trabajo Fin de Máster “Diagnóstico de fallos de un sistema de calefacción utilizando Posibles Conflictos”, realizado por D. Luis Miguel Villarroel bajo la tutoría de los profesores del Depto. de Informática Dr. Belarmino Pulido y Dr. Carlos Alonso, dentro del marco de trabajo del Grupo de Sistemas Inteligentes. En él se da una visión general del tema que motiva el trabajo -la aplicación del Diagnóstico Basado en Consistencia (DBC) al estudio de posibles fallos en un sistema de climatización real y en funcionamiento- partiendo de un modelo preexistente.

En la actualidad, la vida está llena de dispositivos y sistemas que operan de manera automática o preprogramada ante ciertos eventos, de forma que no es necesaria la intervención de los seres humanos. Estos elementos controlan desde cadenas de montaje hasta sistemas de refrigeración y calefacción, pasando por todo tipo de sistemas automáticos. La importancia de estos sistemas en el día a día hace imprescindible un control ante posibles fallos y errores de funcionamiento, por lo que es necesario un plan de seguimiento que asegure una correcta actividad en todo momento.

La tarea de diagnóstico es la encargada tanto de detectar errores como de identificar la naturaleza de los mismos. Esta tarea de alto nivel cognitivo se puede abordar con múltiples técnicas. En el contexto de este TFM se utilizarán las técnicas basadas en modelos, propuestas desde el campo de la Inteligencia Artificial.

Como parte del paradigma de Diagnóstico Basado en Modelos (*DBM*), las técnicas de Diagnóstico Basado en Consistencia tratan de detectar fallos en todo tipo de sistemas fabricados por el ser humano para que éstos puedan ser subsanados a la mayor brevedad posible. En este contexto, entendemos un *fallo* como toda desviación de comportamiento de un sistema con respecto a lo esperado. En un aparato medio, las causas de estas divergencias pueden ser múltiples e incluso simultáneas. La tarea, por tanto, es triple: **detectar**, **aislar** e **identificar** las **causas** de las diferencias entre el comportamiento estimado y el medido en las variables del sistema monitorizado. Este concepto es a lo que llamamos *diagnóstico*.

Con esta interpretación de la idea de fallo, es posible utilizar modelos para realizar diagnóstico de sistemas reales. En este caso, el modelo permite estimar el funcionamiento esperado de un sistema y compararlo con el funcionamiento real, observando a través de sensores. Para determinar qué parte del sistema es responsable de un posible fallo se puede utilizar una técnica desarrollada por los tutores de este TFM en el GSI, y que se denomina Posibles Conflictos (PCs) [Pulido, 2001][Pulido & Alonso-González, 2004] en la Universidad de Valladolid.

Consiste en descomponer el modelo del sistema en otros más pequeños, cada uno de ellos representando un PC capaz de detectar uno o más fallos diferentes. Para ello debe usar parte de las ecuaciones que configuran el sistema, formando sistemas sobredeterminados y asegurando redundancia analítica mínima en cada uno de ellos. Así, cada variable no observada y susceptible de fallo puede ser estimada con la ayuda de las diferentes mediciones que tenemos disponibles.

En este contexto, el TFM se centrará en el análisis y diseño de un sistema de diagnosis, utilizando Posibles Conflictos para un sistema de calefacción y aire acondicionado real, instalado en un edificio de la Universidad de Cork, en Irlanda [Fraracci & cols, 2012]. El análisis

englobará tanto la descripción de sus componentes como de su funcionamiento e interrelación, y los posibles fallos que en ellos se podrían presentar, mientras que el diseño abordará la manera de descomponer el original en Posibles Conflictos, que describan perfectamente parte de su funcionamiento y que puedan ser interpretadas por el sistema de diagnóstico para la detección y el aislamiento de los diferentes fallos.

El sistema utilizará la descomposición del original en Posibles Conflictos para comparar las medidas disponibles mediante experimentos reales con las conseguidas a través de simulaciones. Los residuos obtenidos de esta diferencia serán los que ayudarán a detectar las discrepancias, y un estudio más detallado con cierto conocimiento experto de base identificará y aislará las causas.

A continuación se detalla un resumen de los contenidos de la memoria:

- En el primer capítulo se realiza una breve introducción al TFM, situando al lector en el contexto del problema que motiva el trabajo, y dando una visión general del alcance del mismo. Se trata de la sección actual.
- En el segundo se describen los conceptos básicos que son necesarios para comprender el resto de la memoria, desde el campo de estudio de los sistemas HVAC hasta la rama de la ciencia que describe cómo y por qué operan y las técnicas y tecnologías empleadas en su estudio. Además,
- El tercer apartado detalla el sistema objeto de estudio, sus componentes principales y las relaciones entre ellos, así como las principales ecuaciones que gobiernan su funcionamiento. Incluye también análisis de los experimentos cedidos por el equipo de creación del modelo de partida sobre el sistema original.
- La cuarta sección analiza los Posibles Conflictos encontrados en el modelo, describiendo la manera de buscarlos y sus ecuaciones más importantes. Además, enumera los tipos de fallos considerados y su efecto sobre el dispositivo, así como su relación con los PCs.
- En el quinto se detalla con abundantes gráficas comparativas las simulaciones realizadas sobre los Posibles Conflictos, dentro del proceso de validación del Sistema de Diagnóstico.
- En el sexto se realiza un análisis de los resultados de la validación del Sistema de Diagnóstico para detección y aislamiento de fallos en el sistema AHU-09.
- El séptimo resume las principales conclusiones obtenidas durante la realización del TFM.

Este TFM cuenta además con varios Apéndices con explicaciones sobre elementos software de apoyo

Capítulo 2:

Conceptos básicos

2.- Conceptos básicos

2.1.- Sistemas HVAC

2.1.1.- ¿Qué son?

Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés) realizan tareas de aclimatación y puesta a punto en todo tipo de edificios residenciales, comerciales e industriales. En ocasiones, también es necesario proveer de aire a fresco a entornos con riesgo de contaminación aérea y malos olores, ya sea por residuos de ocupantes y/o trabajadores, o bien por presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) que sean el resultado de obras, limpieza de interiores con sustancias químicas, etc.

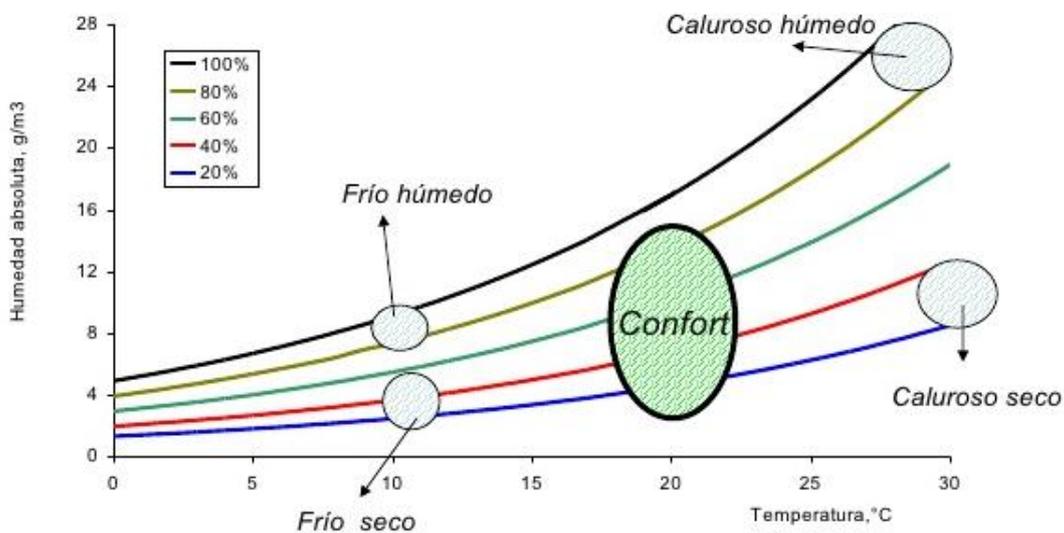


Figura 1: Diagrama psicrométrico con la zona de confort higrotérmico. [Campos, 2010]

Un sistema bien diseñado debería asegurar unas condiciones ambientales adecuadas durante todo el año si su mantenimiento es adecuado. El concepto “condiciones ambientales adecuadas”, también llamado zona de confort, es una combinación de propiedades atmosféricas (temperatura, presión y humedad) en la que la mayor parte de la población se siente cómoda. Puede variar entre las diferentes estaciones del año.

Para ilustrar esta idea subjetiva de confort, es necesario dar unas indicaciones sobre psicrometría. Se trata de una rama de la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de las mismas en el confort humano. El concepto de aire húmedo no difiere mucho del de “aire” que utilizamos nosotros habitualmente, pero teniendo en cuenta que está compuesto por aire seco y vapor de agua.

Composición del aire seco:

- Nitrógeno: 77%
- Oxígeno: 22%
- Otros gases: 1%

El aire tiene la propiedad de retener cierta cantidad de agua, en función de su temperatura y de la presión atmosférica. Manteniendo esta última constante, podemos

aumentar la cantidad máxima de vapor que puede albergar el aire subiendo su temperatura, y viceversa.

Como podemos ver en la figura 1, existe un límite mínimo de temperatura, a partir del cual la humedad relativa alcanza valores cercanos al 100% y se forma niebla, o nubes. Esto se llama punto de rocío (dew point), y se trata del paso previo a la condensación (lluvia) si la temperatura continúa disminuyendo.

2.1.2.- ¿Cómo funcionan?

Un sistema de aire acondicionado enfría y deshumidifica el aire que lo recorre mediante una bobina de superficie fría [FSEC, 2015]. Se trata de un intercambiador de calor aire-líquido con filas de pequeños tubos que pasan el aire a través del solenoide. Esos tubos suelen tener una superficie con aletas que incrementan la superficie de contacto para aumentar la tasa de transferencia de calor entre el aire circulante y el líquido refrigerador.

El tipo de líquido empleado depende del sistema elegido, y puede ser desde refrigerante químico en sistemas especializados con características muy exigentes hasta agua fría (5° - 6°C) en los equipos convencionales. En algunos casos se necesita algo intermedio, cerca del punto de congelación del agua, por lo que se añaden elementos de protección anticongelante como sales o glicoles de bajo peso molecular.

Cuando se encuentra en funcionamiento, el aire y el líquido intercambian calor, de manera que el aire gana progresivamente humedad relativa. En este punto pueden ocurrir dos cosas: que el aire alcance el punto de rocío (temperatura de un gas a la que la humedad relativa es del 100%, para una presión dada) o que no lo haga. En el último caso, la corriente simplemente abandona el aparato con una temperatura menor de aquella con la que entra. En el otro caso, el vapor de agua contenido en ese aire empieza a condensarse, y seguirá así mientras baje su temperatura. Por ello, los aparatos de aire acondicionado disponen de sistemas de evacuación de agua condensada, junto con los de eliminación de agua “calentada” por el aire circulante.

En el caso de los calentadores, el proceso es similar al descrito para los sistemas de aire acondicionado, con la salvedad de que el fluido introducido suele ser agua o aire a gran temperatura, o vapor. El proceso mediante el cual se genera y se usa ese fluido da lugar a todo un abanico de procesos y tipos de calefactores diferentes.

Para generar el fluido caliente, pueden usarse gran variedad de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, así como la electricidad o bombas de calor. Los principales métodos de transferencia de calor en los aparatos calefactores son la radiación, la conducción y la convección.

Los sistemas de aire acondicionado suelen incorporar calentadores para los casos en los que sólo se quiera modificar la humedad del aire. Puesto que el proceso de evacuación del vapor de agua contenido en el aire se realiza mediante enfriamiento, es necesario calentarlo de nuevo para recuperar la temperatura original.

Por último, los sistemas de ventilación pueden ser de varios tipos, que a su vez abarcan numerosas subclases. Entre los más destacados encontramos la ventilación natural, la forzada, la selectiva y la infiltración. Estos procesos pueden ayudar a controlar la temperatura, humedad y las partículas no deseadas presentes en el aire de una habitación, como polvo, polen, contaminantes y diversos olores.

2.2.- El concepto de fallo

En el ámbito industrial y comercial, donde el tiempo es dinero, muchas personas no pueden permitirse que la máquina de la que depende su negocio se estropee o realice acciones inesperadas. En particular, los sistemas HVAC pueden funcionar durante largos periodos sin pausa y con un cierto nivel de exigencia. Por ello es necesario detectar y localizar posibles defectos de la forma más eficaz y eficiente posible. En este contexto, se entiende un fallo como toda anomalía que provoca una desviación del comportamiento de un sistema con respecto al esperado. Esto implica la existencia de un patrón, una idea original con la que comparar el funcionamiento real para extraer conclusiones.

Esta tarea de contraste y evaluación de los resultados, que es la que nos da una idea de la bondad y/o corrección del modelo, es conocida como diagnóstico de sistemas, y es el concepto central de este TFM.

Sin embargo, como resultado del proceso antes mencionado podemos obtener múltiples y variadas conclusiones, y esto es debido a la naturaleza heterogénea de los fallos en los sistemas, que exige una clasificación y categorización de los mismos atendiendo a diferentes criterios: **[Hernández, 2013]**

- Componentes afectados
 - Fallos en planta (fallos de proceso): cambian las propiedades dinámicas de entrada/salida del sistema.
 - Fallos en sensores: provocan la obtención de medidas erróneas de las variables de estado. Las propiedades de la planta no se ven afectadas, por lo que puede que todo vaya bien aunque no lo veamos así.
 - Fallos en actuadores: causan la interrupción o modificación de la acción del controlador sobre la planta. En este caso podemos creer que estamos realizando cierta acción sobre la planta cuando no es así, o viceversa.
- Modo de aparición
 - Fallos incipientes: Aparecen de forma gradual, y su magnitud varía con el tiempo.
 - Fallos abruptos: Aparecen de forma repentina en un cierto instante de tiempo, y su valor permanece constante mientras estén activos.
- Permanencia en el tiempo
 - Fallos permanentes: Permanecen presentes en el sistema una vez que aparecen.
 - Fallos intermitentes: Desaparecen y reaparecen, incluso varias veces a lo largo del experimento. Son muy difíciles de catalogar.
- Efecto en las propiedades de la planta
 - Fallos aditivos: Se trata de entradas desconocidas que afectan a una o más variables de la planta. Afectan a la salida del sistema de manera independiente a las entradas conocidas del sistema.
 - Fallos multiplicativos: Son cambios en algún parámetro del sistema. Su aparición provoca una alteración que genera cambios en la salida del sistema, dependientes de las entradas conocidas.

En este TFM se trabaja siempre con fallos abruptos y permanentes, bajo la hipótesis de fallo simple (máximo uno por escenario). En cuanto a su efecto, se consideran tanto los aditivos como los multiplicativos, y pueden actuar sobre cualquier componente del sistema.

2.3.- Diagnóstico de fallos

Cuando se es ajeno al concepto de diagnosis relacionado con los Sistemas Inteligentes, es inevitable que cuando oímos la palabra diagnóstico nuestra mente piense en medicina, ya que son conceptos que suelen ir de la mano. Y no va muy desencaminada la definición, aunque la primera engloba a la última, y además se aplica a todo tipo de sistemas, no necesariamente “vivos”, con variables de estado y variables observables sobre las que hacer valoraciones.

Así, diagnóstico de fallos en el contexto en que nos movemos es la identificación de las causas que provocan el estado actual de las variables que observamos. Se descompone en tres etapas básicas, que son, según Moya [Moya, 2010]:

- **Detección de fallos:** Consiste en decidir si ha ocurrido un fallo o no. En esta etapa se determina el instante en que tiene lugar el fallo. Si se hace online, abarca toda la duración del experimento, pues debe realizarse con cada conjunto de observaciones.
- **Aislamiento/Localización:** Se basa en determinar cuál es el componente fallido. Esta etapa, que sólo tiene lugar si se detecta un fallo, determina la ubicación del fallo. La precisión de la localización depende de la estructura y configuración del sistema.
- **Identificación:** Sirve para especificar las causas del fallo y estimar su magnitud. Esta etapa, la última en el proceso diagnóstico, precisa el tipo de fallo y su severidad.

Algunos autores agrupan las etapas de aislamiento e identificación en una sola, conocida como diagnosis. No debemos confundir la diagnosis con la prognosis, o predicción del desarrollo de un evento a partir de las observaciones actuales. La principal diferencia es el tiempo de trabajo. Mientras que la diagnosis se centra en eventos pasados para buscarles una explicación, la prognosis trata de anticiparse a lo que deparará el futuro para tomar mejores decisiones. En este TFM nos ocuparemos de la detección y el aislamiento.

2.3.1.- Diagnóstico Basado en Modelos y Posibles Conflictos

De entre las múltiples técnicas y ramas de conocimiento orientadas al diagnóstico de sistemas, este TFM hace hincapié en una cuyo origen se encuentra a medio camino entre la Inteligencia Artificial y la Ingeniería de Control, denominada Posibles Conflictos.

Esta técnica se encuadra dentro del marco de Diagnóstico Basado en Consistencia (DBC), que a su vez se incluye en el paradigma del Diagnóstico Basado en Modelos (DBM). Este último se fundamenta en la existencia de un modelo del sistema, es decir, una abstracción conceptual que estima el comportamiento del mismo mediante un conjunto de ecuaciones. Debe diferenciar las variables de estado (subconjunto más pequeño de variables de un sistema que pueden representar su estado dinámico completo en un determinado instante) de las variables observadas (únicas de las que disponemos mediciones), de las variables de entrada (aquellas sobre las que podemos actuar para cambiar el estado del sistema) y de los parámetros (características propias del sistema, que no se modifican a lo largo del experimento).

EL DBC exige que las variables observadas sean consistentes con las estimaciones teóricas realizadas sobre el modelo, considerando las discrepancias como fallos detectados. En este punto entra en juego la técnica de los Posibles Conflictos. Se basa en dividir el modelo

completo en partes no necesariamente disjuntas, y capaces de calcular el valor de una variable observada en cada momento, dadas las entradas.

Cada Posible Conflicto, formado por un subconjunto de las ecuaciones del original, puede construirse de manera independiente de los demás. Normalmente esto se realiza fuera de línea antes del experimento real, para ahorrar tiempo y recursos. De esta manera se dispone en todo momento de un modelo de simulación para obtener estimaciones con las que comparar los valores que se van obteniendo del experimento. Así se puede realizar la detección de los fallos instantáneamente.

Cuando estas diferencias superan un cierto umbral, se dice que se “activa” un Posible Conflicto. Esto genera una serie de “candidatos” a fallo, o subconjuntos de componentes cuyo funcionamiento erróneo podría ser el responsable de la discrepancia. De entre todos los candidatos de los PCs activados, el algoritmo del conjunto de corte minimal (minimum hitting set) obtiene el elemento o elementos fallidos. La cardinalidad de los subconjuntos pone en evidencia si se trata de un fallo simple o múltiple.

Para dar forma a los Posibles Conflictos, como en cualquier aproximación al DBM, se necesita un lenguaje de modelado y simulación subyacente. En este TFM se utiliza Modelica bajo el entorno OpenModelica, por tratarse de la única alternativa estable y de código abierto del lenguaje en el que está escrito el modelo de partida.

2.4.- *OpenModelica*

OpenModelica [**OpenModelica, 2015**] es un entorno de simulación y modelado de código abierto, basado en Modelica y orientado al uso académico e industrial. El proyecto, soportado por The Open Source Modelica Consortium (OSMC), tiene su origen en Diciembre de 2007 y ha crecido de forma exponencial, incorporando cada vez más empresas a su lista de patrocinadores y colaboradores.

El equipo ha seguido desde el primer momento desarrollando la herramienta, su documentación y multitud de bibliotecas y utilidades para eliminar las restricciones en cuanto al ámbito de aplicación y mejorar la eficiencia de los procesos.

Actualmente (a Julio de 2015) el proyecto se encuentra en su versión 1.9.2, aunque para el proyecto se ha usado la 1.9.0. Este dato es sumamente importante, ya que no existe una compatibilidad hacia atrás total y ciertas funcionalidades pueden fallar en las nuevas versiones.

Como características principales del software, podemos nombrar las siguientes:

- Un número creciente de herramientas y aplicaciones, que lo hacen cada vez más versátil y compatible con otros entornos y lenguajes. De entre ellas, destacan las siguientes:
 - Editor con visualizaciones textual y gráfica, de traducción instantánea.
 - Compilador con posibilidad de exportar código C, Java y XML.
 - Simulador de sistemas con representación de variables.
 - Shell para ejecutar scripts.
 - Plugins para otros entornos, como Eclipse o Python.
 - Depurador de ecuaciones y sistemas de ecuaciones.

- Gran cantidad de bibliotecas para adaptar OpenModelica a problemas de mecánica, química, control, electricidad e infinidad de otros ámbitos. También se pueden crear bibliotecas propias y adaptar o combinar otras existentes.
- Utilización de Modelica como lenguaje de modelado. Esta es la característica más importante, ya que las propiedades de Modelica lo hacen ideal para implementar sistemas complejos a partir de ecuaciones:
 - Es un lenguaje orientado a objetos fuertemente tipado, en el que todo tiene su propia clase.
 - Se trata de un lenguaje declarativo. Esto permite interpretar las ecuaciones como simples igualdades, en lugar de asignaciones como en los lenguajes de programación tradicionales.
 - Reordena automáticamente las ecuaciones para encontrar la solución única, al tratar toda la aplicación como un gran sistema de ecuaciones.
 - Permite especificar los algoritmos a utilizar para resolver integrales y los métodos de inicialización y optimización.
- Eficiencia comparable al lenguaje C, característica poco común en los lenguajes de simulación.

OpenModelica modela todos los componentes con clases, que disponen de puertos para realizar conexiones con otros elementos. Estos enlaces se realizan mediante ecuaciones triviales del tipo $\text{CompA.PtoSalida.VarX} = \text{CompB.PtoEntrada.VarY}$. Es decir, son ideales y en ellos no hay pérdidas de energía o masa.

Cuando se simula un experimento, OpenModelica crea un fichero intermedio en el que resuelve todas las llamadas a funciones y clases y reordena las ecuaciones que necesitará en cada instante, y lo ejecuta hasta que la variable “tiempo de experimento” alcance el límite establecido.

Para ayudar a la aplicación a empezar a resolver el gran sistema de ecuaciones que se forma, a veces se marcan algunas ecuaciones como iniciales, y esas se toman en primer lugar. En cada segundo, el programa comprueba si, como resultado de alguna de las ecuaciones del instante anterior, se activó algún evento. Estos se tratan antes de resolver el segundo actual.

OpenModelica sólo trata con sistemas mínimamente determinados, de manera que la matriz que representa el sistema debe ser perfectamente cuadrada (mismo número de ecuaciones que de variables).

En el Apéndice A se recoge el modelo en Modelica de varios componentes del sistema HVAC descrito en el siguiente apartado.

Capítulo 3:

Sistema AHU-09

3.- Sistema AHU-09

Los aparatos comúnmente llamados “de aire acondicionado”, término que suele englobar a todo tipo de sistemas de manipulación de variables atmosféricas, se instalan en edificios para lograr unas condiciones de temperatura y humedad adecuadas. Asimismo, suelen contar con un dispositivo que renueva el aire del interior de la instancia que controlan con aire exterior. De esta manera eliminan olores, compuestos contaminantes, o simplemente el CO₂ producido por las personas y los animales al respirar.

Aunque en sus inicios estaban diseñados para ambientes industriales, con el tiempo surgieron sistemas mejores y más pequeños que resultaban adecuados para los humanos, por lo que proliferaron en edificios comerciales y residenciales.

Estos aparatos suelen estar monitorizados por sistemas de control, que fijan unas condiciones objetivo y manipulan los actuadores para conseguir que las lecturas de las variables “observadas” sean acordes con lo que se necesita en cada momento.

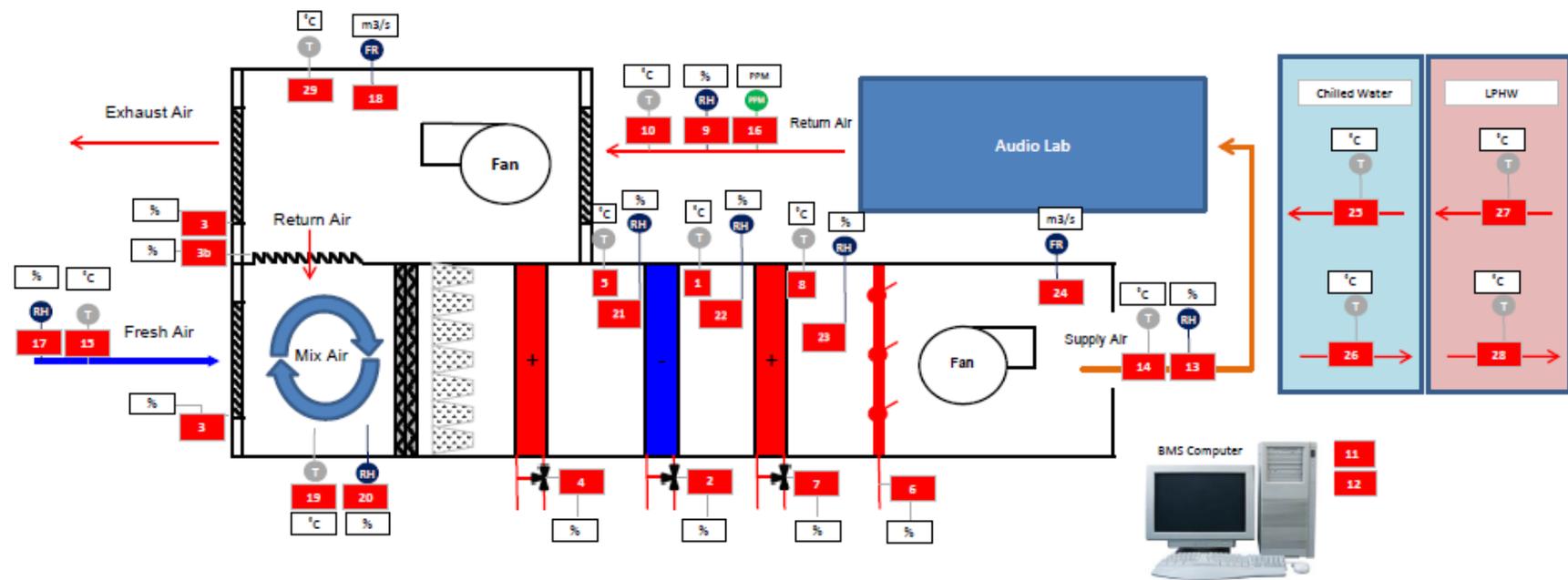
Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) son estructuras compuestas por diferentes módulos dispuestos de manera secuencial, que pueden funcionar de manera independiente, y que juntos logran dotar al aire manipulado de las condiciones idóneas. Cada uno de estos módulos controla normalmente una o dos de las variables a tener en cuenta, y a veces modifica otras como consecuencia de la manipulación de las primeras. Podemos describir los módulos más comunes con el ejemplo objeto de estudio de este TFM.

Se trata de un sistema HVAC instalado en la escuela de música de la Universidad de Cork, en Irlanda. En la figura 2 se puede observar el dispositivo, denominado AHU-09 (Air Handling Unit 09). A continuación se detallarán los módulos de los que dispone, por orden de funcionamiento desde que el aire entra en el dispositivo hasta que llega a la sala monitorizada.



Figura 2: El sistema AHU09 real sobre el tejado de la escuela de música en Cork, Irlanda.

Al mismo tiempo, se describirá su modelo asociado en Modelica, que fue creado en 2012 en el marco del proyecto Europeo EMWiNS [EMWiNS, 2012] [Fraracci & cols, 2012] (Ver figura 3), así como sus restricciones y suposiciones iniciales.



- 1: AHU9 CHW Offcoil Temperature
- 2: AHU9 CHW Valve Position
- 3: AHU9 Fresh Air Damper Position
- 4: AHU9 Frost Coil Valve Position
- 5: AHU9 Frost Offcoil Temperature
- 6: AHU9 Humidity Control Output
- 7: AHU9 Reheat Coil Valve Position
- 8: AHU9 Reheat Offcoil Temperature
- 9: AHU9 Return Air Humidity
- 10: AHU9 Return Air Temperature
- 11: AHU9 Space Air Humidity Setpoint
- 12: AHU9 Space Air Temperature Setpoint
- 13: AHU9 Supply Air Humidity
- 14: AHU9 Supply Air Temperature
- 15: Outside Air Temperature

- 16: Return CO2 PPM
- 17: Outside Air Humidity
- 18: Return Air Flowrate
- 19: Mix Air Temperature
- 20: Mix Air Humidity
- 21: Post Heating Coil Humidity
- 22: Post Dehum Cooling Coil Humidity
- 23: Post Reheat Coil Humidity
- 24: Supply Fan Flowrate
- 25: Chilled Water Supply Temperature
- 26: Chilled Water Return Temperature
- 27: LPHW Supply Temperature
- 28: LPHW Return Temperature
- 29: Post Return Fan Temperature
- 30: Post Supply fan temperature

Figura 3: Modelo esquemático del sistema AHU09 [Fraracci & cols, 2012]

3.1.- Suposiciones iniciales

El razonamiento basado en modelos lleva consigo una serie de restricciones por el hecho de manejar modelos en lugar de sistemas reales. Muchas veces, por temas económicos, de comodidad y/o facilidad de reproducción y modificación, se realizan estudios sobre sistemas teóricos que emulan a otros existentes.

Pero no siempre puede modelarse absolutamente todo, ya que muchas veces el esfuerzo empleado en calcular algunas variables no compensa el ínfimo peso que finalmente tienen en el modelo. Así, el modelo del sistema AHU da por sentadas ciertas cosas que conviene tener en cuenta antes de abordar el estudio de los componentes:

Conexiones ideales: El modelo implementa componentes con comportamiento activo y conocido de antemano, la manera de conectar esos elementos se realiza mediante “puertos”, al más puro estilo informático, y tuberías ideales. Es decir, el fluido que circula por ellas no sufre ningún efecto por el hecho de desplazarse de un módulo al siguiente. La pérdida de energía que puede sufrir el aire en forma de calor en la tubería de una calefacción es irrisoria en comparación con los niveles que se manejan dentro de los componentes.

Variables consideradas: Las variables de estado del sistema, aquellas que determinan la evolución del estado del sistema, son los flujos de aire y agua en el sistema y son las únicas que podemos estimar y observar. El resto de las variables del modelo serán el resultado de relaciones algebraicas con ellas: efecto de reguladores, etc. Muchas de ellas serán entradas al sistema, sobre las que no tendremos control. Así, el aire del sistema es únicamente su temperatura, su humedad y el flujo de masa con el que discurre. Ocurre lo mismo con el agua de los diferentes módulos. Las diferentes válvulas y reguladores se modulan como el porcentaje de fluido que dejan pasar por la tubería respecto al total que llega.

Control: La naturaleza del modelo, en el que no está modelada la sala de música que queremos aclimatar, hace que sea imposible calcular de manera rigurosa la relación entre los valores del aire reciclado con respecto a los del aire que el aparato provee. Por este motivo, este aire se implementa con valores obtenidos durante los diversos experimentos realizados.

Ausencia de efectos residuales: De la misma manera que para las conexiones, los creadores del modelo han elegido manejar componentes ideales, que no generan calor extra al funcionar y cuyo efecto sobre el aire circulante es inmediato.

Discretización de variables: La envergadura de los experimentos, de un día de duración, provoca la necesidad de buscar un tiempo de muestro que resuelva satisfactoriamente el compromiso de representar fielmente el funcionamiento de variables que en realidad son continuas, y al mismo tiempo no suponer una carga de datos inmanejable para los investigadores. Por este motivo se ha elegido un tiempo de muestreo de 60 segundos, tomando en cada paso dos muestras sobre las que se hará la media para obtener el dato final.

3.2.- Módulo mezclador (Mixing Box - MB)

El módulo mezclador, que se puede ver en la figura 4, se encarga de combinar el aire reciclado proveniente de la sala aclimatada con aire del exterior, para eliminar posibles toxinas y malos olores, y al mismo tiempo ahorrar energía al no coger solamente aire externo. Dispone de diversos filtros para limpiar el aire, aunque no se tendrán en cuenta para el modelo.

La incorporación de esta primera etapa en los sistemas HVAC supuso un gran avance para estos aparatos en materia de ahorro de energía, ya que el aire reciclado posee unas condiciones más parecidas a las que tenemos como objetivo que el aire proveniente de fuera.

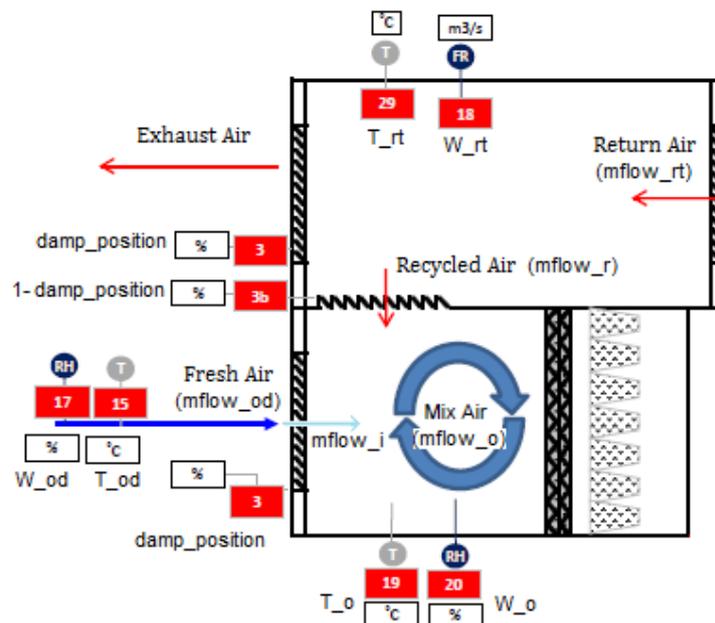


Figura 4: Módulo mezclador del modelo esquemático del AHU-09

El funcionamiento de este módulo es muy sencillo. Dispone de dos entradas de aire, una para el que procede del exterior y otra para el reciclado. Además, cuenta con un regulador que funciona a modo de compuerta y establece el porcentaje de aire fresco que entra al sistema y el que se reutiliza. Ambos son parámetros complementarios, de manera que cuanto más aire fresco entre en el sistema, más aire reciclado se desechará. La salida del módulo mezclador es una corriente de aire que combina los valores de temperatura, humedad y flujo de las de entrada.

3.2.1.- Estructura del módulo y variables internas

- Entradas
 - mflow_od: Flujo de masa del aire externo disponible para el módulo.
 - damp_position: Posición de la compuerta de paso de aire externo [0 - 1].
 - mflow_rt: Flujo de masa del aire de retorno disponible para reciclar.
 - T_od: Temperatura del aire procedente del exterior.
 - T_rt: Temperatura del aire reciclado.
 - W_od: Humedad específica del aire procedente del exterior.
 - W_rt: Humedad específica del aire reciclado.
- Salidas
 - mflow_o: Flujo de masa de salida del aire mezclado.
 - T_o: Temperatura de salida del aire mezclado.
 - W_o: Humedad específica de salida del aire mezclado.
- Variables internas y parámetros
 - mflow_i: Flujo de masa del aire externo utilizado por el MB.
 - mflow_r: Flujo de masa del aire reciclado (fracción del de retorno utilizada).
 - zero: Valor mínimo considerado para flujos de masa de aire (= 0.0000000001).

3.2.2.- Ecuaciones de funcionamiento

En primer lugar tenemos las ecuaciones del principio de equilibrio de masas:

$$mflow_i + mflow_r = mflow_o; \quad (1)$$

$$mflow_i = mflow_od * \max(damp_position, zero); \quad (2)$$

$$mflow_r = mflow_rt * \max(1 - damp_position, zero); \quad (3)$$

Puesto que el sistema objeto de estudio no manipula aires contaminados con sustancias nocivas o químicos peligrosos, no tiene sentido desperdiciar todo el aire procedente de la sala aclimatada, sabiendo que mantiene unas condiciones más acordes a la temperatura y humedad objetivo que el aire del exterior. Hace falta mucha más energía para calentar una masa de aire a 5° de un día de invierno que otra a 17° cuando el objetivo son 24° [Fernández-Díez, 1996].

Como consecuencia, el funcionamiento del módulo mezclador es tal que al menos el 50% del aire que circula por el sistema es reciclado. Esto se consigue limitando la variable "posición de la compuerta" a valores entre 0 y 0.5 (en tantos por uno).

El resultado de la mezcla de las dos corrientes de aire se controla con las ecuaciones de equilibrio de energías:

$$mflow_i * T_od + mflow_r * T_rt = mflow_o * T_o; \quad (4)$$

$$mflow_i * W_od + mflow_r * W_rt = mflow_o * W_o; \quad (5)$$

Que básicamente se traducen en que la temperatura y la humedad del aire mezclado son una media ponderada de las de las dos corrientes de entrada.

3.2.3.- Componentes asociados

Los componentes asociados al módulo mezclador dan formato a las entradas del mismo, haciendo que los valores que establece el usuario en un archivo se conviertan en las propiedades de las corrientes de aire (flujo de masa, temperatura y humedad) y la posición de la compuerta. Esto se realiza de la siguiente manera:

- Aire de retorno: En primer lugar, un módulo de tipo "Pneumatic_Volume" (ver Apéndice) crea una masa de aire, que no es más que una dupla Temperatura-Humedad específica a partir de los valores de temperatura y humedad relativa especificados en el fichero de entradas. A continuación, un ventilador "Simplified_Fan" establece el flujo de masa en kg/s. Ya tenemos una corriente de aire estándar.
- Aire del exterior: El procedimiento es el mismo que en el caso del aire de retorno, con la excepción de que no existe un ventilador para esta corriente. El flujo de masa es en este caso una de las incógnitas del gran sistema de ecuaciones que es el AHU-09. Su valor se infiere a partir del del aire de salida del módulo y del del aire de retorno con la ecuación (1).
- Posición de la compuerta: El usuario controla la apertura mediante una señal de tipo porcentaje. Ésta se convierte en tanto por uno y se somete a un mapeo en

un módulo parametrizado a través de dos umbrales, que representan los valores mínimo y máximo que reconoce el componente. Toda señal por debajo del umbral mínimo recibirá el mismo valor que dicho límite, y lo mismo ocurre con el valor máximo.

Los valores intermedios obtienen un valor que es el resultado de una interpolación entre los valores límite del tramo correspondiente. En el caso que nos ocupa, esta interpolación es lineal y sólo hay un tramo. Podemos verlo en la figura 5.

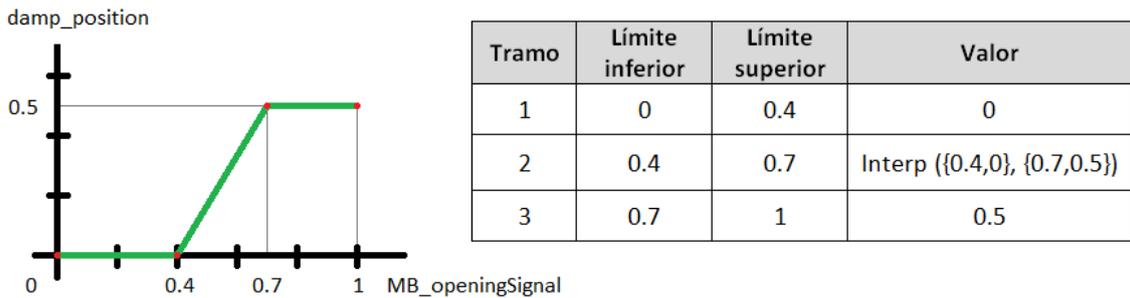


Figura 5: Mapeo de la señal de entrada al Módulo Mezclador

3.3.- Módulo calefactor (Heating Coil - HC)

El módulo calefactor se encarga de elevar la temperatura del aire que circula por su interior, mediante intercambio de calor con un líquido que recorre la bobina principal a una temperatura que suele rondar los 90°. El módulo se representa en la figura 6.

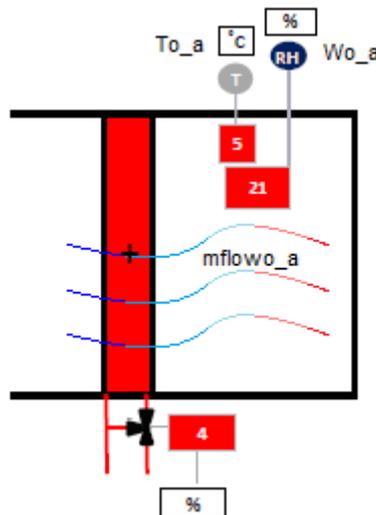


Figura 6: Módulo calefactor del modelo esquemático del AHU-09

El dispositivo AHU09 dispone de dos de estos módulos, como segunda y cuarta etapas. La razón de que haya dos es que cada uno tiene un propósito diferente. El primero (Preheating Coil) sirve para evitar que las eventuales heladas exteriores afecten al sistema mecánico del aparato, además de aumentar la temperatura del aire circulante. La segunda (Heating Coil) forma parte del módulo ficticio "de deshumidificación", que sirve para reducir la humedad específica del aire sin modificar demasiado la temperatura. En él, la bobina de recalentamiento aumenta la temperatura del aire hasta el nivel deseado tras haber sido éste enfriado. El funcionamiento del módulo deshumidificador se detalla en el siguiente apartado.

La manera en que operan los calentadores es bastante simple. El aire de entrada se introduce en un compartimento donde se le obliga a recorrer un circuito junto a una bobina que contiene el líquido calefactor en su interior. A medida que los fluidos discurren por el "laberinto", intercambian energía en forma de calor. La magnitud del calor intercambiado depende de la eficiencia del aparato, y ésta, a su vez, de la configuración del mismo.

Existen 3 configuraciones básicas para los intercambiadores de calor, en función de cómo el aire recorre el componente:

- Flujo paralelo: la entrada y la salida del líquido calefactor se sitúan junto a las del fluido que queremos calentar, de manera que ambos circulan en el mismo sentido dentro de la bobina.

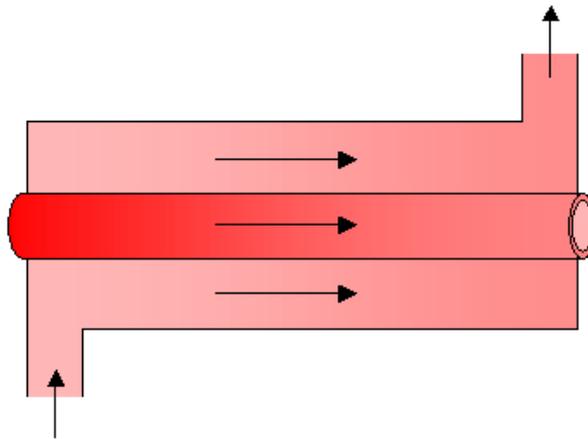


Figura 7: Intercambiador de calor con flujo paralelo

Esto provoca que la diferencia de temperaturas sea mayor en un primer momento, y se reduzca a medida que el aire avanza por el componente, lo que da lugar a una curva cóncava para la temperatura del mismo (el intercambio de temperaturas se desacelera).

- Flujo a contracorriente: la entrada del líquido calefactor se sitúa junto a la salida del fluido circulante, mientras que la salida del primero se coloca junto a la entrada de aire. La primera consecuencia es que el aire entra en contacto con un líquido algo más frío, por lo que se calienta más lentamente. Sin embargo, como el líquido calefactor aumenta su temperatura, sigue calentando el aire con la misma tasa de intercambio de calor durante todo el componente. Este hecho hace de esta configuración la más eficiente, pero también la que más espacio físico necesita para alcanzar el máximo de efectividad.

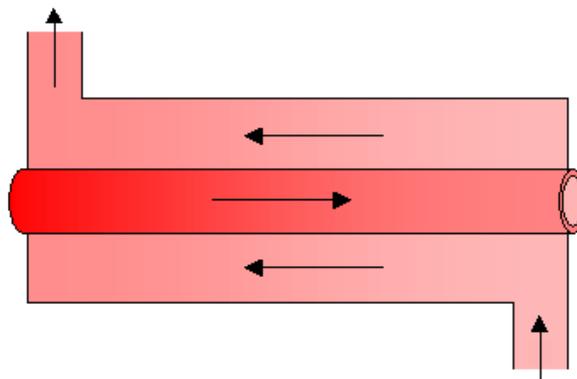


Figura 8: Intercambiador de calor con flujo a contracorriente

- Flujo cruzado sin mezcla de corrientes: Se trata de la configuración utilizada en los tres intercambiadores de calor presentes en el dispositivo real objeto de estudio. Necesita una menor superficie de contacto para desplegar toda su efectividad, pero esta alcanza valores inferiores a los del flujo a contracorriente. Suele ser utilizada por su tamaño compacto.

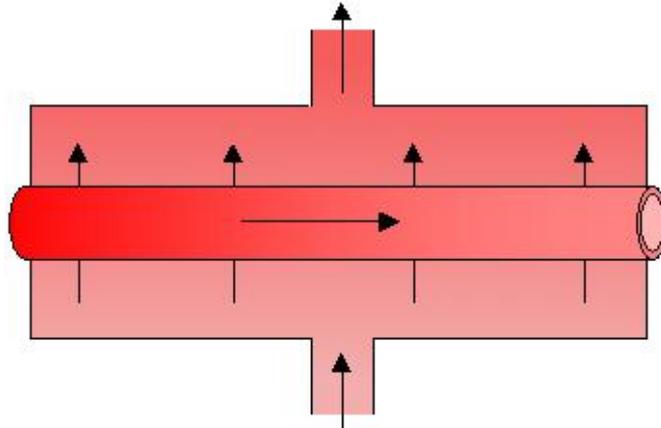


Figura 9: Intercambiador de calor con flujo cruzado sin mezcla de corrientes

Computacionalmente, cuenta con dos puertos de entrada: uno para el aire procedente del módulo anterior, y otro para el líquido calefactor. Además, tiene un puerto de salida que despacha el aire caliente al siguiente componente.

3.3.1.- Estructura del módulo y variables internas

- Entradas
 - Ti_a : Temperatura del aire procedente del módulo anterior.
 - Ti_w : Temperatura del agua calefactora a la entrada del módulo.
 - $mflowi_a$: Flujo de masa del aire procedente del módulo anterior.
 - $mflow_w$: Flujo de masa del agua calefactora.
 - Wi_a : Humedad específica del aire procedente del módulo anterior.
- Salidas¹
 - To_a : Temperatura de salida del aire.
 - $mflowo_a$: Flujo de masa de salida del aire.
 - Wo_a : Humedad específica de salida del aire.
- Variables internas y parámetros
 - $Qflow$: Transferencia total de calor en el componente.
 - $Cflow_a$: Capacidad calorífica del aire.
 - $Cflow_w$: Capacidad calorífica del agua.
 - eff : Efectividad del intercambio de calor (configuración de flujo cruzado).
 - c_a : Calor específico del aire (= 1006 J/K).²
 - c_w : Calor específico del agua (= 4186 J/K).

¹ El modelo original calcula la temperatura de salida del agua de todos los intercambiadores de calor, pero en la adaptación estos valores se consideran inútiles.

² Valor en condiciones típicas de habitación (Suponiendo una altitud de 194 metros -el promedio de la población mundial-, una temperatura de 23 °C, un 40,85 % de humedad y 760 mmHg de presión).

3.3.2.- Ecuaciones de funcionamiento

Las ecuaciones de alto nivel que rigen la actividad de la bobina calefactora son las correspondientes al principio de conservación de la energía (4) y (5) y la resultante del método clásico para el cálculo de la efectividad mediante el número de Unidades de Transferencia (NTU-eff) (6) [NTU, 2015]:

$$Q_{flow} = C_{flow_a} * (T_{o_a} - T_{i_a}); \quad (4)$$

$$Q_{flow} = C_{flow_w} * (T_{i_w} - T_{o_w}); \quad (5)^3$$

$$Q_{flow} = eff * \min(C_{flow_a}, C_{flow_w}) * (T_{i_w} - T_{i_a}) \quad (6)$$

Donde:

$$C_{flow_a} = m_{flow_i_a} * c_a; \quad (7)$$

$$C_{flow_w} = m_{flow_i_w} * c_w; \quad (8)$$

Por otro lado, el balance de masas es trivial, ya que el flujo de aire no se modifica. Lo mismo ocurre con la humedad específica del aire. Así:

$$m_{flow_o_a} = m_{flow_i_a}; \quad (9)$$

$$W_{o_a} = W_{i_a}; \quad (10)$$

3.3.3.- Componentes asociados

Los elementos asociados al calentador se ocupan de gestionar el agua que entra al componente de acuerdo a los valores que el usuario ha introducido en el fichero de entradas.

- Agua calefactora: En primer lugar, un módulo de tipo "Hydraulic_Volume" (ver Apéndice) crea una masa de agua, que al principio no es más que una variable de temperatura obtenida del usuario. A continuación, una bomba "Pump_Simplified" establece el flujo de masa en kg/s. Esas son las dos únicas variables que componen una corriente de agua estándar en el modelo.

Ese líquido llega a un componente "Valve", que regula el paso de acuerdo a una variable de tanto por uno del fichero de entradas, una interpolación lineal de (0, 0) a (1, flujo de entrada) y un proceso de histéresis con centro en cent_hyst y amplitud 2*delta (ver figura 10).

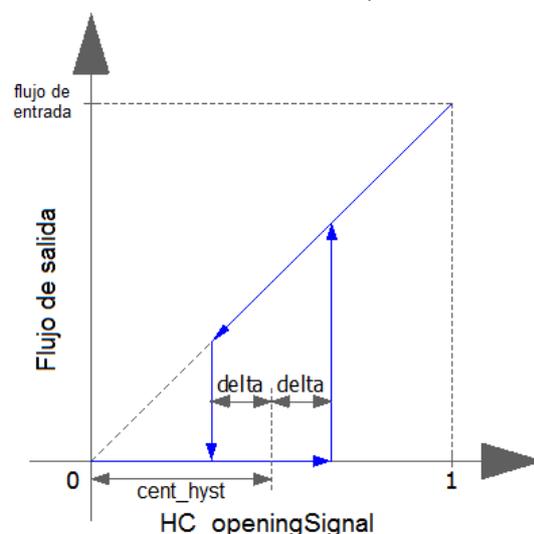


Figura 10: Histéresis de la válvula de los intercambiadores de calor [OpenModelica, 2015]

³ La ecuación (5) no está presente en la adaptación del modelo que se ha utilizado, pero se muestra porque las tres ecuaciones de cálculo de la transferencia de calor suelen presentarse juntas. En ella, T_{o_w} sería la temperatura de salida del agua calefactora.

3.4.- Módulo refrigerador (Cooling Coil - CC)

Se trata del módulo cuyo funcionamiento es el más complicado de modelar, ya que no trata únicamente con una variable de estado (temperatura o humedad), sino que las dos pueden verse modificadas al mismo tiempo, atendiendo a las propiedades psicrométricas del aire circulante. De hecho, este componente es la primera fase del supercomponente ficticio conocido como “deshumidificador”, formado por éste y el segundo módulo calefactor.

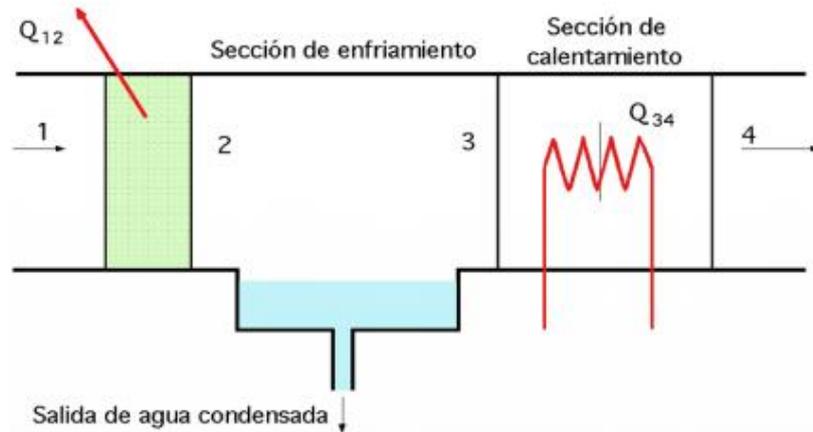


Figura 11: Sección de un deshumidificador de aire genérico

En la figura 11, Q_{12} es el calor perdido por el aire entre los puntos 1 y 2, en la sección de enfriamiento. Entre los puntos 2 y 3, el agua fruto de la posible condensación se evacúa y el aire “seco” pasa a la sección de calentamiento. En ella, el aire gana el calor marcado con Q_{34} .

El refrigerador de este sistema es, en el fondo, un intercambiador de calor como los calentadores del apartado anterior, con las mismas configuraciones posibles, pero al que enviamos agua fría (a unos 5°C) en lugar de caliente. Las necesidades de temperatura y humedad de la escuela de música no requieren temperaturas por debajo de la zona de confort, por lo que en este caso el agua fría y sin aditivos será suficiente para refrescar el aire.

Sin embargo, el enfriador tiene “modos” de funcionamiento, que en realidad son fases por las que pasa el aire circulante en el interior del módulo. El módulo calcula al mismo tiempo el intercambio de calor que se produciría en cada uno de ellos, y sólo así puede decidir cuál de los dos conjuntos de ecuaciones aplicar en cada instante. Son los siguientes:

- Régimen seco: Es el modo "normal", en el que la humedad relativa del aire enfriado es en todo momento menor del 100%. Podría decirse que el funcionamiento del módulo en este modo es como el de los calentadores. Es decir, la humedad no sufre cambios y la temperatura se calcula con el método de las Unidades de Transferencia (NTU).
- Régimen húmedo: A medida que el enfriamiento del agua aumenta la humedad relativa del mismo, los valores del calor transferido en régimen húmedo se van acercando a los del régimen seco. En el momento en que ambos se igualan, se

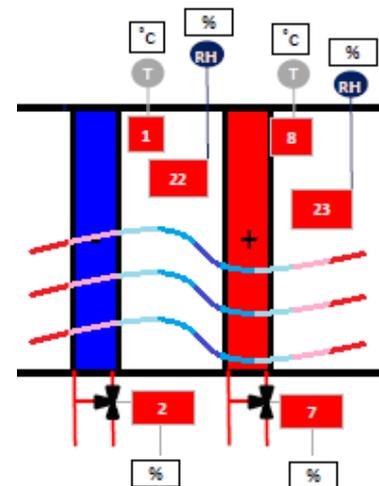


Figura 12: Módulo deshumidificador completo del modelo del AHU-09

dice que la temperatura del aire ha alcanzado el punto de rocío. Si los valores de la fase húmeda superan a los de la seca, podemos deducir que el aire está condensando parte del agua que contiene, por lo que está perdiendo humedad específica además de temperatura.

- Régimen de contacto: La zona de contacto entre la bobina de metal por la que discurre el agua fría y el aire circulante sigue un comportamiento ligeramente diferente al del resto del módulo. Es el punto donde antes empieza la condensación, por ser el primer lugar al que afecta la convección.

Aunque en algunas referencias se considera un modo de operación completamente independiente, los autores del modelo han decidido incluirlo dentro del régimen húmedo, añadiendo una ecuación más al mismo (17).

Entonces, el sistema calcula el intercambio de calor según los tres (dos) modos y aquél cuyo resultado sea mayor será el que se encuentra activo en cada momento.

3.4.1.- Estructura del módulo y variables internas

Estructuralmente, el enfriador no es distinto de los calentadores, excepto por el compartimento para evacuar el agua de condensación. Así:

- Entradas
 - Ti_a : Temperatura del aire procedente del módulo anterior (bulbo seco)
 - Ti_w : Temperatura del agua enfriadora a la entrada del módulo.
 - $mflow_i_a$: Flujo de masa del aire procedente del módulo anterior.
 - $mflow_w$: Flujo de masa del agua enfriadora.
 - Wi_a : Humedad específica del aire procedente del módulo anterior.
- Salidas
 - To_a : Temperatura de salida del aire.
 - $mflow_o_a$: Flujo de masa de salida del aire.
 - Wo_a : Humedad específica de salida del aire.
- Variables internas y parámetros
 - $Qflow_{dry}$: Transferencia total de calor en régimen seco.
 - To_{a_db} : Temperatura de salida del aire (medida en bulbo seco).
 - eff_{dry} : Efectividad del intercambio de calor en seco.
 - $Qflow_{wet}$: Transferencia total de calor en régimen húmedo.
 - hi_a : Entalpía específica del aire a la entrada.
 - ho_a : Entalpía específica del aire a la salida.
 - eff_{wet} : Efectividad del intercambio de calor en régimen húmedo.
 - $Cflow_{a_wet}$: Capacidad calorífica del aire en régimen húmedo.
 - Ti_{a_wb} : Temperatura del aire desde del módulo anterior (bulbo húmedo).
 - $effc_{wet}$: Efectividad del intercambio de calor en el contacto.
 - Tc_{wet} : Temperatura en el contacto en régimen húmedo.
 - cf_a : calor específico del aire en régimen húmedo.

3.4.2.- Ecuaciones de funcionamiento

A alto nivel, las ecuaciones que determinan la actividad del módulo en régimen seco son las del principio de balance de energía, más la del método clásico eff-NTU:

En régimen seco:

$$Q_{\text{flow_dry}} = C_{\text{flow_a}} * (T_{i_a} - T_{o_a}); \quad (11)$$

$$Q_{\text{flow_dry}} = C_{\text{flow_w}} * (T_{o_w_dry} - T_{i_w}); \quad (12)^4$$

$$Q_{\text{flow_dry}} = \text{eff_dry} * \min(C_{\text{flow_a}}, C_{\text{flow_w}}) * (T_{i_a} - T_{i_w}); \quad (13)$$

En régimen húmedo:

$$Q_{\text{flow_wet}} = m_{\text{flowi_a}} * (h_{i_a} - h_{o_a}); \quad (14)^5$$

$$Q_{\text{flow_wet}} = C_{\text{flow_w}} * (T_{o_w_wet} - T_{i_w}); \quad (15)$$

$$Q_{\text{flow_wet}} = \text{eff_wet} * \min(C_{\text{flow_a_wet}}, C_{\text{flow_w}}) * (T_{i_a_wb} - T_{i_w}); \quad (16)$$

$$Q_{\text{flow_wet}} = \text{effc_wet} * C_{\text{flow_a_wet}} * (T_{i_a_wb} - T_{c_wet}); \quad (17)$$

Donde:

$$C_{\text{flow_a_wet}} = m_{\text{flowi_a}} * c_{f_a}; \quad (18)$$

Una vez que se han calculado los dos modos, el sistema utiliza aquél cuyo valor de transferencia de calor sea mayor. Por otra parte, ninguno de los diferentes modos modifica el flujo de aire, por lo que la única ecuación del principio de equilibrio de masas es la misma que en los calentadores (9).

$$m_{\text{flowo_a}} = m_{\text{flowi_a}}; \quad (19)$$

3.4.3.- Componentes asociados

Al igual que en el caso de los calentadores, los elementos dependientes del enfriador controlan la temperatura y el flujo del agua que entra al componente, de acuerdo a los valores que el usuario ha introducido en el fichero de entradas. Por tanto, en el proceso entran en juego los mismos tipos de componente, es decir, una fuente y una bomba de agua, y una válvula que regula el paso del líquido a la bobina.

3.5.- Módulo humidificador (Humidifier - H)

Los anteriores componentes servían para modificar la temperatura del aire circulante a nuestro antojo, o para disminuir la humedad del mismo. En el caso de querer aumentar esta última se necesita un nuevo componente, el humidificador. Éste se encarga de elevarla mediante la adición de vapor de agua.

⁴ Al igual que en el caso de la ecuación (5) de los calentadores, la adaptación del modelo utilizada no emplea las ecuaciones (12) y (15), aunque se muestran por coherencia con la bibliografía usada. En ellas, $T_{o_w_dry}$ y $T_{o_w_wet}$ son la temperatura de salida del agua en los regímenes seco y húmedo.

⁵ La fórmula de la entalpía toma el aire como un gas ideal, por lo que sólo depende de su temperatura.

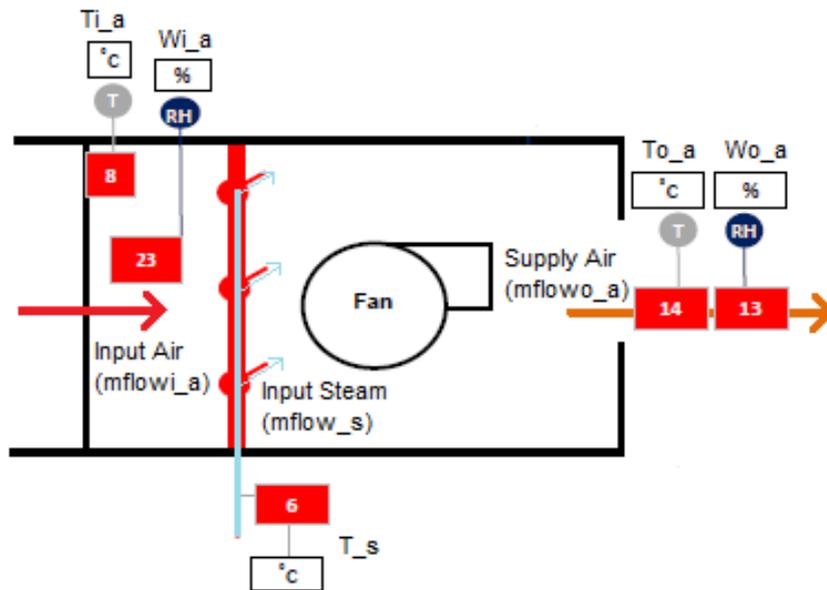


Figura 13: Módulo humidificador y salida de aire del modelo esquemático del AHU-09

Las razones para querer elevar el grado de humedad pueden ser múltiples y muy variadas, pero se sabe que el aire demasiado seco puede dar lugar a acumulaciones de electricidad estática que pueden llegar a ser peligrosos en atmósferas potencialmente explosivas.

En equipos residenciales, donde no suelen existir estos peligros, también puede ser necesario aumentar la humedad. A una temperatura de entre 20°C y 25°C, la humedad relativa considerada "confortable" se sitúa entre el 40% y el 70%.

El proceso de humidificación puede ser de dos tipos [Devatec, 2015]:

- Isotérmico: Durante el proceso, se hace pasar la corriente de aire circulante por una superficie de agua en ebullición, de manera que el vapor de agua liberado por el líquido se queda en el aire.
- Adiabático: Es el tipo de humidificación que se produce en el sistema objeto de estudio. En él, el agua se pulveriza con aerosoles en el aire, que cede o gana calor en función de la temperatura del líquido. Como el agua pulverizado es directamente vapor (100°C), normalmente el aire ganará algo de temperatura.

3.5.1.- Estructura del módulo y variables internas

- Entradas
 - mflowi_a: Flujo de masa del aire procedente del módulo anterior.
 - mflow_s: Flujo de masa de vapor procedente de la válvula.
 - Wi_a: Humedad específica del aire procedente del módulo anterior.
 - T_s: Temperatura del vapor de agua procedente de la válvula.
 - Ti_a: Temperatura del aire
- Salidas
 - mflowo_a: : Flujo de masa de salida del aire humidificado.
 - To_a: Temperatura de salida del aire humidificado.
 - Wo_a: Humedad específica de salida del aire humidificado.
- Variables internas y parámetros

- c_a : Calor específico del aire (= 1006 J/K).
- c_s : Calor específico del vapor de agua (= 4186 J/K).
- c_{ai} : Calor específico del aire humidificado.
- W_o : Humedad específica calculada para el aire de salida.
- W_{os} : Humedad específica de saturación (máxima) para el aire de salida.
- n : eficiencia de la saturación [0 - 1].

3.5.2.- Ecuaciones de funcionamiento

El principio de conservación de materia garantiza que toda la masa que entra al módulo en forma de aire o vapor de agua sale del mismo como aire humidificado.

$$mflow_{i_a} + mflow_{s} = mflow_{o_a}; \quad (20)$$

El calor específico de esa mezcla depende de la cantidad de humedad específica del aire de entrada:

$$c_{ai} = (c_a + c_s * W_{i_a}) / (1 + W_{i_a}); \quad (21)$$

Y con él obtenemos la temperatura y la humedad de salida (despejando W_o de (23)).

$$T_{o_a} = \frac{mflow_{s} * c_s * T_s + mflow_{i_a} * c_{ai} * T_{i_a}}{mflow_{s} * c_s + mflow_{i_a} * c_{ai}} \quad (22)$$

$$mflow_{s} = mflow_{i_a} * (W_o - W_{i_a}); \quad (23)$$

Por último, el modelo comprueba que no se ha excedido el punto de saturación, es decir, que la humedad relativa no ha sobrepasado el 100%. Esto se calcula mediante la presión atmosférica y la temperatura de salida del aire.

$$W_{o_a} = \min(W_o, n * W_{os}); \quad (24)$$

3.5.3.- Componentes asociados

Los elementos asociados al humidificador se ocupan de gestionar el vapor que entra al componente de acuerdo a los valores que el usuario ha introducido en el fichero de entradas. A efectos prácticos, el vapor se comporta como el agua calefactora de los calentadores o el agua refrigeradora del módulo enfriador:

- Vapor de agua: En primer lugar, un módulo de tipo "Hydraulic_Volume" (ver Apéndice) crea una masa de vapor, que al principio no es más que una variable de temperatura a 100°C. A continuación, una bomba "Pump_Simplified" establece el flujo de masa en kg/s. El vapor llega entonces a un componente "Valve", que regula el paso como se ha explicado en otros componentes.

3.6.- Experimentos reales sobre el AHU-09

A continuación se describen los experimentos sobre el sistema físico, proporcionados por el equipo de desarrollo de los modelos, y de los que se han extraído los datos de estudio y calibración del mismo. Estos datos ayudan a entender el funcionamiento del dispositivo en modo nominal y con fallos. En capítulos posteriores se amplían con detalle los Modos de Fallo considerados en la validación del sistema de diagnóstico.

Se trata de cuatro pruebas de un día de duración cada una, en las que se dispone de alrededor de 30 sensores para medir todas las variables que puedan resultar interesantes. Tres de estos experimentos detallan el comportamiento nominal del aparato, sin fallos que afecten al rendimiento o la operación de los componentes, y el cuarto describe una fuga en la válvula de agua refrigeradora.

Sin embargo, en condiciones normales no contaremos con un despliegue tecnológico tan amplio, ya que lo normal es monitorizar solamente las variables a la entrada y a la salida del aparato, viendo éste como una caja negra.

Esto complica la labor de identificación de los fallos, ya que si el modelo de ecuaciones es muy complicado, a veces no es posible distinguir qué componente ha fallado, aunque se sepa que algo no va bien. Para el modelo de simulación se dispone de los siguientes sensores:

Sensor	Variable controlada	Entrada (U) / Salida (Y)	Nombre
15	Temperatura del aire exterior	U	MB.Pi.T
17	Humedad relativa ⁶ del aire exterior	U	MB.Pi.W
29	Temperatura del aire de retorno	U	MB.Pr.T
9	Humedad relativa del aire de retorno	U	MB.Pr.W
18	Flujo de masa de aire de retorno	U	MB.Pr.mflow
3	Posición de la compuerta de aire	U	MB.damp_position
4	Apertura de la válvula de agua calefactora de la bobina precalentadora	U	Pre_HC_valve.newPerc
2	Apertura de la válvula de agua enfriadora para la bobina refrigeradora	U	CC_valve.newPerc
7	Apertura de la válvula de agua calefactora para la bobina calentadora	U	HC_valve.newPerc
6	Apertura de la válvula de vapor del humidificador	U	H_valve.newPerc
27	Temperatura del agua calefactora	U	HC_wTemp.y
25	Temperatura del agua refrigeradora	U	CC_wTemp.y
14	Temperatura del aire de salida	Y	H.Po.T
13	Humedad específica del aire de salida	Y	H.Po.W
24	Flujo de masa del aire de salida	U	H.Po.mflow

Tabla 1: Sensores del modelo de simulación

⁶ El modelo convierte todas las humedades relativas en específicas para mayor comodidad y coherencia en los cálculos internos. Las relativas se mantienen a la entrada por ser un concepto más fácil de asimilar por el usuario.

Explicación de la tabla:

- **Sensor:** Número del sensor en el sistema. Ver figura 3.
- **Variable controlada:** Propiedad del sistema monitorizada por el sensor.
- **Entrada (U) / Salida (Y):** Indicador de si se trata de una variable controlada y susceptible de manipulación (U) o medida/calculada (Y).
- **Nombre:** Identificador que recibe en las gráficas del resto del capítulo.

Además de los ya expuestos, el modelo del AHU-09 permite comprobar el valor de las variables en puntos intermedios del sistema, lo que ayuda enormemente a comprender el funcionamiento del mismo. Estos atributos son básicamente la temperatura, la humedad específica y el flujo de masa del aire circulante en las diferentes etapas. En las gráficas, estas propiedades siguen la notación Componente.Puerto.Variable:

[MB | pre_HC | CC | HC | H].[Pi | Po].[T | W | mflow]

Donde:

- Componentes:
 - MB: Módulo mezclador (Mixing Box)
 - pre_HC: Bobina precalentadora (Preheating Coil)
 - CC: Bobina enfriadora (Cooling Coil)
 - HC: Bobina calentadora (Heating Coil)
 - H: Humidificador (Humidifier)
- Puertos:
 - Pi: Puerto de entrada
 - Po: Puerto de salida
- Variables:
 - T: Temperatura (en °C)
 - W: Humedad específica (en kg/kg)
 - mflow: Flujo de masa (en kg/s)

Por ejemplo, CC.Po.T indicaría la temperatura de salida del módulo enfriador, y HC.Pi.mflow el flujo de masa de aire que entra en la bobina calentadora.

A continuación se describen los cuatro experimentos reales que fueron cedidos por el equipo de desarrollo del modelo AHU-09. Todos ellos comparten algunas características, como el encendido de la calefacción del edificio sobre las 7:00 a.m. (unos 25000 segundos desde el inicio) y su apagado hacia las 6:00 p.m. (65000 segundos de experimento aproximadamente).

3.6.1.- Experimento 1: Funcionamiento nominal (1 de Junio de 2013)

En este experimento se presenta el funcionamiento normal del sistema, sin fallos de componentes y con sólo dos de ellos en funcionamiento. La prueba sirve básicamente para comprobar los efectos de abrir o cerrar la compuerta de entrada de aire exterior. Hay también un breve lapso de tiempo de unos dos minutos en los que se activa ligeramente la bobina de calentamiento, pero sus efectos son casi imperceptibles, por las características de la señal.

Entradas relevantes:

- MB.Pr.T: La temperatura de retorno comienza descendiendo desde los 16°C hasta los 11°C en unos 26000 segundos, pero entonces sufre un repentino aumento de más de 10 grados en cuestión de minutos. Ésa es su característica más importante. Puede verse en la figura 14 en azul.

- MB.Pi.T: El comportamiento de la temperatura del aire exterior es mucho más suave, con cambios menores a 2°C cada 15 minutos aproximadamente. Se trata de la curva rojo de la figura 14.

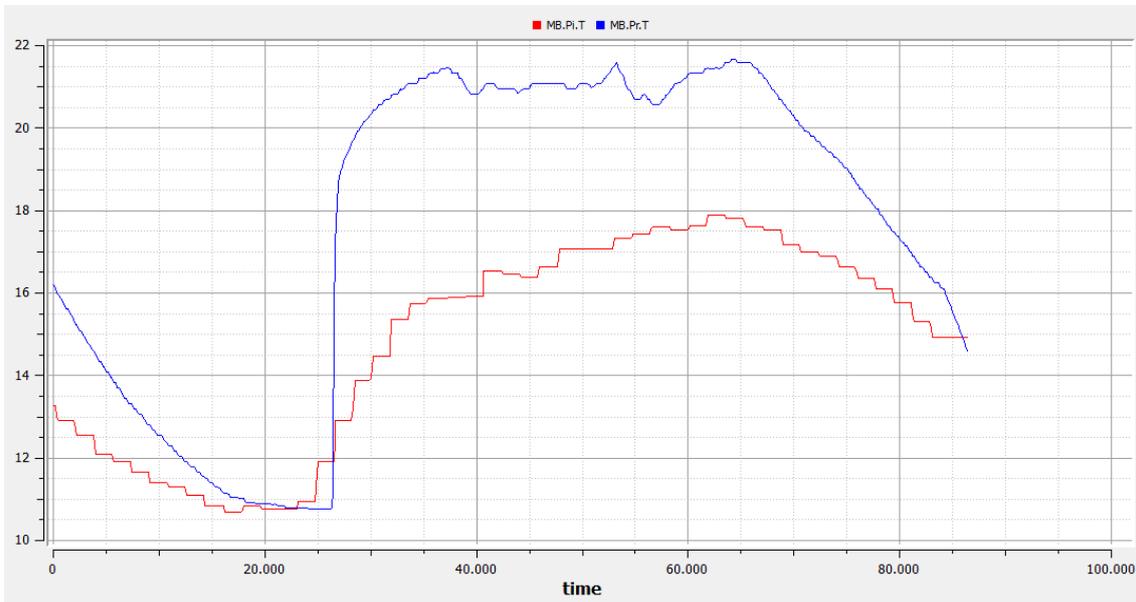


Figura 14: Temperaturas de entrada al MB (MB.Pi.T y MB.Pr.T) del experimento 1 (01/06/2013)

- MB.Pr.W: La humedad específica del aire de retorno (figura 15, en azul) sigue una curva de forma similar a la de la temperatura de retorno. Esto se debe a que la humedad relativa más o menos se mantiene estable en todo el experimento. Sin embargo, el aumento de los 26000 segundos es menos pronunciado, lo que se traduce en un descenso del 30% en humedad relativa (del 75% al 45%).
- MB.Pi.W: La humedad específica del aire del exterior (figura 15, en rojo) presenta una alta variabilidad, incluso en zonas de temperatura más o menos estable.

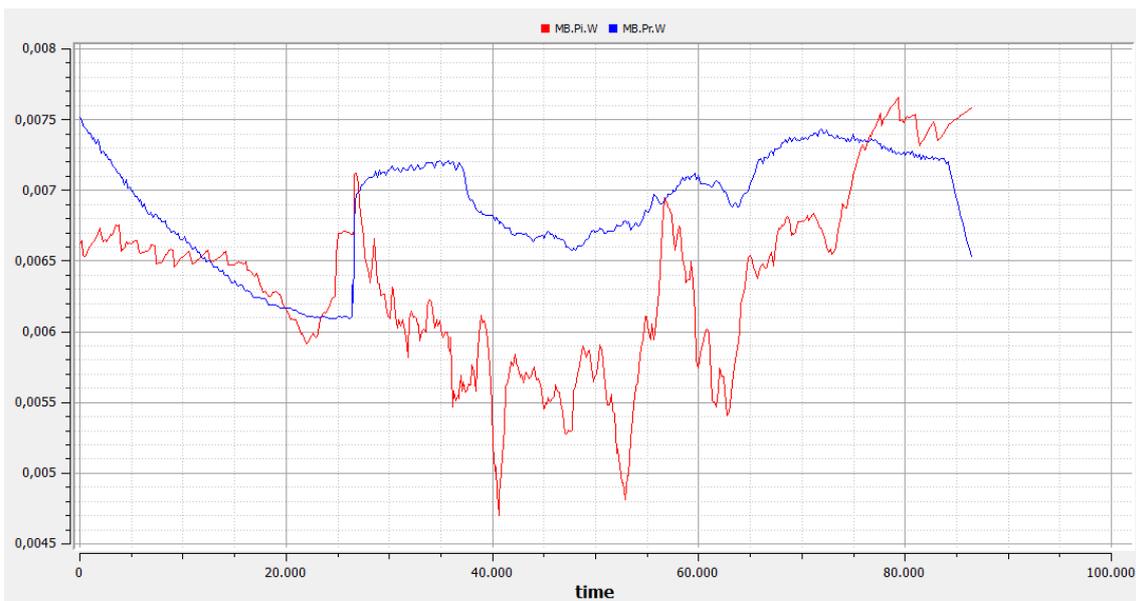


Figura 15: Humedades específicas de entrada al MB (MB.Pi.W y MB.Pr.W) del experimento 1

- Actuadores: Las señales de control de los diferentes módulos pueden verse en la figura 16. En ella se observa que casi todas son planas e iguales a 0, excepto la compuerta del módulo mezclador (en rojo) antes mencionada, y la que modela la apertura de la válvula de agua calefactora de la bobina de calentamiento (en azul claro).

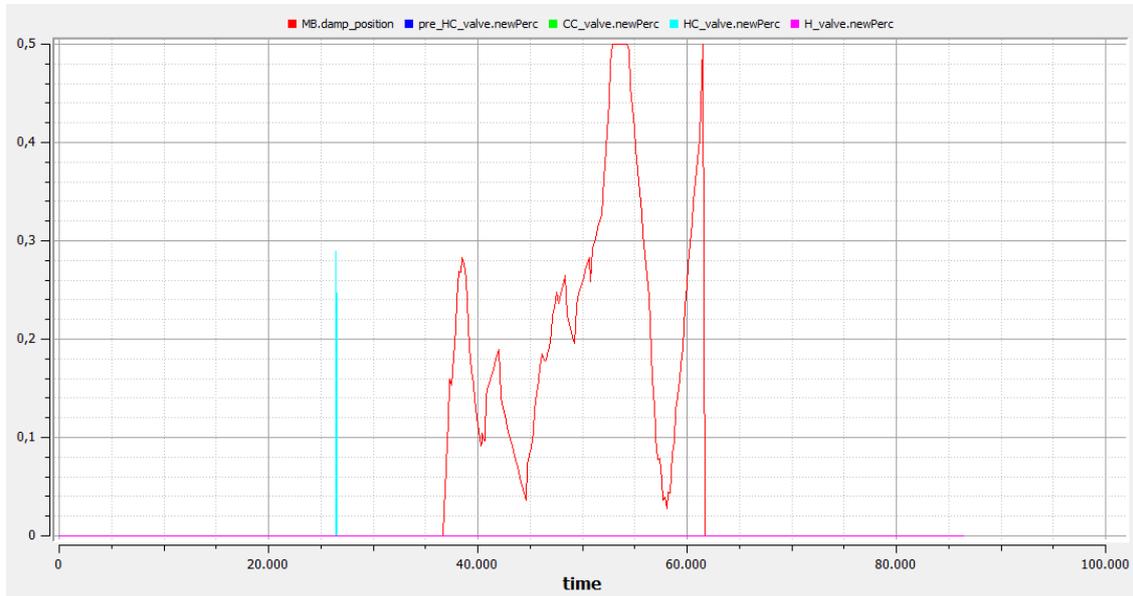


Figura 16: Señales de control de componentes del experimento 1

El efecto evidente es, como vemos en la imagen siguiente en azul, la mezcla del aire reciclado (en marrón) con el procedente del exterior (en rosa) cuando se activa la compuerta del módulo mezclador.

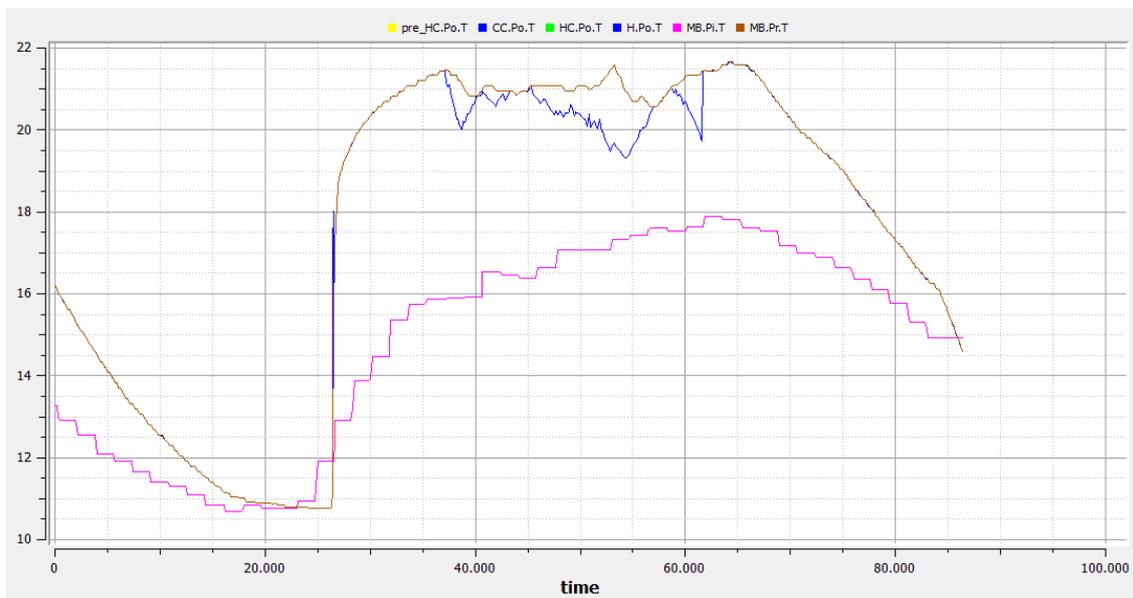


Figura 17: Temperatura por componentes. Experimento 1

El levísimo efecto de la activación de la bobina de calentamiento es prácticamente imperceptible a causa de la histéresis de la válvula (ver figura 10) y de que se produce casi en el mismo momento que el gran cambio en la temperatura del aire reciclado. Tan sólo haciendo zoom sobre la imagen puede verse con detalle. Así, en la figura 18 se aprecia el pequeño escalón de 2 minutos en la temperatura de salida, con un aumento momentáneo de unos 4°C.

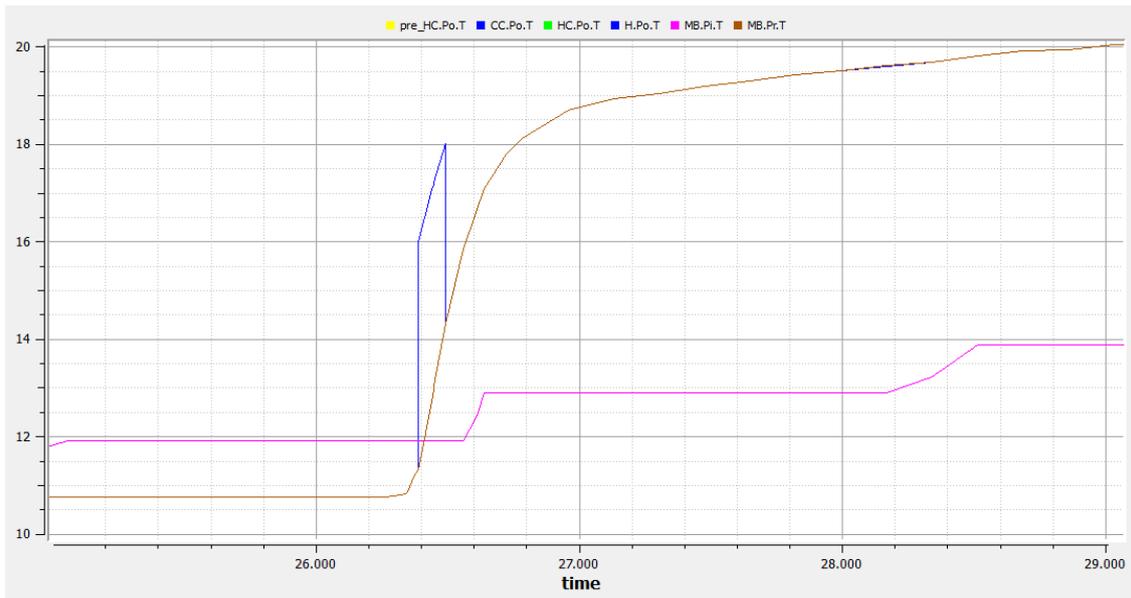


Figura 18: Detalle de las temperaturas por componentes. Experimento 1

En cuanto a la humedad, sólo el módulo mezclador tiene un efecto significativo sobre las señales, de la misma forma que con las temperaturas. Sin embargo, la breve activación de la bobina calentadora no causa ningún cambio en la humedad del aire, ya que, por mucho que lo calentemos, no aumenta ni disminuye su contenido de agua. En la figura, la señal marrón es la humedad específica del aire de retorno, la rosa es la del aire procedente del exterior, y la azul de la salida del módulo mezclador, resultado de la composición de las dos anteriores.

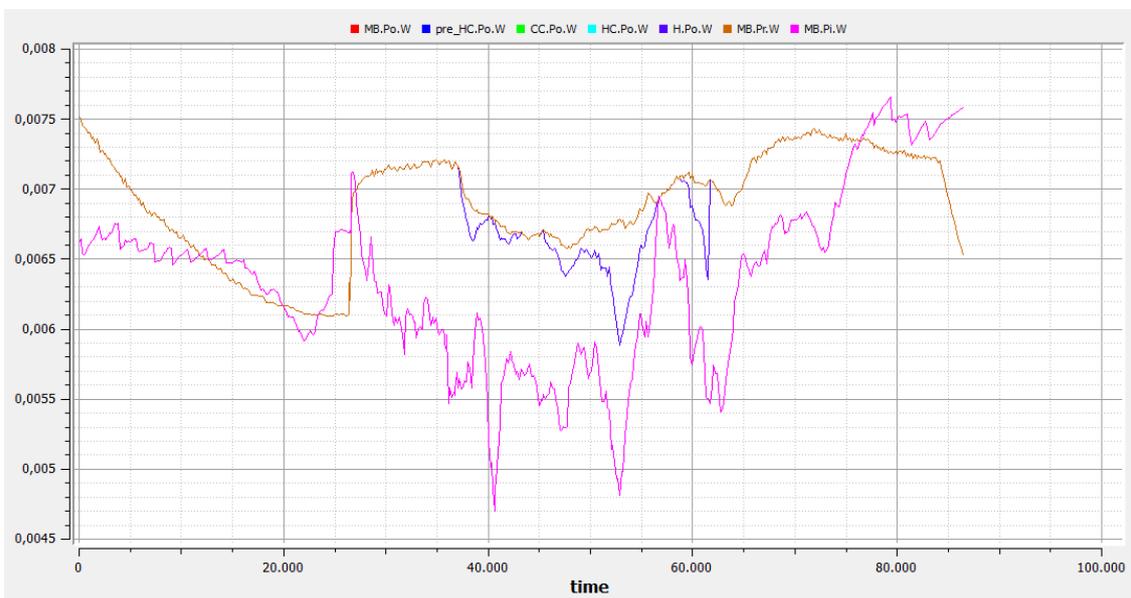


Figura 19: humedad específica por componentes. Experimento 1

3.6.2.- Experimento 2: Funcionamiento nominal (6 de Septiembre de 2012)

Éste es otro ejemplo de funcionamiento nominal del sistema, sin fallos de componentes y con sólo dos de ellos en funcionamiento. Se trata de un caso de deshumidificación con corrección de la temperatura. El sistema activa la válvula del módulo refrigerador para reducir la temperatura del aire, logrando así que alcance el punto de rocío y parte de su humedad condense. En una fase posterior el aire se vuelve a calentar para tratar de volver a una temperatura más agradable.

Entradas relevantes:

- MB.Pr.T: La temperatura de retorno comienza descendiendo suavemente desde los 16.5°C hasta los 10.6°C en unos 26000 segundos, cuando el encendido de la calefacción central eleva la temperatura hasta los 20°C. Ésa es su característica más importante. Puede verse en la figura 20 en azul.
- MB.Pi.T: El comportamiento de la señal de temperatura exterior (figura 20, en rojo) es muy similar al del experimento anterior. También describe escalones cada 15 minutos aproximadamente, aunque en este caso llega casi a los 21°C.

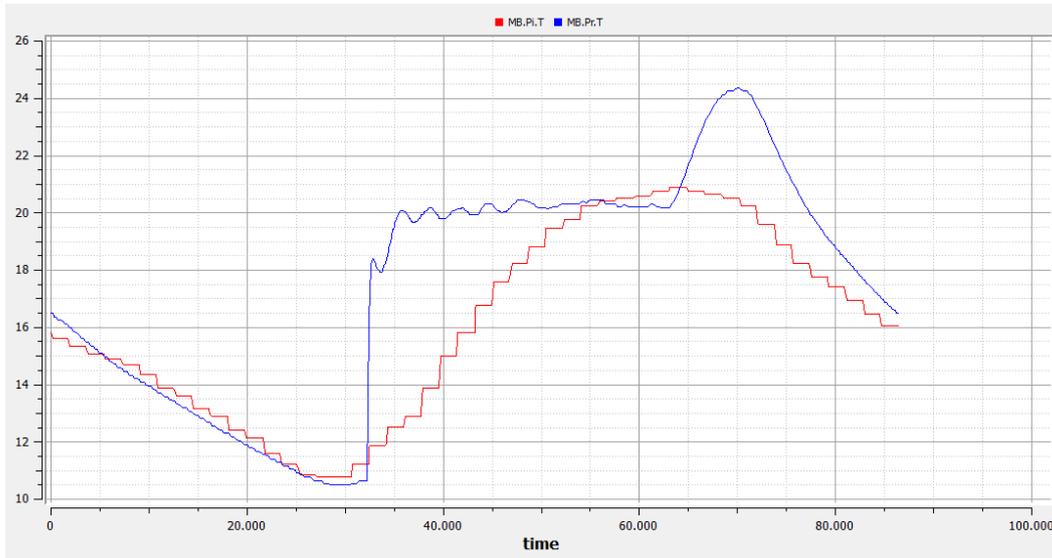


Figura 20: Temperaturas de entrada al MB (MB.Pi.T y MB.Pr.T) del experimento 2 (06/09/2012)

- MB.Pr.W: La humedad específica del aire de retorno (figura 21, en azul) sigue, como en el caso anterior, una curva de forma similar a la de la temperatura de retorno. De nuevo, el aumento hacia las 7 a.m. (segundo 26000) es menos pronunciado, lo que se traduce en un descenso de casi el 30% en humedad relativa (del 85% al 47%).
- MB.Pi.W: La humedad específica del aire del exterior (figura 21, en rojo) presenta de nuevo una alta variabilidad, incluso en zonas de temperatura estable. Esto indica que quizá se trataba de un día de chubascos intermitentes.

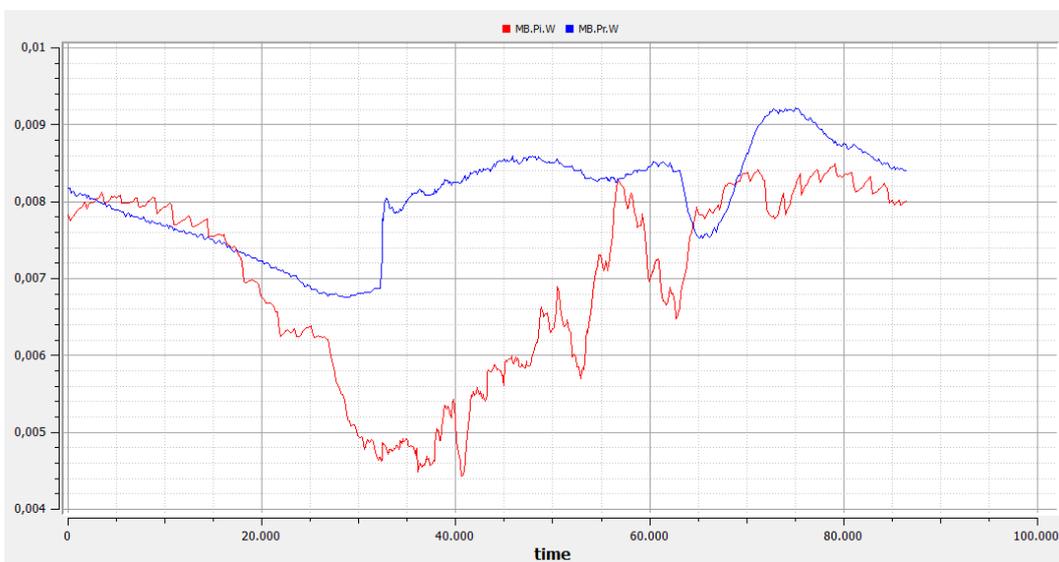


Figura 21: Humedades específicas de entrada al MB (MB.Pi.W y MB.Pr.W) del experimento 2

- HC_wTemp.y: La figura 22 muestra claramente cómo la temperatura del agua caliente (en rojo) se controla solamente durante el horario en que la universidad está abierta. Hacia los 30000 segundos (8:20 a.m.) esta agua se calienta hasta los 69.5°C aproximadamente, con una variabilidad de más o menos 1°C. Más tarde, a los 64000 segundos (5:40 p.m.) deja de calentarse y su temperatura desciende lentamente.
- CC_wTemp.y: El caso del agua fría puede verse en azul en la figura 22. Es el mismo caso que el del agua caliente, pero la diferencia de temperatura con el agua durante las horas de cierre de la universidad es menor, ya que viene a unos 14°C y se enfría hasta los 10°C aproximadamente.

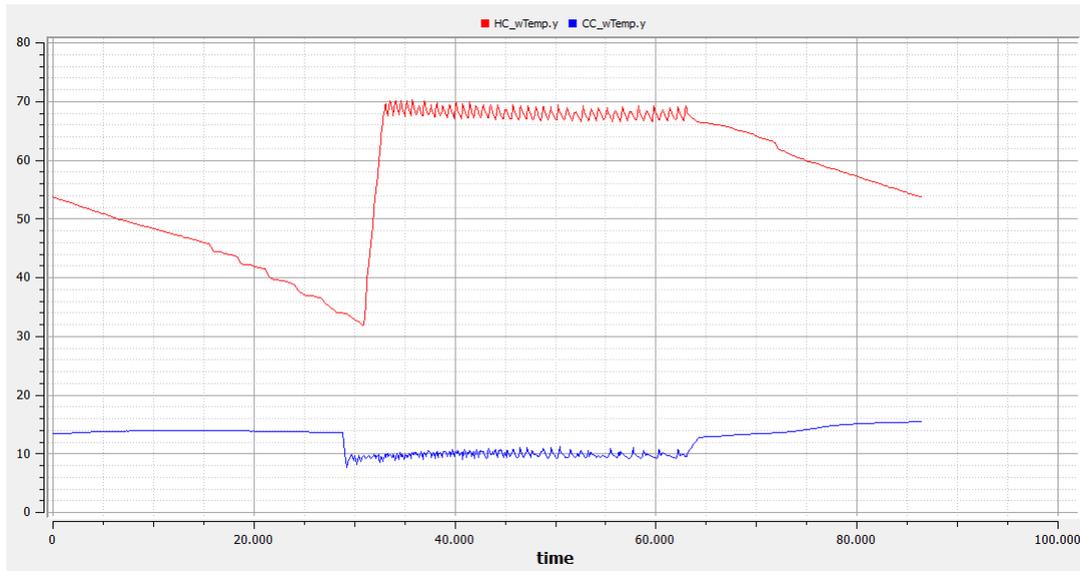


Figura 22: Temperaturas del agua calefactora (HC_wTemp.y , rojo) y enfriadora (CC_wTemp.y , azul). Experimento 2

- Actuadores: Las señales de control de los diferentes módulos pueden verse en la figura 23. Al tratarse de un experimento de prueba de la deshumidificación, las únicas válvulas que se activan (y lo hacen casi simultáneamente, de otra manera no tendría sentido) son las del módulo enfriador (en verde) y las del calefactor (en azul claro).

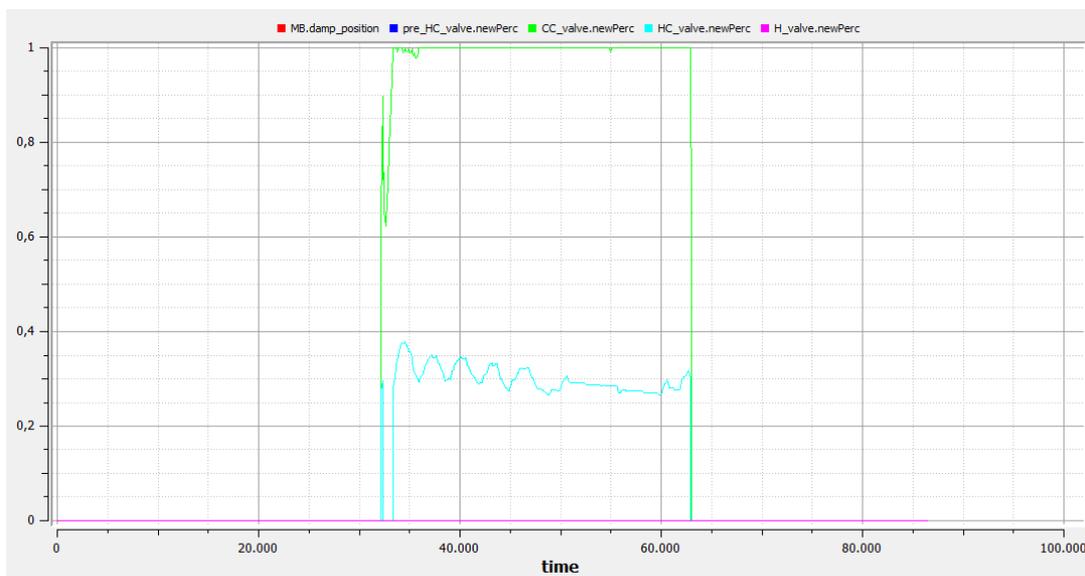


Figura 23: Señales de control de componentes del experimento 2

Como se observa en la figura 24, el efecto inmediato de la activación del módulo enfriador rebaja la temperatura de entrada (en rojo) entre 6°C y 7°C. El resultado es una curva con bastante ruido (en azul), debido a la variabilidad de la temperatura del agua refrigeradora (ver figura 22).

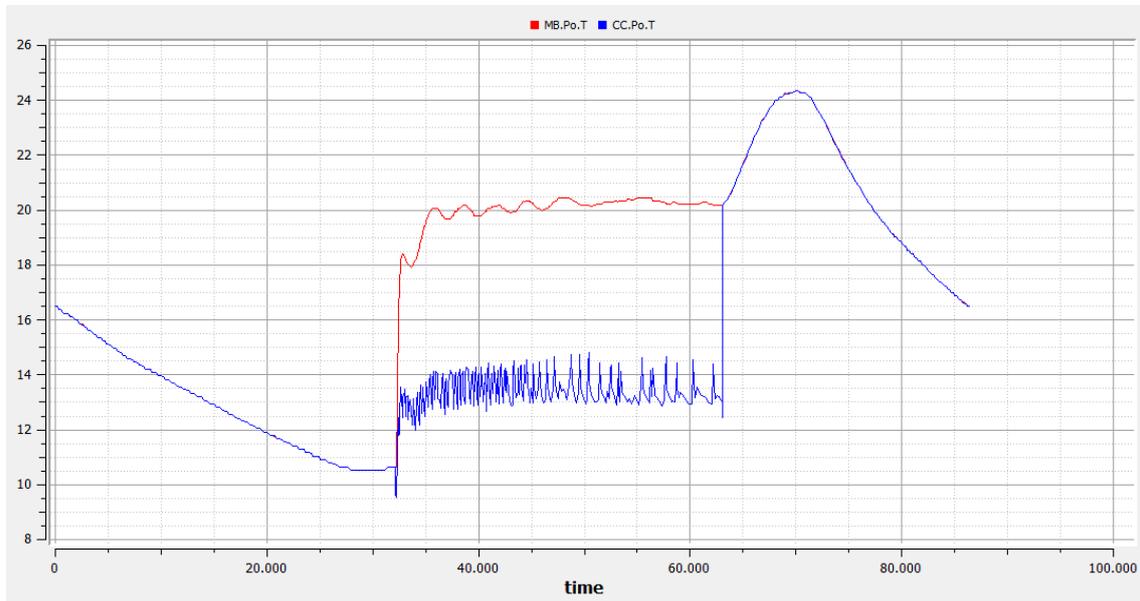


Figura 24: Efecto del enfriamiento de la bobina refrigeradora en la temperatura. Experimento 2

Posteriormente, este aire enfriado se calienta unos 4 grados en la bobina calefactora (figura 25), dando como resultado la curva verde.

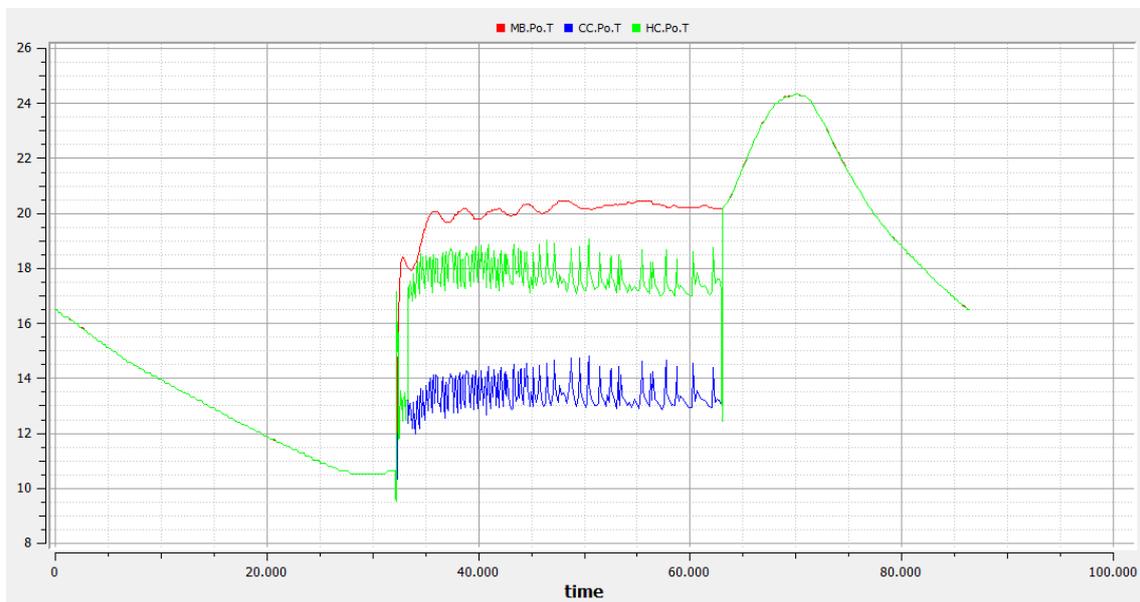


Figura 25: Efecto completo de la deshumidificación en la temperatura. Experimento 2

El efecto en la humedad específica se nota también con facilidad en la gráfica 26. En ella se pueden ver la señal de entrada (en azul) y la de salida (en rojo), superpuesta a la primera excepto en el tiempo en que está activada la bobina de enfriamiento. También se aprecia un gran ruido en la lectura de la señal de salida.

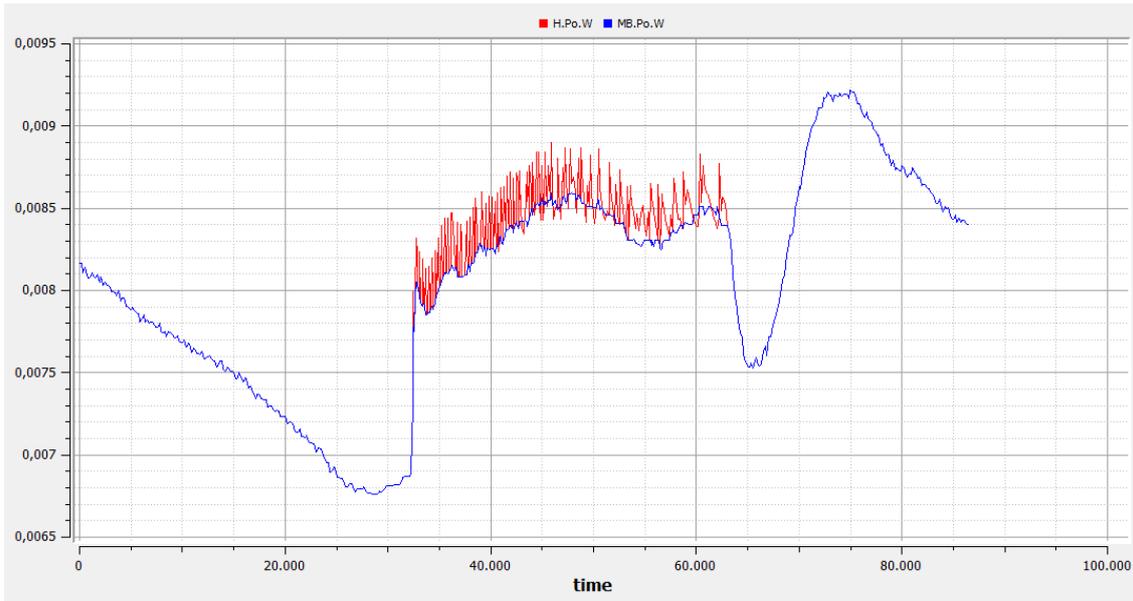


Figura 26: Resultado de la deshumidificación en la humedad específica. Experimento 2

3.6.3.- Experimento 3: Funcionamiento nominal (7 de Febrero de 2013)

Éste es otro caso de funcionamiento nominal del sistema, sin fallos de componentes y con tres de ellos en funcionamiento. Se trata de un ejemplo para comprender mejor el funcionamiento del módulo humidificador, y su efecto en la humedad y la temperatura del aire de salida. Previamente, los módulos de enfriamiento y recalentamiento se activan de manera muy breve.

Entradas relevantes:

- MB.Pr.T: La temperatura de retorno tiene las mismas características que las de los dos experimentos precedentes. Puede verse en azul en la figura 27.
- MB.Pi.T: El comportamiento de la señal de temperatura exterior (figura 27, en rojo) también es muy similar a la de los experimentos anteriores. Su diferencia más importante es que en este caso es más fría y menos variable.

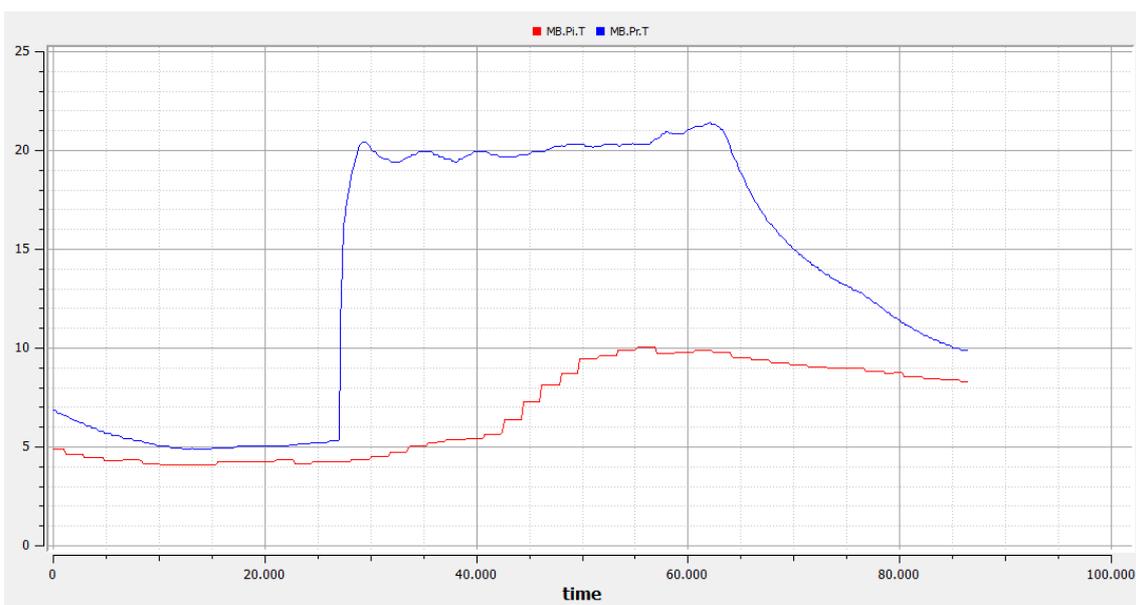


Figura 27: Temperaturas de entrada al MB (MB.Pi.T y MB.Pr.T) del experimento 3 (07/02/2013)

- MB.Pr.W: La humedad específica del aire de retorno (figura 28, en azul) tiene una forma particular en este experimento, con dos máximos locales al principio y al final del horario de apertura del centro. En el segundo caso, la humedad relativa llega casi al 65%.
- MB.Pi.W: La humedad específica del aire del exterior (figura 28, en rojo) conserva el ruido característico de otros experimentos, pero su variabilidad a lo largo de la prueba se reduce mucho. Esto provoca que dos puntos con temperaturas diferentes, como son el segundo 20000 (4.2°C) y el 50000 (9.5°C) cuenten con humedades específicas muy parecidas (en torno a 4.4 g/kg) y dos humedades relativas muy diferentes (81% y 54% respectivamente).

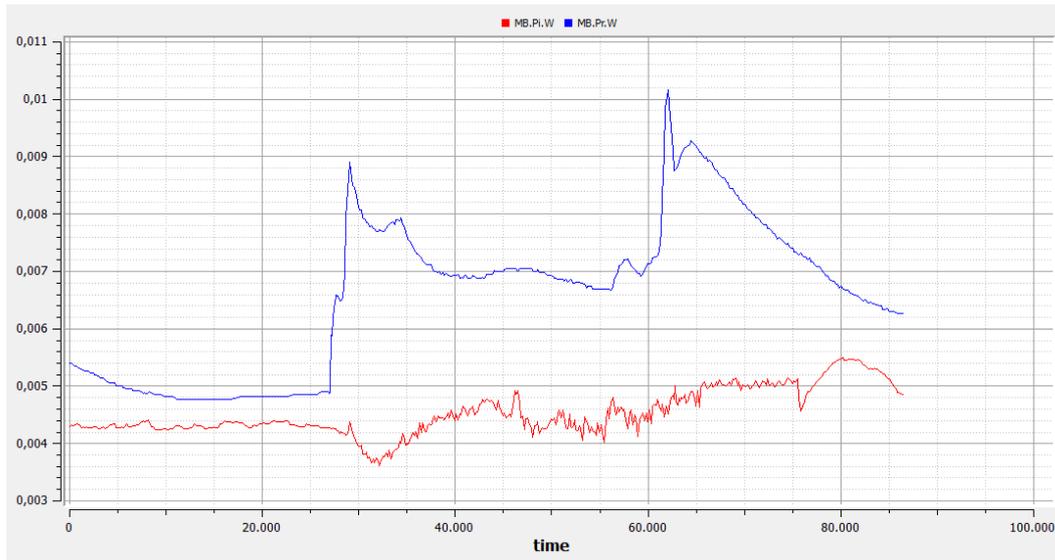


Figura 28: Humedades específicas de entrada al MB (MB.Pi.W y MB.Pr.W) del experimento 3

- Actuadores: Las señales de control de los diferentes módulos pueden verse en la figura 29. El principal componente activo es el módulo humidificador (en azul), pues el experimento trata de comprobar los efectos de este proceso en el aire. Además el calentador y el enfriador se activan brevemente por la mañana (segundo 27000, en torno a las 7:30a.m.).

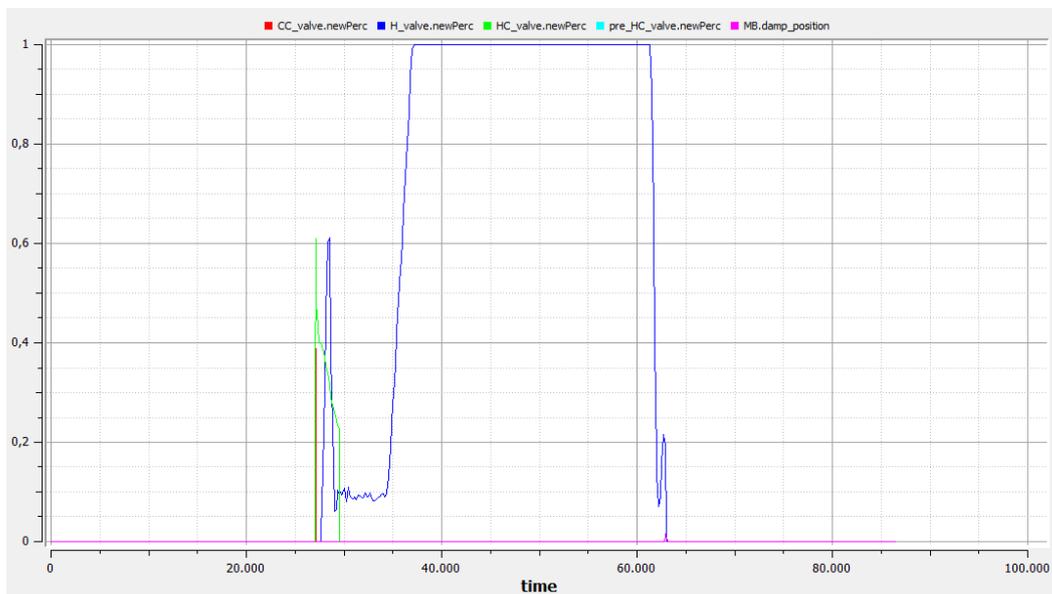


Figura 29: Señales de control de componentes. Experimento 3

Las siguientes figuras muestran, por etapas, los cambios que producen las diferentes activaciones de los módulos en la temperatura del aire que circula por el aparato. En primer lugar, en la figura 30, el efecto del módulo enfriador (CC.Po.T, en azul) sobre la señal de entrada (Mb.Po.T, en rojo) sólo es perceptible mediante zoom (figura 31) debido a su corta duración.

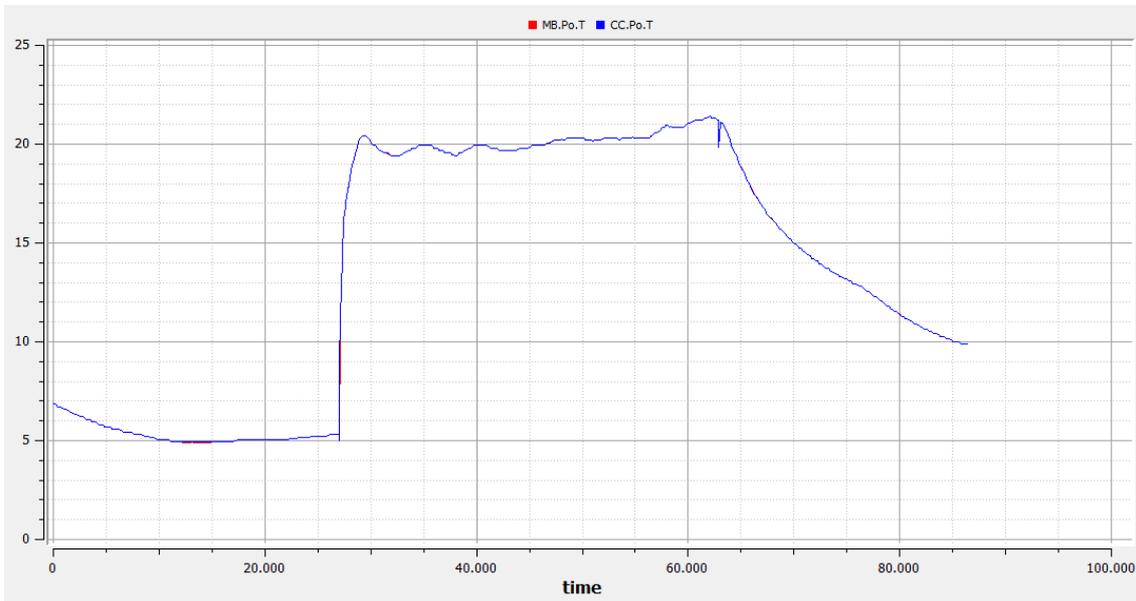


Figura 30: Resultado del enfriamiento en la temperatura. Experimento 3

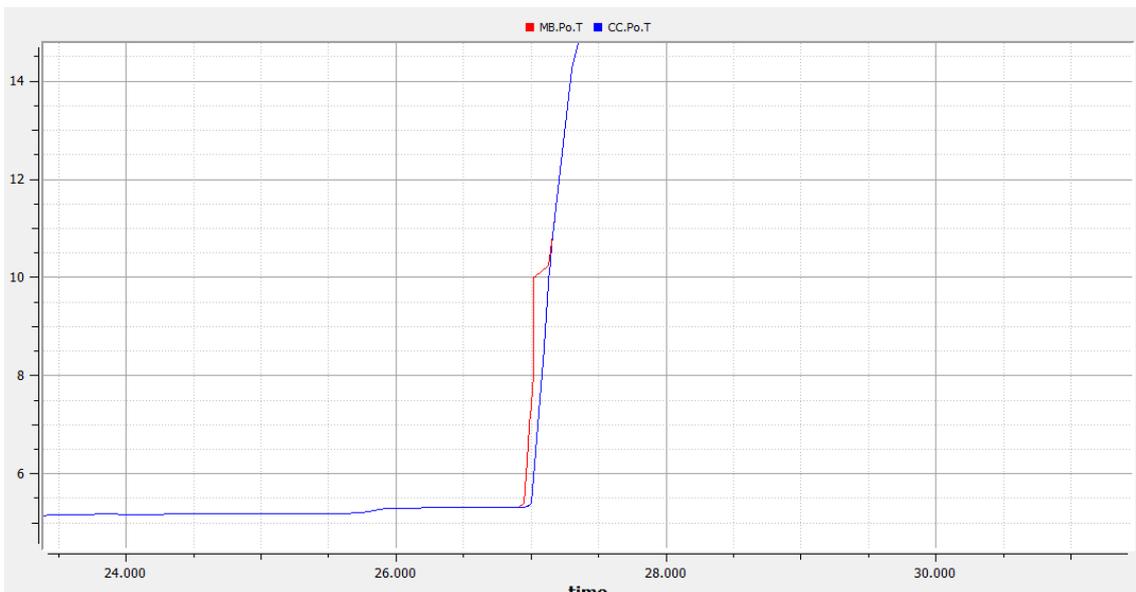


Figura 31: Resultado del enfriamiento en la temperatura (zoom). Experimento 3

Después del enfriamiento, el aire pasa por la bobina de calentamiento, que aumenta en casi 4°C la temperatura durante unos 40 minutos. Esto se recoge en la figura 32, con el aire tras el enfriamiento (CC.Po.T) en azul y el resultado del calentamiento posterior (HC.Po.T) en rojo.

Por último, los efectos del humidificador se prolongan más de 9 horas e incrementan ligeramente la temperatura del aire por adición de vapor. En la figura 33 se representan el aire a la salida del módulo calefactor (HC.Po.T, en azul) y tras el humidificador (H.Po.T, en rojo).

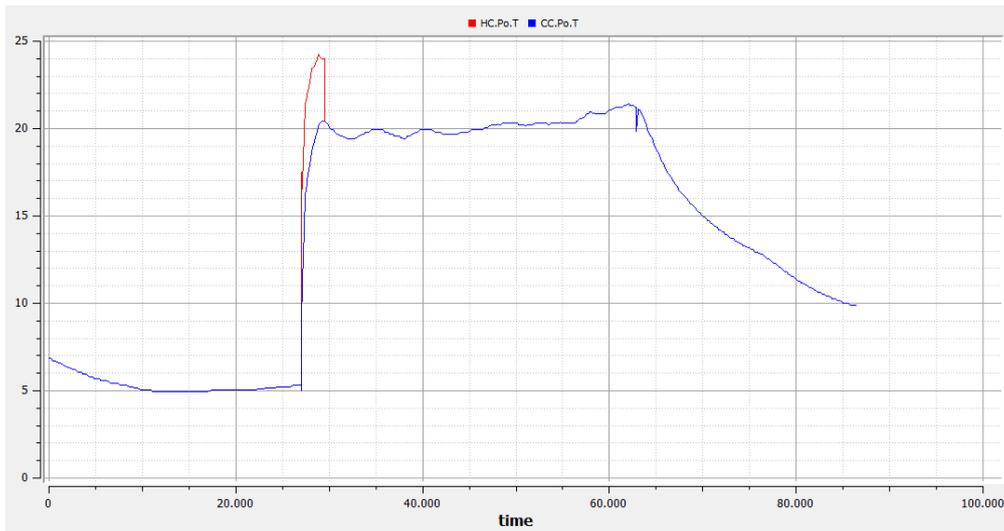


Figura 32: Resultado del enfriamiento (azul) y posterior calentamiento (rojo) en la temperatura. Experimento 3

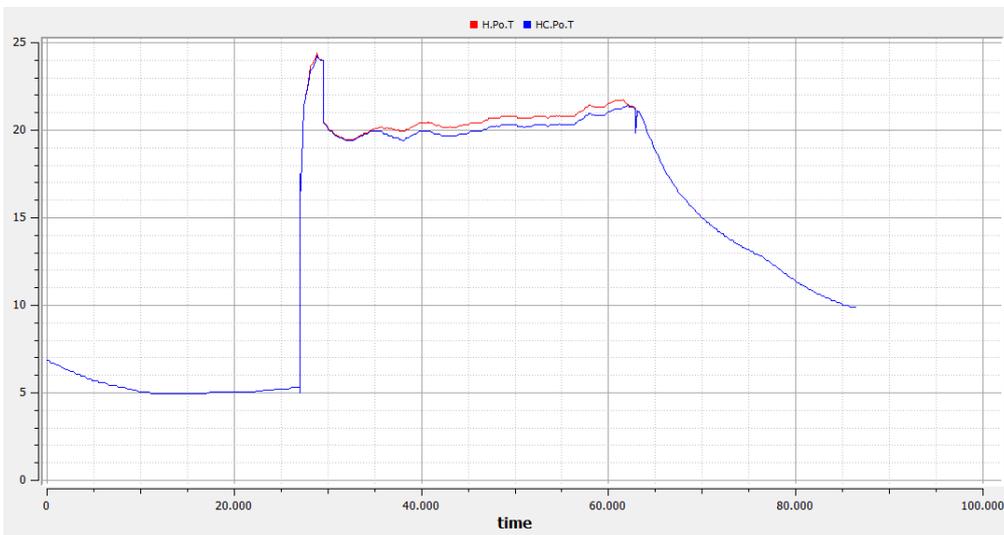


Figura 33: Resultado del calentamiento (azul) y la humidificación (rojo) sobre la temperatura. Experimento 3

La figura 34 muestra el efecto completo sobre la temperatura del aire, desde que éste sale del mezclador (en azul) hasta que sale del dispositivo (en rojo).

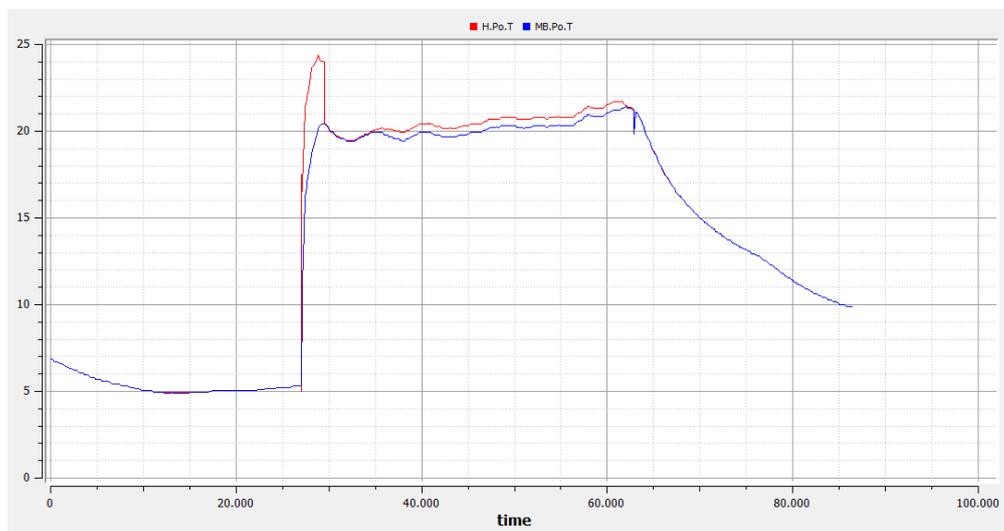


Figura 34: Temperaturas de salida del MB (MB.Po.T) y del humidificador (H.Po.T) del experimento 3

En la figura 36, referente a la humedad relativa a la salida de los diferentes componentes del aparato, resulta fácil apreciar el efecto del módulo humidificador (en rosa), que es el único que afecta a la señal de entrada (en rojo, tapada por completo por la señal azul claro del módulo calentador), ya que nunca llega a condensar en el módulo enfriador.

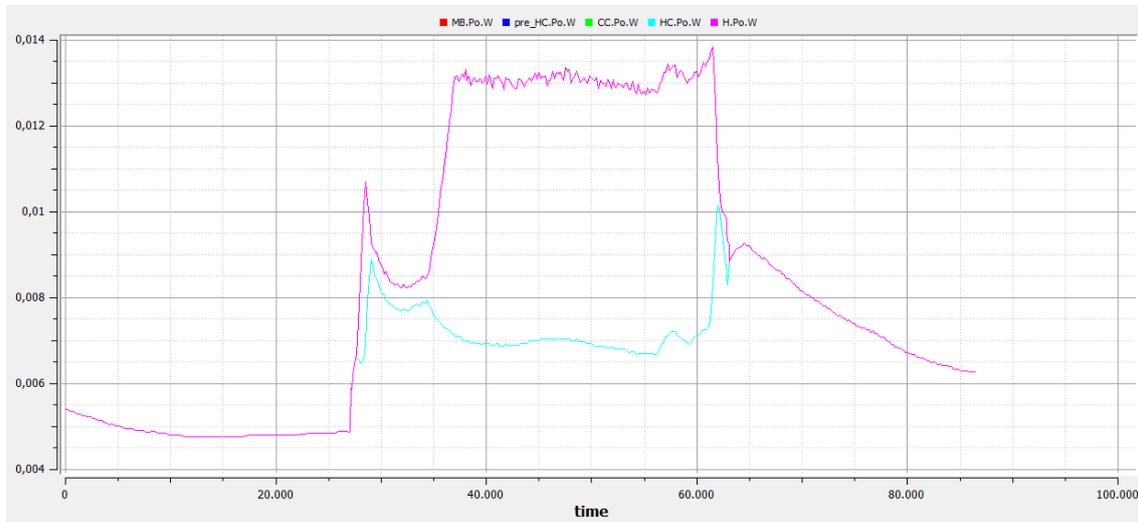


Figura 35: Humedad específica por componentes. Experimento 3

Además, el orden de magnitud de la humedad específica suele ser de unos pocos gramos por kilo de aire, pero el modelo lo expresa en unidades del S.I., por lo que son señales muy pequeñas en comparación con las demás. Esto hace que modificaciones del orden de milésimas en el ratio de humedad constituyan cambios de varias unidades en la humedad relativa. En el ejemplo de la figura anterior, en el segundo 40000, el ratio de humedad de entrada (curva azul claro) es de 0.007 kg de agua por kg de aire, lo que a una temperatura de 20°C y a una presión de una atmósfera se corresponde con una humedad relativa de aproximadamente el 48%. La señal de salida (curva rosa) en el mismo punto temporal corresponde a unos 0.013 kg/kg, que en las mismas condiciones ambientales supone una humedad relativa de más o menos el 89%.

3.6.4.- Experimento 4: Fuga en la bobina enfriadora (27 de Marzo de 2013)

Éste es un experimento en el que se fuerza un fallo en la bobina de enfriamiento, en forma de pérdida de líquido refrigerante en la válvula que alimenta al módulo. Es decir, mientras que el ordenador de control realiza lecturas de la apertura de la válvula a 0%, realmente se encuentra abierta a diferentes porcentajes, y por tanto el líquido refrigerante está pasando a la bobina y afectando a las propiedades del aire circulante.

Este proceso se realiza dos veces, la primera entre los segundos 32100 y 43900 y la segunda entre los segundos 44200 y 55800. Además, hay tres aperturas de la válvula del módulo calentador, dos de las cuales coinciden con las del enfriador, y dos aperturas de la válvula del humidificador, antes y después de las actuaciones del refrigerador.

Entradas relevantes:

- MB.Pr.T: La temperatura es muy parecida a la del experimento número 3. Puede verse en azul en la figura 36.
- MB.Pi.T: El comportamiento de la señal de temperatura exterior (figura 36, en rojo) también es muy similar a la del experimento anterior. Sin embargo, en este caso es todavía más fría que en aquél (en algunos puntos no supera 1°C).

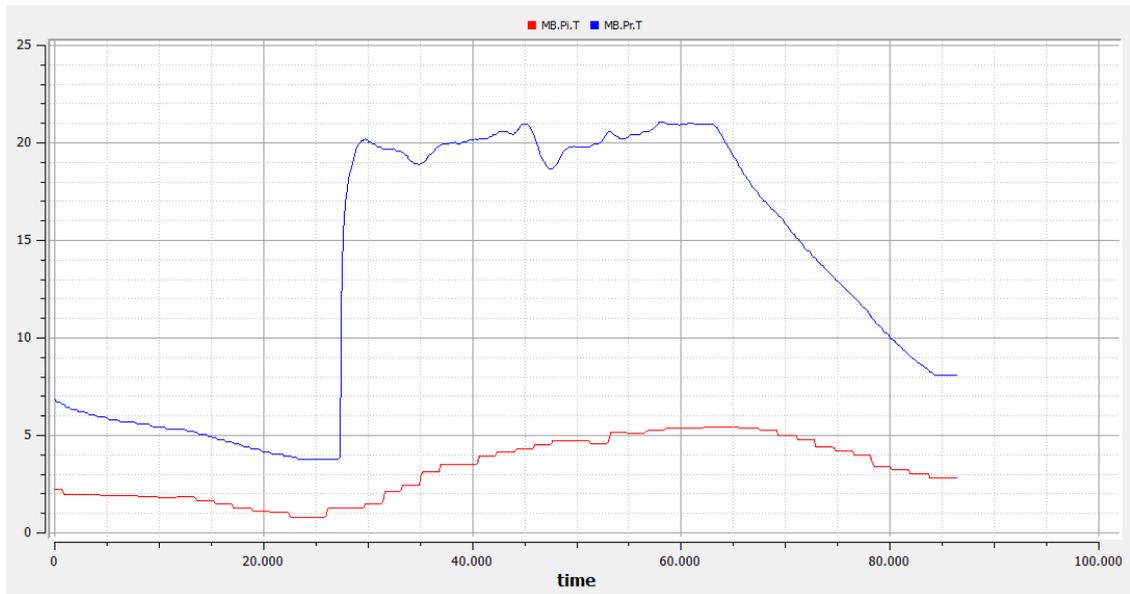


Figura 36: Temperaturas de entrada al MB (MB.Pi.T y MB.Pr.T) del experimento 4 (27/03/2013)

- MB.Pr.W: La humedad específica del aire de retorno (figura 37, en azul) tiene una forma particular en este experimento, con dos máximos locales al principio y al final del horario de apertura del centro. Es un caso muy parecido al del experimento 3.
- MB.Pi.W: La humedad específica del aire del exterior (figura 37, en rojo) conserva el ruido característico de otros experimentos, pero su variabilidad a lo largo de la prueba se reduce aún más que en el tercer experimento. Esto provoca grandes cambios en la humedad relativa, que llega a bajar del 20%.

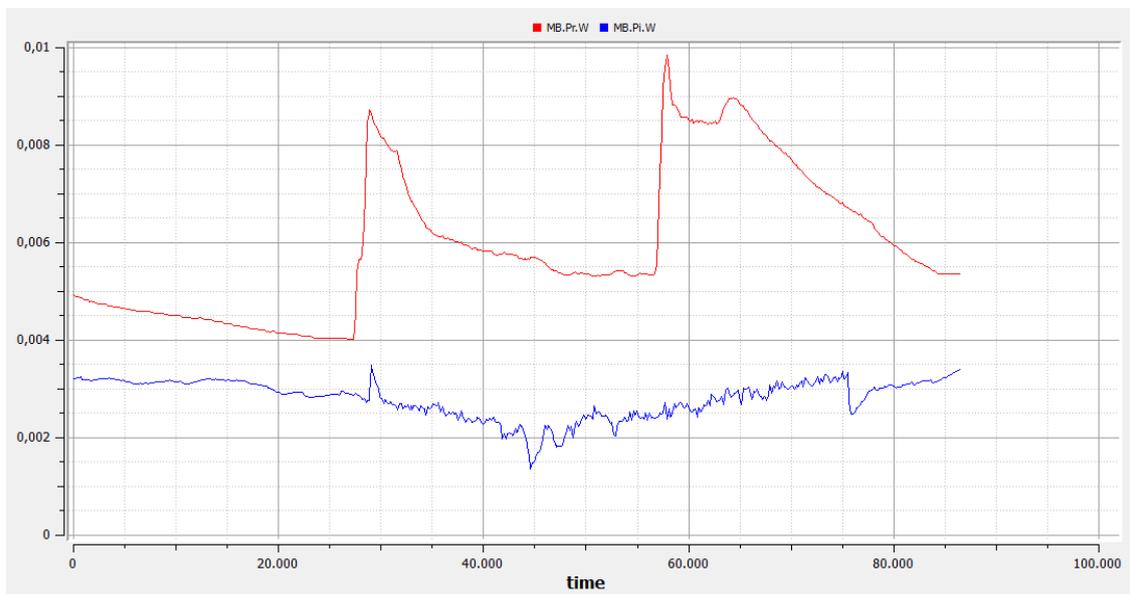


Figura 37: Humedades específicas de entrada al MB (MB.Pi.W y MB.Pr.W) del experimento 4

- HC_wTemp.y: La figura 38 muestra una diferencia con respecto a otros experimentos. La temperatura del agua caliente (en rojo) se controla durante todo el experimento (24h), manteniéndose en todo momento entre 68°C y 70°C aproximadamente, con un alto grado de ruido.
- CC_wTemp.y: El caso del agua fría puede verse en azul en la figura 22. Es el mismo que el del agua caliente, pero su temperatura está en unos 10°C aprox.

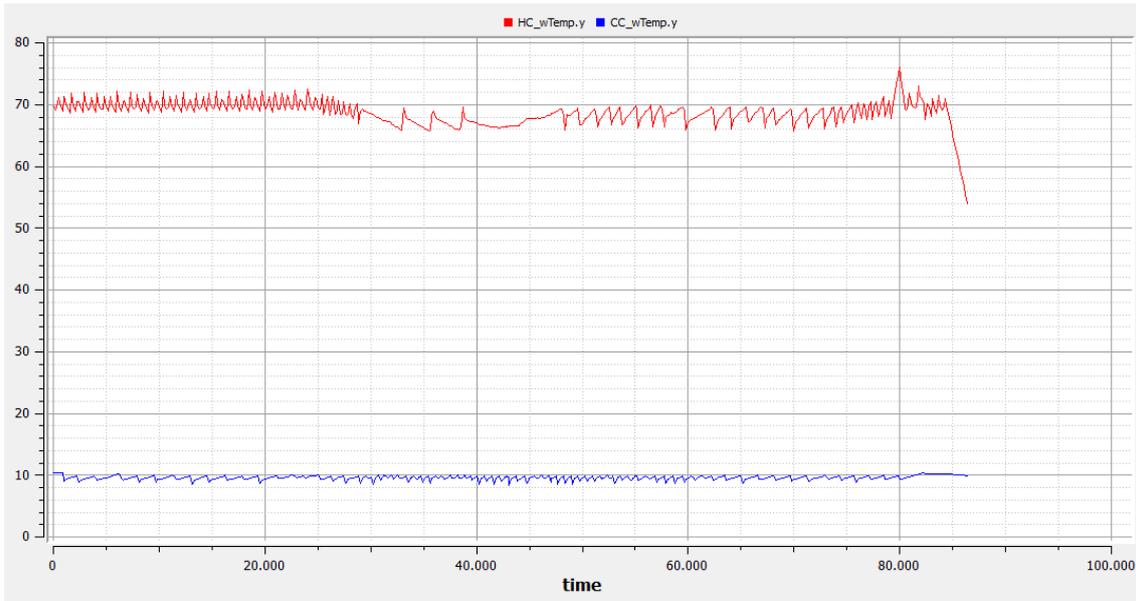


Figura 38: Temperaturas del agua calefactora (HC_wTemp.y , rojo) y enfriadora (CC_wTemp.y , azul) del exp. 4

- Actuadores: Las señales de control de los diferentes módulos pueden verse en la figura 39. Como ya se ha explicado, se trata de un experimento bastante completo, ya que entran en funcionamiento 3 de los 5 componentes principales del dispositivo: El enfriador (en rojo), el calentador (en verde) y el humidificador (en azul).

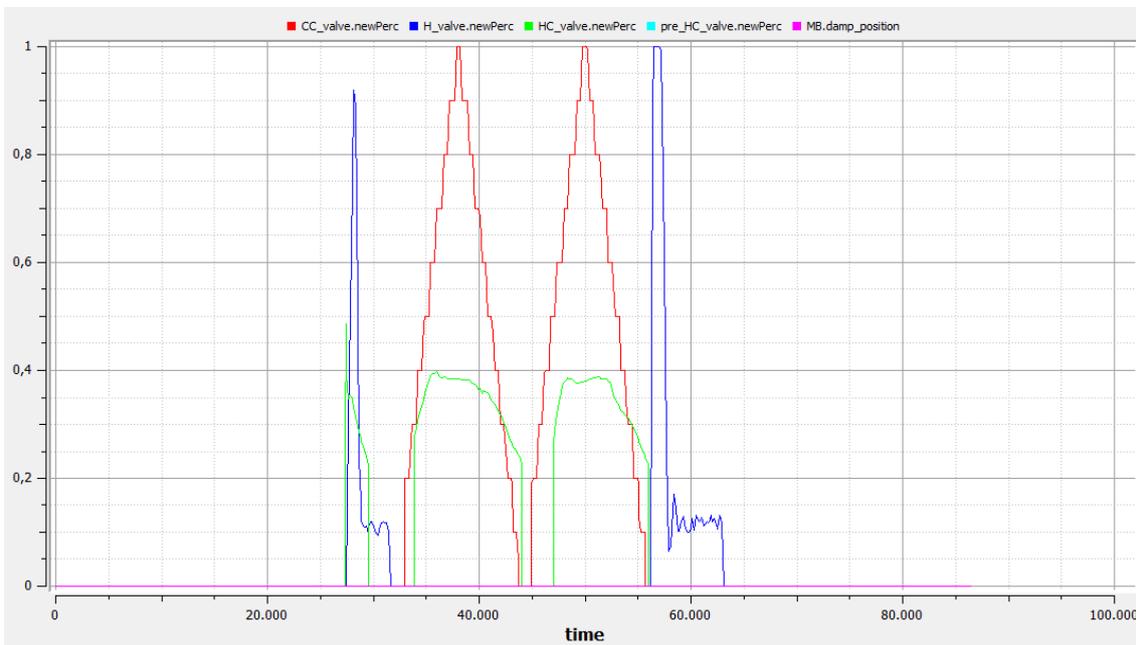


Figura 39: Señales de control de componentes. Experimento CC_Leakage del 07/02/2013

Para ver los efectos del sistema sobre la temperatura del aire circulante a través de los diferentes módulos, se detallará el proceso por partes. En primer lugar (figura 40), la señal de entrada (MB.Po.T, en azul) sufre un doble enfriamiento en la bobina refrigeradora (CC.Po.T, en rojo), que llega a ser de hasta 6 grados. Debemos recordar que el agua fría está a unos 10°C.

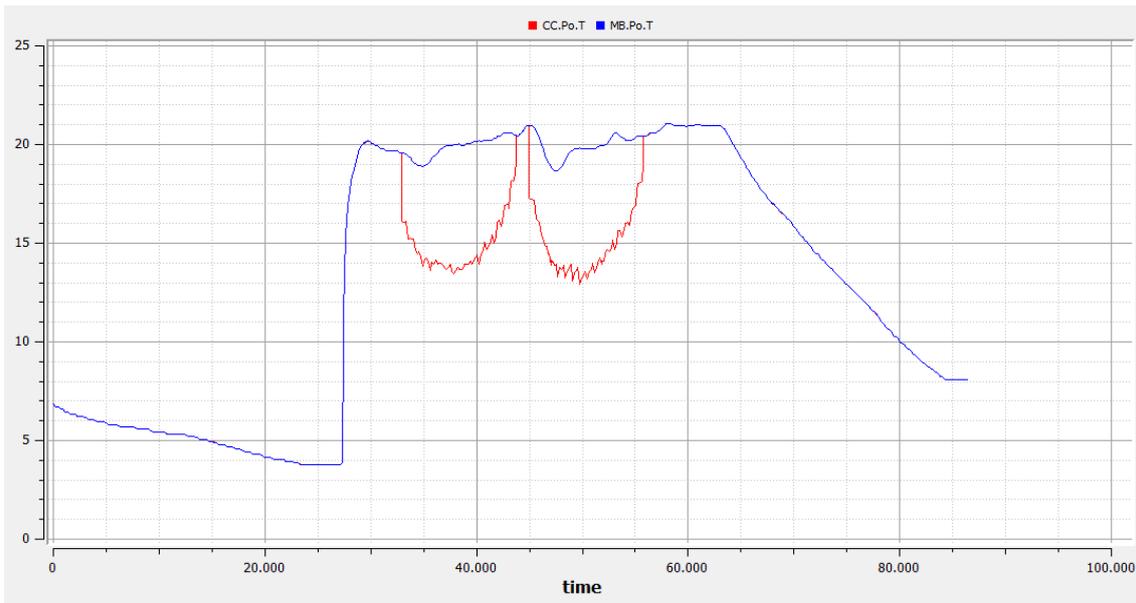


Figura 40: Resultado del enfriamiento en la temperatura. Experimento 4

Posteriormente (figura 41), la bobina de calentamiento entra en funcionamiento hasta tres veces, dos de ellas coincidiendo con la activación de la bobina enfriadora, aunque con un retraso de unos minutos. Esto provoca que la temperatura en esta parte (CC.Po.T, en rojo) se parezca a la de entrada (HC.Po.T, en azul), excepto durante la primera activación de la bobina de calentamiento y durante los desfases de la misma con la de enfriamiento.

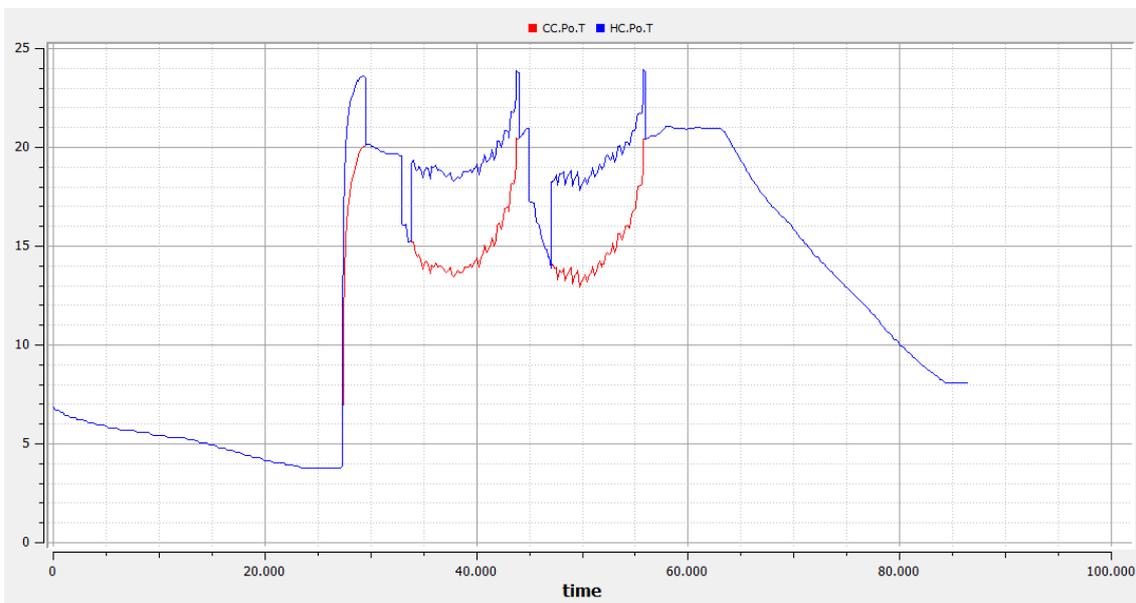


Figura 41: Resultado del calentamiento en la temperatura. Experimento 4

Como última etapa del experimento, el humidificador se activa dos veces, al principio de la mañana (segundo 27500 al 31600) y por la tarde (segundo 56100 al 63000), con dos fases en cada una de las activaciones. Un primer pico de más del 90% de apertura de la válvula de vapor, y una zona más o menos estable en torno al 10%. En la figura 42, el efecto parece casi imperceptible, y es necesario aplicar zoom (figura 43) para verlo bien. En ambos casos, se muestra en rojo la señal de salida del módulo calefactor y en azul la temperatura tras la humidificación. Se puede apreciar un ligero aumento como consecuencia del vapor.

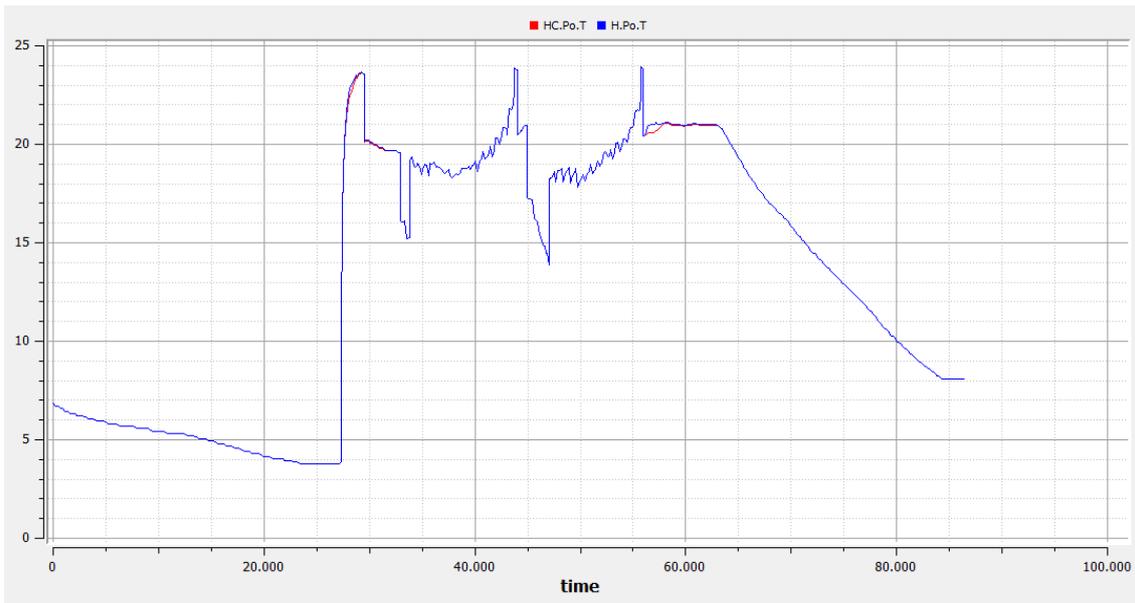


Figura 42: Resultado de la humidificación en la temperatura. Experimento 4

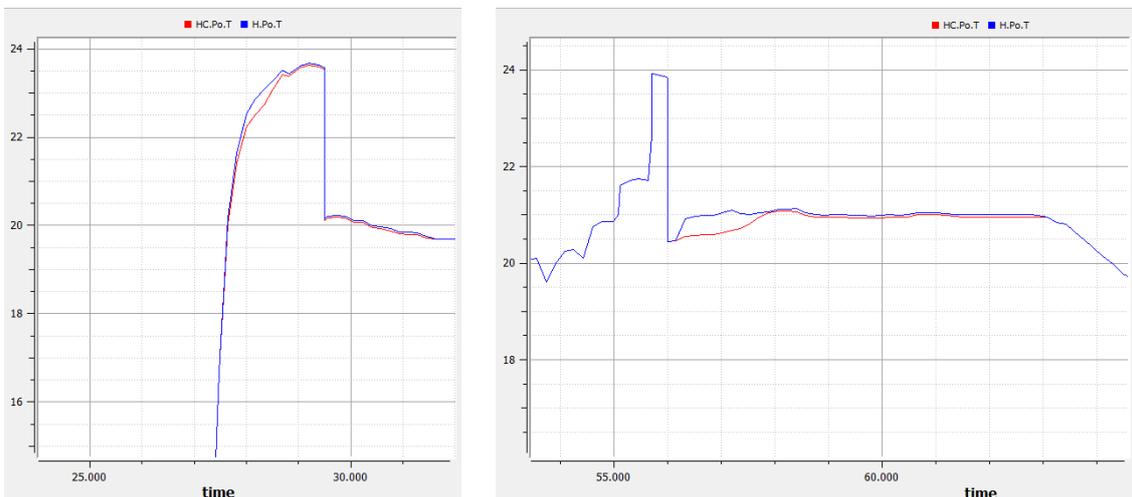


Figura 43: Resultado de la humidificación en la temperatura (zoom). Experimento 4

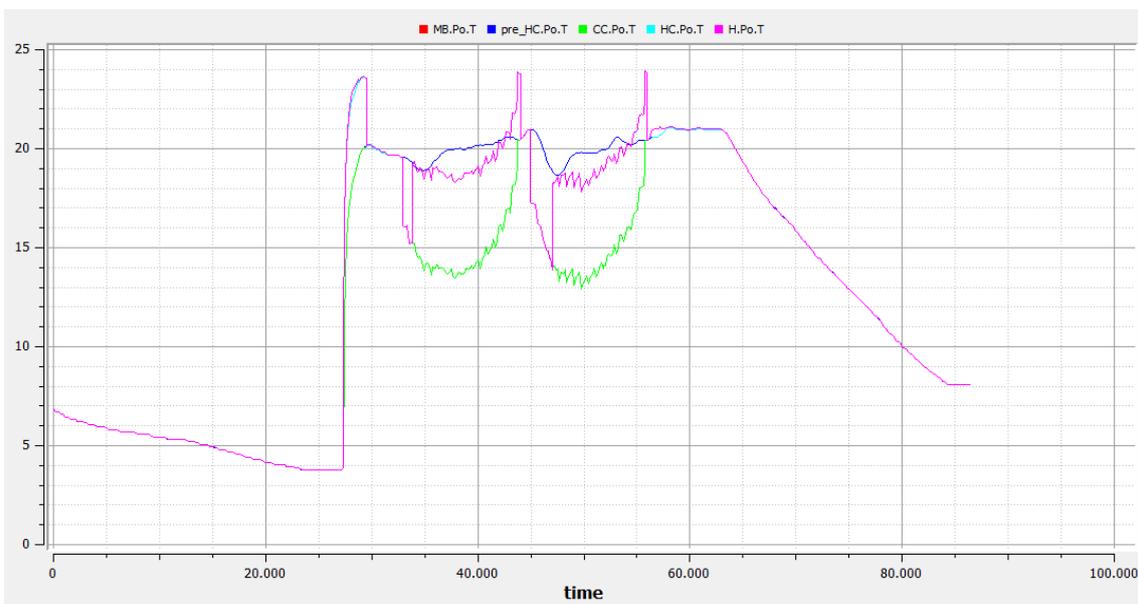


Figura 44: Temperatura por componentes. Experimento 4

La figura 44 muestra el proceso completo, con todas las señales en la misma gráfica. Como se aprecia, de no ser por el desfase entre las activaciones de la bobina enfriadora y del calentador, la temperatura de la señal de salida sería muy parecida a la de la señal de entrada.

En cuanto a la gráfica 45 de humedad específica, el único módulo que surte efecto en la señal de entrada es el último de la secuencia, el humidificador (H.Po.W, señal roja), ya que la bajada de temperatura en la bobina de enfriamiento no es suficiente para alcanzar el punto de rocío y provocar así condensación en el aire. Para que esto ocurriese, la temperatura tendría que bajar de los 5°C aproximadamente (en el experimento no baja de 13°C), ya que el aire en los momentos de activación de la bobina de enfriamiento tiene muy poco contenido de agua (menos de 6 gramos por kilo de aire), y por tanto una baja humedad relativa (en torno al 60% o menos).

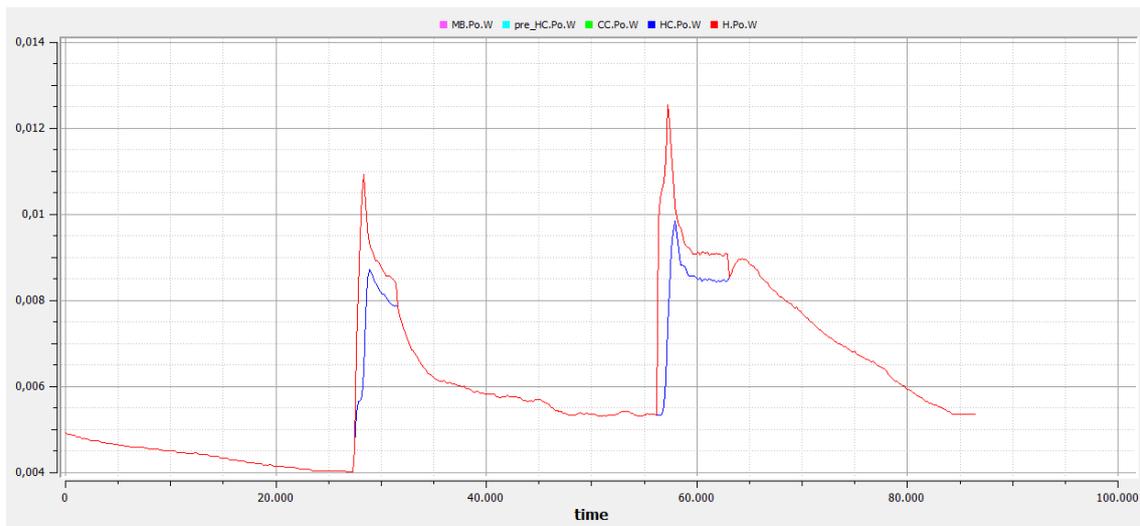


Figura 45: Humedad específica por componentes. Experimento 4

Capítulo 4:

DBC con PCs del sistema AHU-09

4.- DBC con PCs del sistema AHU-09

El Diagnóstico Basado en Consistencia (DBC) es un conjunto de técnicas encaminadas a detectar, localizar e identificar fallos en sistemas complejos, que se basa en el uso de modelos correctos de funcionamiento nominal o de fallo y en descartar un modo de funcionamiento porque sus estimaciones no son consistentes con las observaciones. Al ser parte del paradigma de Diagnóstico Basado en Modelos, su aproximación consiste en encontrar discrepancias entre las abstracciones ideales de los dispositivos y la realidad.

En diagnóstico online, esto implica disponer de estas idealizaciones de los dispositivos antes de comenzar los experimentos reales para comparar las medidas que se van obteniendo del aparato real con las estimaciones del modelo, ya que las restricciones de tiempo son esenciales.

Pero simular todo el dispositivo con cada nuevo dato puede suponer demasiada carga computacional para los sistemas de control, por lo que aparece la necesidad de dividir el sistema en partes independientes que pueden ser calculadas de manera offline y son capaces de computar el valor de una variable observada, dadas las entradas.

Surge entonces el concepto de Posible Conflicto, que es un conjunto de las ecuaciones del sistema con redundancia analítica mínima. Se define así la DBC usando PCs como una técnica de compilación estructural que facilita la DBC en sistemas dinámicos de manera online [Pulido & Alonso-González, 2004].

4.1.- Obtención de Posibles Conflictos

El modelo del AHU-09 completamente desplegado cuenta con unas 180 ecuaciones. Para encontrar los Posibles Conflictos debemos realizar una representación abstracta del mismo como hipergrafo, cuyos nodos son las variables del sistema y cuyos arcos son las relaciones entre ellas, es decir, las ecuaciones [Hernández2013].

En ese punto, la ecuación (23), por ejemplo, no sería más que una relación entre sus variables. Así:

$$23: f(W_o, W_{i_a}, mflow_s, mflow_{i_a})$$

Mediante búsqueda en profundidad se despliega todo el hipergrafo hasta que se conocen todos los datos. Tenemos así una Cadena Evaluable Minimal (CEM), es decir, un subsistema de relaciones sobredeterminado.

Entonces debemos añadir la información causal a las relaciones del CEM. Esto consiste en decidir cuál de las variables de la ecuación se calcula en función del resto, esto es, cuál es la variable dependiente. Este proceso no suele hacerse manualmente, ya que existen algoritmos que lo realizan automáticamente. Entre ellos, destacan los de simulación [Pulido2001], los basados en observadores [Bregón2010] y la combinación de ambos.

Sin embargo, aunque se dispone de herramientas creadas en el propio GSI para obtener los CEMs y los MEMs automáticamente [Pulido & Alonso-González & Bregón, 2014], el carácter académico de las mismas y el elevado número de ecuaciones del sistema objeto de estudio hacen imposible su aplicación. Además, no se ha considerado hasta la fecha una

herramienta para modelos orientados al objeto como Modelica, y necesitaríamos desarrollar un traductor de este lenguaje para nuestro sistema, que por su complejidad supondría un TFM por lo menos. En este trabajo, los PCs se han obtenido manualmente, en el proceso que se describe en el siguiente apartado.

En ese punto debe elegirse una variable de partida (una incógnita), que puede estimarse a partir de datos de entrada, y a través del modelo. Siguiendo el paradigma de DBC, comparamos esta estimación con la obtenida del sensor.

Siguiendo con el ejemplo anterior, a la hora de calcular la humedad específica del humidificador nos damos cuenta de que en la ecuación (23) la única variable desconocida W_o necesita ser despejada. La asignación de causalidad dejaría la ecuación como:

$$W_o = \frac{mflow_s}{mflowi_a} + W_{i_a}$$

Asignando causalidad a todas las relaciones de cada CEM obtenemos los MEMs (Modelos Evaluables Minimales), que son computacionalmente implementables⁷.

Por ejemplo, las ecuaciones (21) y (22) del humidificador dan lugar al siguiente MEM:

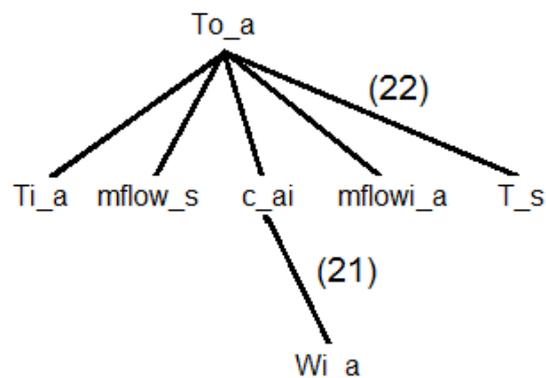


Figura 46: Subgrafo de diagnóstico de la temperatura en el módulo humidificador

En el grafo de la figura 46, la raíz (nodo superior) es la variable que queremos calcular. Está relacionada mediante arcos con todas las variables de las que depende, a través de la ecuación (22). Esos elementos del segundo nivel pueden ser de dos tipos: variables observadas (entradas o salidas relacionadas con un sensor) o variables que a su vez dependen de otros nodos a través de otra ecuación, como en el caso de c_{ai} . No se incluyen los parámetros conocidos, ya que no se usan para calcular la variable de partida.

El hecho de realizar la “comparación” con la medida del sensor supone, gráficamente, añadir otro arco que relaciona la raíz del grafo con la variable observada.

El sistema de ecuaciones resultante de transcribir el grafo generado es lo que utilizamos en Modelica para realizar los cálculos, recorriéndolo desde las hojas hasta el nodo raíz (que denominaremos discrepancia), y que será la base para calcular los residuos (diferencia entre variables "observadas" y estimadas por el PC).

⁷ En el resto del capítulo, se denotará en **negrita** la variable incógnita de cada ecuación.

4.2.- PCs en el AHU-09

Al inicio del TFM, con la información de que se disponía, parecía que el modelo del sistema AHU-09 contaba con sensores en zonas intermedias del aparato (ver figura 3), entre cada componente principal. Sin embargo, al indagar un poco más en la documentación, se hizo patente que no se disponía de estos medidores, por lo que el dispositivo entero era una caja negra de la que sólo se conocían las entradas y las salidas.

Por este motivo, el sistema solo cuenta con dos Posibles Conflictos de los 10 que se suponían. Cada uno de los PCs estima el valor de una de las variables de salida a partir de las entradas, es decir, hay uno para la temperatura a la salida del sistema y otro para la humedad específica de salida.

Esto implica que cada uno de ellos recoge ecuaciones de los cinco módulos principales, complicando en gran medida su obtención manual. Además, llegado un punto (el módulo refrigerador) la temperatura y la humedad específica se encuentran involucradas en la misma ecuación, por lo que a partir de entonces los PCs tienen la misma estructura.

Visualmente, los Posibles Conflictos no se distinguen en OpenModelica (Ver figuras 47 y 48), ya que la diferencia está solamente en las ecuaciones e interpretaciones internas de los componentes.

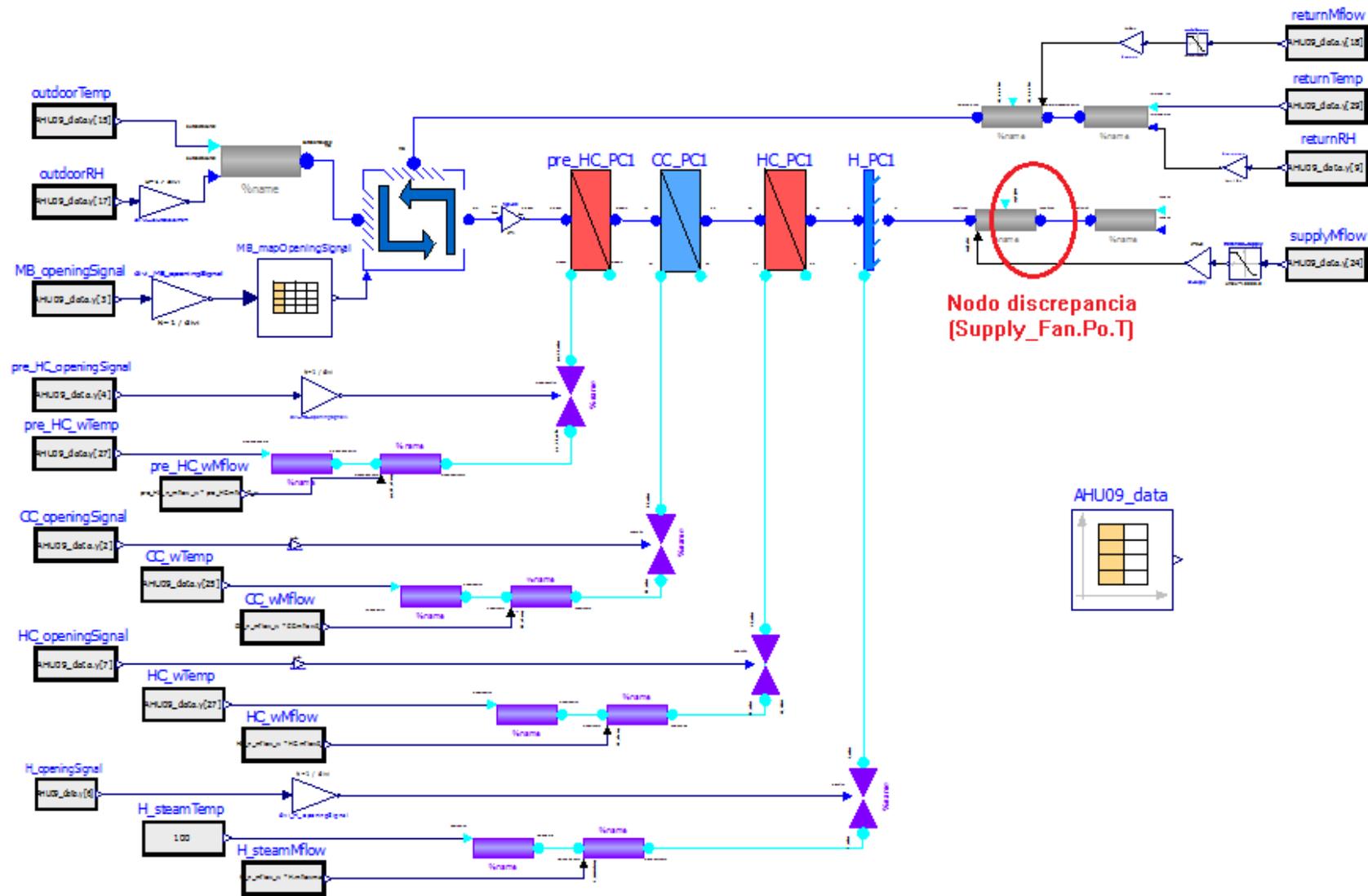


Figura 47: Modelo gráfico del PC1 en OpenModelica

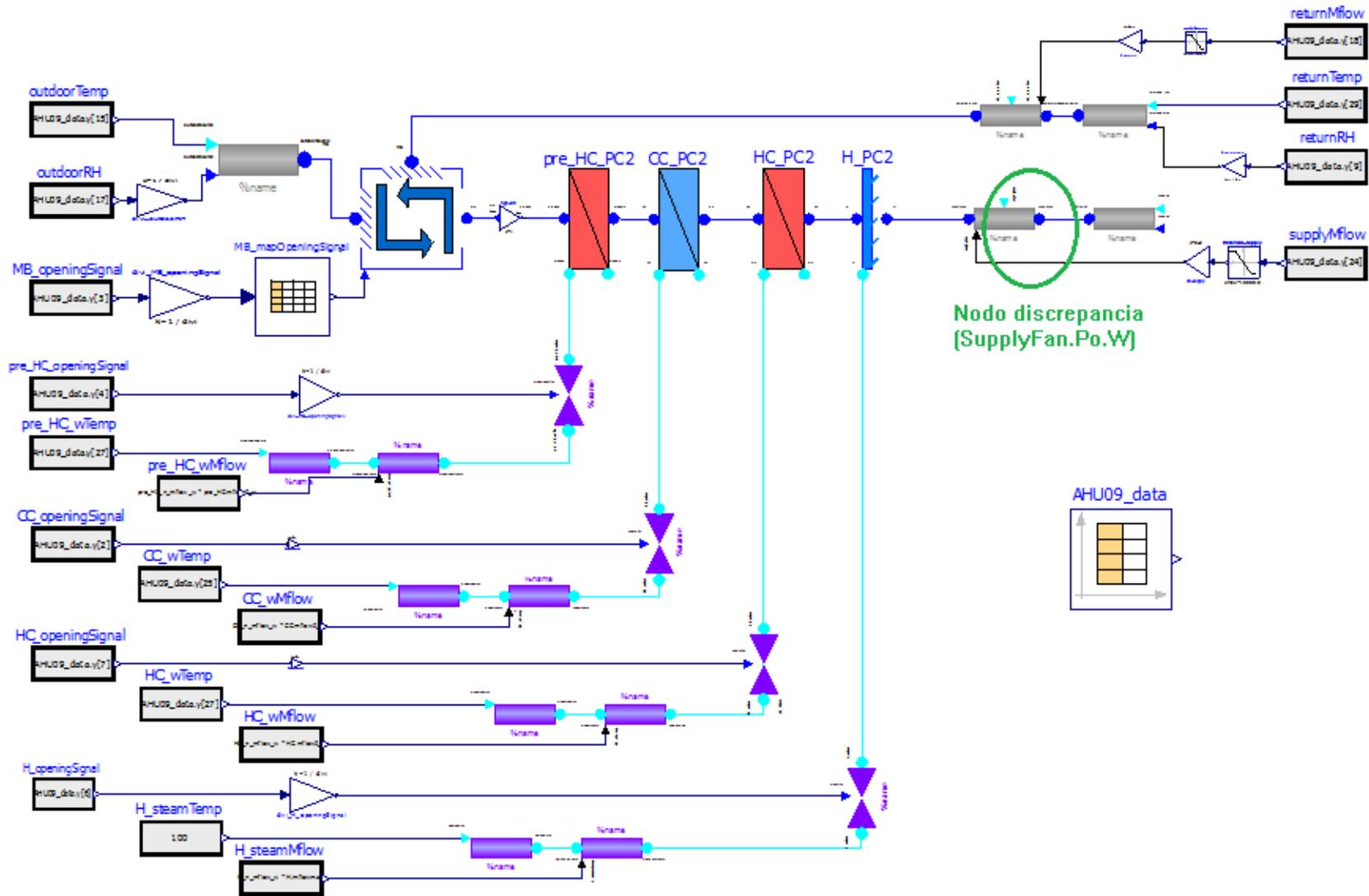


Figura 48: Modelo gráfico del PC2 en OpenModelica

4.2.1.- PC1 – Temperatura de salida

Primero tomamos como variable raíz la temperatura de salida del sistema, es decir H.Po.T. Según las ecuaciones del humidificador, se tiene (22):

$$H.Po.T = \frac{mflow_s * c_s * T_s + H.Pi.mflow * c_ai * H.Pi.T}{mflow_s * c_s + H.Pi.mflow * c_ai};$$

Que depende de 6 elementos:

- H.mflow_s: Flujo de vapor. para simplificar, suponemos que sólo es función de la señal apertura de la válvula:

$$mflow_s = f1(H_valve.newPerc); \quad (25)$$

- c_s: Calor específico del vapor. Es una constante conocida e igual a 1006 J
- T_s: Temperatura del vapor. Es una constante conocida e igual a 100°C
- H.Pi.mflow: Flujo de masa de aire de entrada al humidificador. Este punto fue bastante controvertido y supuso rehacer toda la búsqueda de los PCs. El problema es que el flujo de aire circulante se fija a la salida del AHU-09 mediante un extractor de aire, en lugar de a la entrada como el resto de variables (humedad, temperatura, etc.). Esto implica que la inferencia en variables de tipo “mflow” se realiza al contrario que las demás, es decir, hacia la derecha. Así, como nos dice la ecuación (20), es igual al flujo de salida del humidificador, menos la corriente de vapor.

$$H.Pi.mflow + mflow_s = H.Po.mflow;$$

- c_ai: Calor específico del aire húmedo. Depende de la humedad a la entrada del módulo humidificador (21), que a su vez es igual que la humedad de salida de la bobina calefactora.

$$c_ai = (c_a + c_s * H.Pi.W) / (1 + H.Pi.W);$$

$$H.Pi.W = HC.Po.W; \quad (26)$$

- H.Pi.T: Temperatura del aire a la entrada del componente. Como admitimos la suposición de conducciones ideales y sin pérdidas, es igual a la temperatura de salida del aire del HC.

$$H.Pi.T = HC.Po.T; \quad (27)$$

Hemos conseguido “bajar” por el hipergrafo del sistema hasta el siguiente componente, el calentador. Sin embargo, como se puede observar, durante la búsqueda hemos necesitado implicar a la humedad específica. Esto supone que, en adelante, la estructura del PC1 incluirá las ecuaciones del PC2.

Siguiendo con la búsqueda, necesitamos encontrar solución para 2 variables. La humedad y la temperatura del puerto de salida (HC.Po.W y HC.Po.T). Por suerte, como nos dice la ecuación (10) los calentadores no modifican en modo alguno la humedad, por lo que ésta es función de la humedad a la entrada del componente, que a su vez es igual a la de salida del módulo enfriador.

$$\begin{aligned} \text{HC.Po.W} &= \text{HC.Pi.W}; \\ \text{HC.Pi.W} &= \text{CC.Po.W}; \end{aligned} \tag{28}$$

La temperatura del aire a la salida del calentador (HC.Po.T) es, según la ecuación (4), función de las propiedades del aire a la entrada del componente y de la cantidad de calor que éste haya ganado al recorrer la bobina.

$$\text{HC.Qflow} = \text{HC.Cflow}_a * (\text{HC.Po.T} - \text{HC.Pi.T});$$

Que depende de 3 variables:

- **HC.Qflow:** Transferencia total de calor en el componente. Es la cantidad de energía térmica que el aire gana al discurrir junto al agua caliente. Depende de la diferencia de temperatura entre el aire y el agua, de las capacidades de ambos para intercambiar calor y de la efectividad de la transferencia (6).

$$\text{HC.Qflow} = \text{HC.eff} * \min(\text{HC.Cflow}_a, \text{HC.Cflow}_w) * (\text{HC}_w\text{Temp} - \text{HC.Pi.T});$$

Donde:

- **HC.eff:** La efectividad de la transferencia de calor del calentador es una función de muchos parámetros, entre ellos la configuración del intercambiador de calor. Para simplificar, supondremos la fórmula:

$$\text{HC.eff} = f_2(\text{HC.Cflow}_a, \text{HC.Cflow}_w, \text{HC.Pi.T}, \text{HC}_w\text{Temp}); \tag{29}$$

- **HC.Cflow_a:** Capacidad calorífica del aire del calentador. Es la energía necesaria para aumentar la temperatura de éste en una unidad de temperatura. Depende del flujo de masa a la entrada del componente y de su calor específico (7).

$$\text{HC.Cflow}_a = \text{HC.Pi.mflow} * c_a;$$

Que a su vez depende de:

- **HC.Pi.mflow:** Como recordamos, la inferencia para variables de flujo de masa se realiza “hacia la derecha”, por el sentido del aire en la gráfica 47. Es la ecuación (9).

$$\text{HC.Pi.mflow} = \text{HC.Po.mflow};$$

Que según la suposición de conexiones ideales es igual al flujo de aire a la entrada del humidificador.

$$\text{HC.Po.mflow} = \text{H.Pi.mflow}; \tag{30}$$

- **HC.Clow_w:** Capacidad calorífica del agua caliente. Es la cantidad de calor que hace falta para modificar su temperatura en 1°C. Depende de la cantidad de agua, que, simplificando, es función de la señal de apertura de la válvula asociada al calentador, y de su calor específico (8):

$$\begin{aligned} \text{HC.Cflow}_w &= \text{HC.mflow}_w * c_w; \\ \text{HC.mflow}_w &= f3(\text{HC_valve.newPerc}); \end{aligned} \quad (31)$$

- HC_wTemp: Temperatura del agua calefactora a la entrada del componente. Se trata de una entrada del usuario.
 - HC.Pi.T: La temperatura a la entrada del calentador. Se explica más adelante.
- HC.Cflow_a: Capacidad calorífica del aire del calentador. Ya explicado (ec. 7)
 - HC.Pi.T: La temperatura a la entrada del calentador, que es igual que la temperatura a la salida del enfriador.

$$\text{HC.Pi.T} = \text{CC.Po.T} \quad (32)$$

Si echamos un vistazo a la gráfica 47, nos encontramos ahora mismo entre los módulos enfriador (CC) y calentador (HC). Recorremos las ecuaciones del sistema “hacia la izquierda”, excepto para las variables de flujo de masa. Tenemos 2 variables desconocidas: La temperatura del aire (CC.Po.T) y su humedad específica (CC.Po.W).

Sin embargo, como se explica en el apartado 3, el módulo refrigerador calcula dos modos simultáneamente y elige aquél cuyo valor de transferencia de calor es mayor. A efectos de ecuaciones, esto se resuelve añadiendo las ecuaciones de ambos modos de funcionamiento, ya que causalmente hay dependencia de ambos. Por tanto, a continuación se detallan las ecuaciones, primero suponiendo que el módulo se encuentra en fase seca, y después pensando que está en régimen húmedo.

En régimen seco, la temperatura de salida (CC.Po.T) se obtiene de (11):

$$\text{CC.Qflow}_{\text{dry}} = \text{CC.Cflow}_a * (\text{CC.Pi.T} - \text{CC.Po.T});$$

Que depende de 3 variables:

- CC.Qflow_dry: Transferencia total de calor en el componente si estuviese en régimen seco. Se calcula con el método de NTU-eff (13), como en el caso del calentador:

$$\text{CC.Qflow}_{\text{dry}} = \text{CC.eff}_{\text{dry}} * \min(\text{CC.Cflow}_a, \text{CC.Cflow}_w) * (\text{CC.Pi.T} - \text{CC_wTemp});$$

Que a su vez depende de:

- CC.eff_dry: La efectividad de la transferencia de calor depende de los mismos parámetros que la del calentador, ya que la configuración de ambos es la misma (flujo cruzado), pero adaptados al enfriador.

$$\text{CC.eff}_{\text{dry}} = f4(\text{CC.Cflow}_a, \text{CC.Cflow}_w, \text{CC.Pi.T}, \text{CC_wTemp}); \quad (33)$$

- CC.Cflow_a: Capacidad calorífica del aire. Es la energía necesaria para aumentar la temperatura de éste en una unidad de temperatura. Depende del flujo de masa a la entrada del componente y de su calor específico.

$$\text{CC.Cflow_a} = \text{CC.Pi.mflow} * c_a; \quad (34)$$

Donde:

- **CC.Pi.mflow:** Como recordamos, la inferencia para variables de flujo de masa se realiza “hacia la derecha”, por el sentido del aire en la gráfica 47 (Ecuación 19).

$$\text{CC.Pi.mflow} = \text{CC.Po.mflow};$$

Que según la suposición de conexiones ideales es igual al flujo de aire a la entrada del calentador.

$$\text{CC.Po.mflow} = \text{HC.Pi.mflow}; \quad (35)$$

- **CC.Cflow_w:** Capacidad calorífica del agua fría. Depende de la cantidad de agua, que a su vez es, simplificando, función de la señal de apertura de la válvula asociada al enfriador, y de su calor específico.

$$\text{CC.Cflow_w} = \text{CC.mflow_w} * c_w; \quad (36)$$

$$\text{CC.mflow_w} = f5(\text{CC_valve.newPerc}); \quad (37)$$

- **CC.Pi.T:** La temperatura a la entrada del enfriador, que es igual que la temperatura a la salida del precalentador.

$$\text{CC.Pi.T} = \text{pre_HC.Po.T}; \quad (38)$$

- **CC_wTemp:** Temperatura del agua fría a la entrada del componente. Se trata de una entrada del usuario.

- **CC.Cflow_a:** Capacidad calorífica del aire del enfriador. Ya explicado (ec. 34).
- **CC.Pi.T:** Temperatura a la entrada del enfriador. Ya se ha detallado (ec. 38).

La humedad, por su parte, no cambia en régimen seco, por lo que es la misma que a la salida del precalentador.

$$\text{CC.Po.W} = \text{CC.Pi.W}; \quad (39)$$

$$\text{CC.Pi.W} = \text{pre_HC.Po.W}; \quad (40)$$

En régimen húmedo el enfriador se diferencia más de los calentadores. Para calcular la temperatura de salida en bulbo seco (**CC.Po.Twet**) es necesario conocer su relación con la eficiencia del intercambiador en el contacto y la diferencia de temperaturas.

$$\text{CC.Po.Twet} = \text{CC.effc_wet} * (\text{CC.Tc_wet} - \text{CC.Pi.T}) + \text{CC.Pi.T}; \quad (41)$$

Que depende de:

- **CC.effc_wet:** Efectividad de la transferencia de calor en la zona de contacto entre el tubo de agua y el aire. Depende de la capacidad calorífica del aire.

$$\text{CC.effc_wet} = f6(\text{CC.Cflow_a}); \quad (42)$$

- **CC.Tc_wet**: Temperatura del contacto en régimen húmedo. Depende de la efectividad de la transferencia en esa zona (ecuación 17).

$$CC.Qflow_wet = CC.effc_wet * CC.Cflow_a_wet * (CC.Pi.Twb - CC.Tc_wet);$$

Que a su vez depende de:

- **CC.Qflow_wet**: Transferencia total de calor en el componente si estuviese en régimen húmedo. La ecuación (16) calcula, con el método de NTU-eff, la transferencia de calor en el módulo refrigerador.

$$CC.Qflow_wet = CC.eff_wet * \min(CC.Cflow_a_wet, CC.Cflow_w) * (CC.Pi.T - CC_wTemp);$$

Esta ecuación depende de las siguientes variables:

- **CC.eff_wet**: La efectividad de la transferencia de calor en régimen húmedo. Lejos de la zona de contacto, la ecuación es idéntica a la del régimen seco.

$$CC.eff_wet = f7(CC.Cflow_a_wet, CC.Cflow_w, CC.Pi.T, CC_wTemp); \quad (43)$$

- **CC.Cflow_a_wet**: Capacidad calorífica del aire en régimen húmedo. Depende del flujo de masa y del calor específico del aire húmedo (ecuación 18), que es función de las entalpías y las temperaturas de entrada y salida en bulbo húmedo húmedo del aire.

$$CC.Cflow_a_wet = CC.Pi.mflow * cf_a;$$

$$Cf_a = f8(CC.hi_a, CC.ho_a, CC.Pi.T, CC.Po.Twet) \quad (44)$$

Surgen así 4 nuevas dependencias:

- **CC.hi_a**: Entalpía de entrada del aire del enfriador. La entalpía es la cantidad de energía calorífica que tiene el aire en relación con el entorno. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$CC.hi_a = 1006 * CC.Pi.T + CC.Pi.W * (2501000.0 + 1860 * CC.Pi.T); \quad (45)$$

Encontramos finalmente la dependencia de la humedad específica de entrada (**CC.Pi.W**), que según la ecuación (40) es igual a la humedad de salida del precalentador.

- **CC.ho_a**: Entalpía de salida del aire del enfriador. Según la ec. (14):

$$CC.Qflow_wet = CC.Pi.mflow * (CC.hi_a - CC.ho_a);$$

Que depende de variables conocidas.

- CC.Pi.T: Temperatura de entrada del enfriador. Según la ecuación (38), es igual a la temperatura de salida del precalentador.
 - CC.Po.Twet: Temperatura del contacto en régimen húmedo. Visto en la ecuación (41).
- CC.effc_wet: Efectividad de la transferencia de calor en la zona de contacto entre el tubo de agua y el aire. Calculada en la ec. (42).
 - CC.Cflow_a_wet: Capacidad calorífica del aire en régimen húmedo. Ya se ha visto. Visto en la ecuación (18).
 - CC.Pi.Twb: Temperatura a la entrada del componente en bulbo húmedo. Depende de la humedad a la entrada, de la temperatura en bulbo seco y de la presión.

$$CC.Pi.Twb = f9(CC.Pi.W, CC.Pi.T, p_{atm}); \quad (46)$$

- CC.Pi.mflow: Flujo de masa de aire a la entrada del componente. Como se explicó antes, es igual al flujo de aire del calentador.
- CC.hi_a: Entalpía de entrada del aire del enfriador. Ya se ha explicado (ecuación 44).

- CC.Pi.T: Temperatura de entrada del componente: Ya se ha explicado (ec. 38).

En cuanto a la humedad específica (CC.Po.W), es función de la temperatura de salida en régimen húmedo y de la presión.

$$CC.Po.W = f10(CC.Po.Twet, p_{atm}); \quad (47)$$

- p_atm: Presión atmosférica sobre el Sistema. Es constante e igual a 101325 Pa.
- CC.Po.Twet: Temperatura de salida en régimen húmedo. Ya explicado.

Ahora, todo queda en función de dos incógnitas: la temperatura y la humedad a la salida del modulo precalentador. Como se trata de las mismas ecuaciones que en el calentador, sólo se van a enumerar las ecuaciones que no se han usado antes.

Para la humedad específica (pre_HC.Po.W):

$$pre_HC.Po.W = pre_HC.Pi.W \quad (48)$$

$$pre_HC.Pi.W = MB.Po.W; \quad (49)$$

Para la temperatura (pre_HC.Po.T):

$$pre_HC.Qflow = pre_HC.Cflow_a * (pre_HC.Po.T - pre_HC.Pi.T); \quad (50)$$

$$pre_HC.Qflow = pre_HC.eff * \min(pre_HC.Cflow_a, pre_HC.Cflow_w) * (pre_HC_wTemp - pre_HC.Pi.T); \quad (51)$$

$$pre_HC.eff = f11(pre_HC.Cflow_a, pre_HC.Cflow_w, pre_HC.Pi.T, HC_wTemp); \quad (52)$$

$$pre_HC.Cflow_a = pre_HC.Pi.mflow * c_a; \quad (53)$$

$$pre_HC.Pi.mflow = pre_HC.Po.mflow; \quad (54)$$

$$pre_HC.Po.mflow = CC.Pi.mflow; \quad (55)$$

$$\text{pre_HC.Cflow_w} = \text{pre_HC.mflow_w} * \text{c_w}; \quad (56)$$

$$\text{pre_HC.mflow_w} = \text{f12}(\text{pre_HC_valve.newPerc}); \quad (57)$$

$$\text{pre_HC.Pi.T} = \text{MB.Po.T}; \quad (58)$$

Las incógnitas pasan a ser la temperatura y la humedad a la salida del módulo mezclador (MB.Po.T y MB.Po.W, respectivamente). Para despejarlas contamos con las siguientes ecuaciones (4) y (5):

$$\text{MB.Pi.mflow} * \text{MB.Pi.T} + \text{MB.Pr.mflow} * \text{MB.Pr.T} = \text{MB.Po.mflow} * \text{MB.Po.T};$$

$$\text{MB.Pi.mflow} * \text{MB.Pi.W} + \text{MB.Pr.mflow} * \text{MB.Pr.W} = \text{MB.Po.mflow} * \text{MB.Po.W};$$

Cuyas variables desconocidas son:

- MB.Pi.mflow: Es el flujo de masa de aire en la entrada de aire exterior. La ecuación (1) lo relaciona con la corriente de aire reciclado y la de aire de salida del módulo, que a su vez es igual que el de entrada de la bobina precalentadora.

$$\text{MB.Pi.mflow} + \text{MB.Pr.mflow} = \text{MB.Po.mflow};$$

$$\text{MB.Po.mflow} = \text{pre_HC.Pi.mflow}; \quad (59)$$

- MB.Pr.mflow: Es el flujo de masa de aire en el puertos de aire reciclado. La ecuación (3) lo relaciona con la posición de la compuerta y con el flujo de aire de retorno.

$$\text{MB.Pr.mflow} = \text{mflow_rt} * \text{max}(1 - \text{MB.damp_position}, \text{zero});$$

Tanto la posición de la compuerta (MB.damp_position) como el flujo de aire de retorno (MB.Pr.mflow) son entradas del sistema. En cuanto al flujo de masa de aire exterior (mflow_od), se trata de una variable cuyo valor no interesa para los PCs, pero que se puede computar con la ecuación (2).

$$\text{MB.Pi.mflow} = \text{mflow_od} * \text{max}(\text{MB.damp_position}, \text{zero});$$

- MB.Pi.T: Temperatura del aire exterior. Es una entrada del sistema.
- MB.Pi.W: Humedad específica del aire exterior. Es una entrada del sistema.
- MB.Pr.T: Temperatura del aire reciclado. Es una entrada del sistema.
- MB.Pr.W: Humedad específica del aire reciclado. Es una entrada del sistema.

En total tenemos 56 ecuaciones en el PC1, a las que hay que añadir:

- 40 correspondientes a la generación de las aguas de refrigeración y calefacción y el vapor de humidificación.
- 20 para la creación de los flujos de aire de entrada
- 10 más para el flujo de aire de salida.
- 20 para la resolución del cálculo de las distintas efectividades del modelo.

Es decir, 146 de las 180 ecuaciones del modelo.

4.2.2.- PC2 – Humedad de salida

Al igual que en el PC anterior, se parte de una variable raíz, en este caso la humedad específica de salida del sistema, es decir H.Po.W. Según las ecuaciones del humidificador, se tiene (23):

$$mflow_s = H.Pi.mflow * (H.Po.W - H.Pi.W);$$

Que depende de 3 elementos:

- **mflow_s**: Flujo de vapor. para simplificar, suponemos que sólo es función de la señal apertura de la válvula (25):

$$mflow_s = f1(H_valve.newPerc);$$

- **H.Pi.mflow**: Flujo de masa de aire de entrada al humidificador. Como ya se ha comentado en el PC1, según la ecuación (20) es igual al flujo de salida del humidificador (que es una entrada del usuario), menos la corriente de vapor.

$$H.Pi.mflow + mflow_s = H.Po.mflow;$$

- **H.Pi.W**: Humedad específica del aire a la entrada del componente. Como admitimos la suposición de conducciones ideales y sin pérdidas, es igual a la temperatura de salida del aire del HC (26).

$$H.Pi.W = HC.Po.W;$$

Como vemos, la temperatura del aire no se ha implicado en ninguna ecuación aún. Hemos conseguido “bajar” por el hipergrafo del sistema hasta el siguiente componente, el calentador. La única ecuación, según (10) es:

$$HC.Po.W = HC.Pi.W;$$

Que a su vez es igual a la humedad de salida del enfriador (28):

$$HC.Pi.W = CC.Po.W;$$

En el enfriador, la humedad depende del régimen de trabajo del componente. Según (39) y (40), en régimen seco:

$$CC.Po.W = CC.Pi.W;$$

$$CC.Pi.W = pre_HC.Po.W;$$

Sin embargo, en régimen húmedo (ecuación 49), la humedad a la salida depende de la temperatura en húmedo (ecuación 41) y de la presión:

$$CC.Po.W = f10(CC.Po.Twet);$$

$$CC.Po.Twet = CC.ffc_wet * (CC.Tc_wet - CC.Pi.T) + CC.Pi.T;$$

La temperatura en húmedo depende de:

- **CC. effc_wet**: Efectividad de la transferencia de calor en el contacto (ecuaciones 42 y 34):

$$\text{CC. effc_wet} = f6(\text{CC. Cflow_a});$$

$$\text{CC. Cflow_a} = \text{CC. Pi. mflow} * c_a;$$

- **CC. Tc_wet**: Temperatura del contacto en régimen húmedo (ecuaciones 17, 16, 43, 18, 19, 35, 44, 45, 40, 14, 38, 36, 37 y 46)

$$\text{CC. Qflow_wet} = \text{CC. effc_wet} * \text{CC. Cflow_a_wet} * (\text{CC. Pi. Twb} - \text{CC. Tc_wet});$$

$$\text{CC. Qflow_wet} = \text{CC. eff_wet} * \min(\text{CC. Cflow_a_wet}, \text{CC. Cflow_w}) * (\text{CC. Pi. T} - \text{CC. wTemp});$$

$$\text{CC. eff_wet} = f7(\text{CC. Cflow_a_wet}, \text{CC. Cflow_w}, \text{CC. Pi. T}, \text{CC. wTemp});$$

$$\text{CC. Cflow_a_wet} = \text{CC. Pi. mflow} * c_a;$$

$$\text{CC. Pi. mflow} = \text{CC. Po. mflow};$$

$$\text{CC. Po. mflow} = \text{HC. Pi. mflow};$$

$$\text{Cf_a} = f8(\text{CC. hi_a}, \text{CC. ho_a}, \text{CC. Pi. T}, \text{CC. Po. Twet});$$

$$\text{CC. hi_a} = 1006 * \text{CC. Pi. T} + \text{CC. Pi. W} * (2501000 + 1860 * \text{CC. Pi. T});$$

$$\text{CC. Pi. W} = \text{pre_HC. Po. W};$$

$$\text{CC. Qflow_wet} = \text{CC. Pi. mflow} * (\text{CC. hi_a} - \text{CC. ho_a});$$

$$\text{CC. Pi. T} = \text{pre_HC. Po. T};$$

$$\text{CC. Cflow_w} = \text{CC. mflow_w} * c_w;$$

$$\text{CC. mflow_w} = f5(\text{CC. valve. newPerc});$$

$$\text{CC. Pi. Twb} = f9(\text{CC. Pi. W}, \text{CC. Pi. T}, p_atm);$$

Pasado el refrigerador, la búsqueda de ecuaciones causales para el Posible Conflicto de la humedad ha implicado también a la temperatura a la entrada del componente. Buscamos, por tanto, resolver dos incógnitas: pre_HC.Po.T y pre_HC.Po.W.

La humedad específica depende, según las ecuaciones 48 y 49:

$$\text{pre_HC. Po. W} = \text{pre_HC. Pi. W};$$

$$\text{pre_HC. Pi. W} = \text{MB. Po. W};$$

Por otra parte, la temperatura de salida (pre_HC.Po.T) se obtiene de las ecuaciones (50) a la (58):

$$\text{pre_HC. Qflow} = \text{pre_HC. Cflow_a} * (\text{pre_HC. Po. T} - \text{pre_HC. Pi. T});$$

$$\text{pre_HC. Qflow} = \text{pre_HC. eff} * \min(\text{pre_HC. Cflow_a}, \text{pre_HC. Cflow_w}) * (\text{pre_HC. wTemp} - \text{pre_HC. Pi. T});$$

$$\text{pre_HC. eff} = f11(\text{pre_HC. Cflow_a}, \text{pre_HC. Cflow_w}, \text{pre_HC. Pi. T}, \text{HC. wTemp});$$

$$\text{pre_HC. Cflow_a} = \text{pre_HC. Pi. mflow} * c_a;$$

$$\begin{aligned} \text{pre_HC.Pi.mflow} &= \text{pre_HC.Po.mflow}; \\ \text{pre_HC.Po.mflow} &= \text{CC.Pi.mflow}; \\ \text{pre_HC.Cflow_w} &= \text{pre_HC.mflow_w} * \text{c_w}; \\ \text{pre_HC.mflow_w} &= \text{f12}(\text{pre_HC_valve.newPerc}); \\ \text{pre_HC.Pi.T} &= \text{MB.Po.T}; \end{aligned}$$

Llegados al módulo mezclador, hemos de añadir las mismas ecuaciones que en el PC1, que son, por orden, (4), (5), (2), (3), (1) y (59).

$$\begin{aligned} \text{MB.Pi.mflow} * \text{MB.Pi.T} + \text{MB.Pr.mflow} * \text{MB.Pr.T} &= \text{MB.Po.mflow} * \text{MB.Po.T}; \\ \text{MB.Pi.mflow} * \text{MB.Pi.W} + \text{MB.Pr.mflow} * \text{MB.Pr.W} &= \text{MB.Po.mflow} * \text{MB.Po.W}; \\ \text{MB.Pi.mflow} &= \text{mflow_od} * \max(\text{MB.damp_position}, \text{zero}); \\ \text{MB.Pr.mflow} &= \text{mflow_rt} * \max(1 - \text{MB.damp_position}, \text{zero}); \\ \text{MB.Pi.mflow} + \text{MB.Pr.mflow} &= \text{MB.Po.mflow}; \\ \text{MB.Po.mflow} &= \text{pre_HC.Pi.mflow}; \end{aligned}$$

En total, tenemos 43 ecuaciones para el segundo Posible Conflicto. A este número deben añadirse 60 de generación de los fluidos de entrada del modelo y 15 de la simplificación de las efectividades de transferencia de calor. Es decir, pasamos de 180 a 118 ecuaciones.

4.3.- Modos de fallo

Los fallos de los sistemas reales se implementan mediante cambios en los parámetros de los modelos. Dichas modificaciones se denominan “modos de fallo” en el ámbito de la diagnosis.

A continuación se detalla una lista de los diferentes modos de fallo que pueden existir en el modelo. Cada uno corresponde al funcionamiento defectuoso de un elemento del sistema, y se agrupan en tres grupos principales:

- Fallos en las señales de control: Es la manera más fácil de modelar una válvula que no se abre cuando se lo ordenamos, o una fuga en la misma que pasa desapercibida para el sistema de monitorización. De esta manera, contaremos con un fallo por cada uno de los componentes susceptibles de control, es decir, cinco:
 - MF01: Fallo en la señal de control del módulo mezclador.
 - MF02: Fallo en la señal de control de la bobina de precalentamiento.
 - MF03: Fallo en la señal de control de la bobina de enfriamiento. Cabe destacar que se trata del único fallo para el que existen datos reales, lo que motivó la elección del resto de modos de fallo.
 - MF04: Fallo en la señal de control de la bobina recalentadora.
 - MF05: Fallo en la señal de control del módulo humidificador.

Estas cinco señales son, para simplificar, del tipo todo o nada. Esto quiere decir que en presencia de fallo, la válvula correspondiente estará totalmente abierta cuando debería estar cerrada, o totalmente cerrada cuando no debería estarlo. Esto nos ahorra complejidad extra al no tener que tratar con la histéresis de las válvulas. De forma genérica, se han modelado como sigue:

```

if MF == ModoFallo and time >= TiempoFallo then
    señalControl = valorFallo;
else
    señalControl = valorEntrada;
end

```

donde `ModoFallo` debe sustituirse por un valor entero entre 1 y 5, dependiendo del modo de fallo concreto.

- Fallos en los sensores de salida: En ocasiones, es posible que todo funcione como debería, y aun así recibamos lecturas incorrectas de los valores de salida. Esto puede deberse a defectos de fábrica, de instalación, de comunicación con el sistema de control o simplemente el resultado del paso del tiempo. En cualquier caso, su presencia en un sensor determinado añade una desviación a la variable de salida que éste monitoriza. Así:

```

if MF == ModoFallo and time >= TiempoFallo then
    Output = ValorMedido * (1 + offset);
else
    Output = ValorMedido;
end

```

donde `ModoFallo` debe sustituirse por 6 o 7, dependiendo de si se trata de un fallo en el sensor de temperatura o en el de humedad.

El `offset` elegido puede ser una señal aleatoria o un valor constante e independiente de la señal considerada. En nuestro caso, elegimos un valor de 0.05 para emular un error del 5% de la señal estudiada, ya que es el máximo error que podría no ser detectado por el sistema como funcionamiento anormal.

Tenemos con dos de estos modos de fallo:

- MF06: Fallo en el sensor de la temperatura de salida.
- MF07: Fallo en el sensor de la humedad de salida.
- Cambios en el funcionamiento interno de los componentes: Existen infinidad de posibilidades para modelar fallos en el funcionamiento interno de los intercambiadores de calor y el resto de componentes, puesto que dependen de numerosos parámetros e implican gran cantidad de ecuaciones. Algunos de los ejemplos más representativos son los siguientes:
 - MF08: Pérdida de aire entre componentes. Se trata de una fuga que provoca que parte del flujo de masa de aire entregado por un módulo se pierda y no llegue al componente siguiente. Para este fallo debemos modelar la fuga como una nueva clase, conectada a la salida de un bloque y a la entrada del siguiente, y que modifique el flujo de masa multiplicándolo por un valor k entre 0 y 1 (cuanto menor sea la fuga, más grande será k), pero que al mismo tiempo conserve los valores de temperatura y humedad, ya que el aire que consigue pasar mantiene sus propiedades.

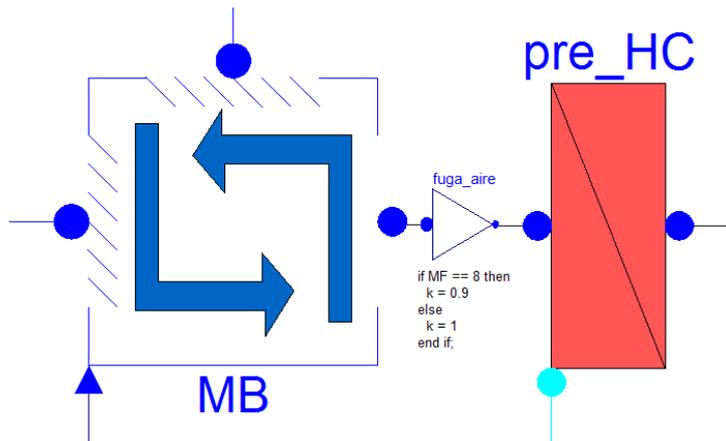


Figura 49: Representación del módulo de fuga de aire con $k = 0.9$

El hecho de modelarlo con este nuevo componente en lugar de modificar la entrada del módulo receptor “a mano” nos permite generalizar el fallo de cara a futuros desarrollos, permitiendo la entrada de aire u otro elemento externo (ej: lluvia) que modifique los valores de temperatura y humedad transmitidos.

Para implementarlo, debe modificarse el parámetro “k” del componente. Así:

```
if MF == 8 and time >= TiempoFallo then
  k = valorFallo * k
end
```

- MF09: Pérdida de efectividad de los calentadores. El uso prolongado de este tipo de sistemas puede provocar problemas de oxidación, atascos por sedimentación, y toda clase de cuestiones que afecten al rendimiento de los intercambiadores de calor. De la infinidad de parámetros que se pueden modificar para conseguir este efecto, se ha decidido utilizar aquél ligado a la configuración de las propias bobinas, la efectividad de la transferencia de calor. Debemos modificar las ecuaciones (29) y (52):

```
HC.eff := f(HC.Cflow_a, HC.Cflow_w, HC.Pi.T, HC_wTemp) *
factorFallo;
```

```
pre_HC.eff := f(pre_HC.Cflow_a, pre_HC.Cflow_w, pre_HC.Pi.T,
HC_wTemp) * factorFallo;
```

donde factorFallo se activa como cualquier otro modo de fallo:

```
if MF == 9 and time >= TiempoFallo then
  factorFallo = valorFallo; // [0 - 1]
else
  factorFallo = 1;
end
```

- MF10: Pérdida de efectividad en el módulo deshumidificador: Por las mismas razones que el caso anterior, se puede producir un fallo que afecte a la efectividad del enfriador. Las principales diferencias radican en que este componente puede afectar tanto a la temperatura como a la humedad (en lugar de sólo a la temperatura, como es el caso de los

calentadores), y que la efectividad está presente en más de una ecuación, ya que el módulo calcula a la vez los dos modos de funcionamiento: seco y húmedo.

De manera análoga al modo de fallo anterior, deberían modificarse las ecuaciones (33), (43) y (42). De manera genérica:

```
CC.eff_dry = f(CC.Cflow_a, CC.Cflow_w, CC.Pi.T, CC_wTemp) *
factorFallo;
CC.eff_wet = f(CC.Cflow_a_wet, CC.Cflow_w, CC.Pi.T, CC_wTemp) *
FactorFallo;
CC.effc_wet = f(CC.Cflow_a) * factorFallo;
```

donde factorFallo se activa como cualquier otro modo de fallo:

```
if MF == 10 and time >= TiempoFallo then
    factorFallo = valorFallo; // [0 - 1]
else
    factorFallo = 1;
end
```

Todos estos fallos se modelan de la misma manera: una variable “MF” de tipo entero, cuyo valor oscila entre 0 y 10 e indica qué modo se activará en el experimento, y donde el 0 representa el funcionamiento nominal. Esto se acompaña con una constante entera “TiempoFallo”, que señala el tiempo en segundos en el que se activa el fallo.

Los Modos de Fallo “artificiales”, es decir, aquellos que se crearon por analogía al MF03, no disponen de datos reales para analizar su comportamiento. Por este motivo se crea un nuevo modelo donde se introducen los parámetros y ecuaciones antes mencionados y en los que se simula la presencia de fallos con nuevas variables y sentencias condicionales. Las salidas de ese nuevo modelo serán consideradas entradas para el sistema de diagnóstico.

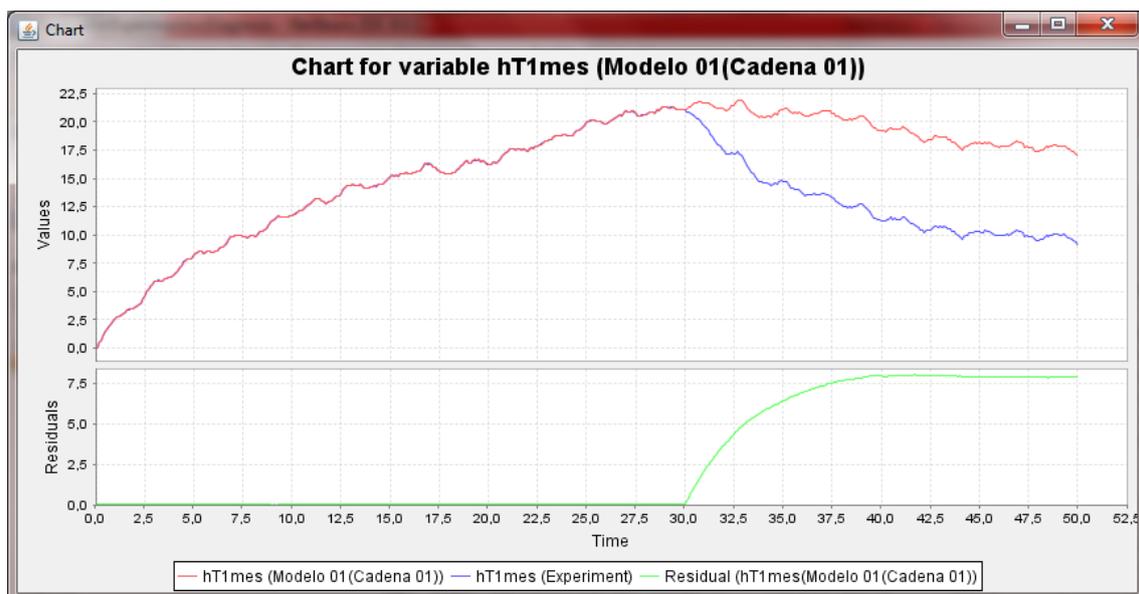


Figura 50: Cálculo de residuos para detección de fallos

En él, los residuos se calculan como el valor absoluto de la diferencia entre la misma señal en la simulación de los modelos y en el experimento real (ver figura 50). Teóricamente, si todo va bien y no se presentan fallos, esa señal debería ser 0. En la realidad se admite cierto

error como consecuencia de la tolerancia de los sensores, para evitar falsos positivos. En el momento en que la señal se desvía de 0 por más de un cierto umbral, se activa el PC asociado.

En DBC se comparan medidas (reales o estimadas por un modelo) frente a las estimaciones de los PCs. Si el residuo asociado a la comparación se considera activado, se calcula el conjunto de corte minimal entre los elementos de PC1 y PC2 que se asocian a las columnas MFXX de la Matriz Teórica de Firmas de Fallo con $MFXX(y) = 1$.

A continuación se detalla la Matriz Teórica de Firmas de Fallo [Bregón, 2007]. Se trata de una tabla binaria que detalla qué modos de fallo es capaz de detectar cada posible conflicto. Cada PC es capaz de revelar aquellos modos de fallo con un “1” en la fila correspondiente.

	MF01	MF02	MF03	MF04	MF05	MF06	MF07	MF08	MF09	MF10
PC1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
PC2	1	0	1?	0	1	0	1	1	0	1?

Tabla 2: Matriz teórica de firmas de fallo

Esta tabla permite comprender si un determinado fallo afecta o no a las señales de un posible conflicto. Por ejemplo, si se activa el PC1, pero no el PC2, podemos deducir que se ha producido un fallo, pero no sabremos el tipo (MF02, MF03, MF04, MF06, MF09 o MF10).

En el caso de las señales MF03 y MF10, que afectan al módulo enfriador, el mismo tipo de fallo puede provocar dos comportamientos anómalos diferentes. Si la temperatura del aire desciende por debajo de su punto de rocío, entonces el aire perderá humedad y el PC2 se verá afectado, y si no, solamente el PC1 se activará. La influencia de los modos de operación del sistema en la detección e identificación de fallos se discute en [Moya, 2010] y [Pulido & Alonso-González & Bregón, 2014].

En los siguientes capítulos pueden verse las pruebas de detección y localización con matriz de firmas cualitativa realizadas sobre los modelos, junto con los resultados de las mismas.

4.3.1.- Matriz de Firmas de Fallo Cualitativa.

La matriz cualitativa de fallos de un sistema de diagnóstico es una evolución de la binaria que acabamos de presentar. En esta ocasión las celdas no son binarias, sino ternarias, y muestran cualitativamente cómo afecta cada fallo concreto al residuo de cada posible conflicto.

La diferencia entre saber que un fallo afecta a un posible conflicto y saber cómo influye en él amplía enormemente las posibilidades de aislamiento de los fallos. Sin embargo, también aumenta el número de posibles fallos que se pueden dar. Por ejemplo, no es lo mismo que una válvula se atasque cuando está cerrada que cuando está completamente abierta. Tenemos:

- MF01: Fallo en la señal de control del módulo mezclador. Cuando se activa, la compuerta se cierra completamente y sólo el aire reciclado entra al sistema. Su efecto sobre la temperatura y la humedad depende en realidad de las propiedades de las dos corrientes de aire de entrada (exterior y aire reciclado).

- MF01b: Se trata del fallo opuesto. Cuando la válvula se bloquee en posición de “completamente abierta”, el aire circulante por el sistema es siempre la mezcla al 50% de ambas corrientes de entrada.
- MF02: Fallo en la señal de control de la bobina de precalentamiento. Distinguimos dos tipos de fallos. Si se produce un bloqueo de la válvula cuando está cerrada, permanecerá así aunque la señal de control marque que está abierta. Esto causará un descenso en la temperatura de salida del componente.
 - MF02b: Sin embargo, cuando el atasco se produce con la válvula abierta, no puede cerrarse aunque el control la muestre cerrada. Este modo de fallo modelaría también una fuga en la válvula. Como consecuencia del mismo la temperatura del aire aumentaría sin control.
- MF03: Fallo en la señal de control de la bobina de enfriamiento. Este caso es ligeramente más complicado, ya que puede afectar también a la humedad. Si la válvula se atasca cuando está cerrada, la temperatura aumentará con respecto a la nominal, y si sobrepasamos el punto de rocío, también lo hará la humedad.
 - MF03b: En el caso de un atasco con la válvula abierta, el funcionamiento sería el contrario. Notaríamos un descenso de la temperatura y, alcanzado el punto de rocío, también de la humedad.
- MF04: Fallo en la señal de control de la bobina recalentadora. Misma situación que con la bobina de precalentamiento. Este modo de fallo se divide en dos. El homónimo, que representa un bloqueo con la válvula cerrada, y el siguiente.
 - MF04b: Bloqueo con la válvula abierta (o fuga en la válvula). Provoca un aumento de la temperatura del aire con respecto a lo esperado.
- MF05: Fallo en la señal de control del módulo humidificador. Se distinguen dos fallos distintos que atañen a esta señal. En el primero, que mantenemos bajo la misma denominación, la válvula que provee de vapor al módulo se bloquea cuando está cerrada, por lo que no aumenta la temperatura y humedad del aire circulante como se espera.
 - MF05b: En el caso contrario, la válvula se atasca estando completamente abierta, lo que aumenta la temperatura y la humedad del aire más de lo que se quiere.
- MF06: Fallo en el sensor de la temperatura de salida. La forma de modelar el ruido que hemos escogido implica añadir un 5% a la señal considerada, por lo que el desvío del residuo siempre será positivo. No obstante, queda claro que con otro tipo de ruido podrían obtenerse residuos negativos, e incluso residuos con media 0 si la distorsión fuese aleatoria, lo que complicaría mucho su aislamiento. No se consideran este tipo de ruidos en este proyecto.
- MF07: Fallo en el sensor de la humedad de salida. Mismo caso que en el modo de fallo anterior. Tan sólo se consideran fallos de sensores en los que se añade un offset a la señal.
- MF08: Pérdida de aire entre componentes. Este fallo provoca que cierta cantidad de aire se escape del sistema, por lo que es necesario tomar más aire exterior (único flujo cuyo valor no es impuesto). Dependiendo de las propiedades psicrométricas de este aire, afectará de una manera u otra al flujo circulante.
- MF09: Pérdida de efectividad de los calentadores. Este fallo afecta negativamente a la efectividad del intercambio de calor, por lo que las bobinas no consiguen calentar tanto como se espera el aire que pasa a través de ellas.
- MF10: Pérdida de efectividad en el módulo deshumidificador. Al igual que en el caso anterior, el fallo en la efectividad afecta negativamente a la misma, de manera que cuando se produce, la bobina no es capaz de enfriar el aire tanto

como se espera. Esto puede provocar a su vez que el aire no pierda humedad al no haber alcanzado el punto de rocío, cuando en condiciones nominales sí lo habría hecho.

La siguiente tabla resume cómo los fallos considerados afectan a los posibles conflictos:

	PC1	PC2
MF01	+ -	+ -
MF01b	+ -	+ -
MF02	-	0
MF02b	+	0
MF03	+	0+
MF03b	-	0-
MF04	-	0
MF04b	+	0
MF05	-	-
MF05b	+	+
MF06	+	0
MF07	0	+
MF08	+ -	+ -
MF09	-	0
MF10	+	0+

Tabla 3: Matriz cualitativa de firmas de fallo

Explicación de los símbolos de la matriz cualitativa de firmas de fallo:

0: El residuo del posible conflicto ante este modo de fallo no se ve modificado.

0+: Si se activa el PC, el valor del residuo es positivo. Pero no siempre se activa (recordar el cambio de régimen de trabajo al alcanzar el punto de rocío).

0-: El valor del residuo es nulo si el enfriador trabaja en régimen seco o negativo si está en régimen húmedo.

+: El residuo del posible conflicto cuando se activa el modo de fallo correspondiente es positivo y mayor que el umbral prefijado.

-: El residuo en este caso es negativo y su valor absoluto es mayor que el umbral establecido.

+ -: Se sabe que el modo de fallo activa el posible conflicto, pero el valor del residuo depende de las señales del aire de entrada (el aire exterior puede ser más frío o más caliente que el reciclado, y lo mismo con la humedad).

A efectos de diagnóstico de fallos, los nuevos fallos (detonados con el sufijo “b”) se comportan exactamente igual que el resto, por lo que en realidad hay 15 Modos de Fallo.

Capítulo 5:

Validación del Sistema de Diagnóstico

5.- Validación Sistema de Diagnóstico

La presente sección trata de verificar que las suposiciones de la Matriz teórica de Firmas de Fallo son correctas, para lo que se seguirá el siguiente proceso:

Para cada Modo de Fallo, se muestran sus efectos sobre las variables del sistema. A continuación se detalla, con la ayuda de gráficas, su efecto sobre los Posibles Conflictos, indicando la diferencia entre la variable medida y la estimada y el residuo que se genera. Por último, con los datos recogidos se decide si se puede confirmar la información de la Matriz teórica de Firmas de Fallo.

- MF01: Fallo en la señal de control del módulo mezclador (compuerta abierta). Se ha elegido el experimento nominal del 1 de Junio de 2013 como base para la simulación del fallo, ya que el módulo mezclador es prácticamente el único que entra en funcionamiento, y de esta manera se podrán apreciar mejor sus efectos.

Supongamos que el fallo se produce en la compuerta que da entrada al aire exterior a los 20.000 segundos de comenzar el experimento, de manera que se mantiene presente hasta el final del mismo. Las consecuencias de este fallo dependerán del grado de similitud entre las propiedades psicrométricas del aire reciclado y el aire externo, pero podemos intuir que por poco que se diferencien, el bloqueo afectará a la temperatura del aire circulante, y quizá también a su humedad.

Podemos ver lo que ocurre en las siguientes gráficas:

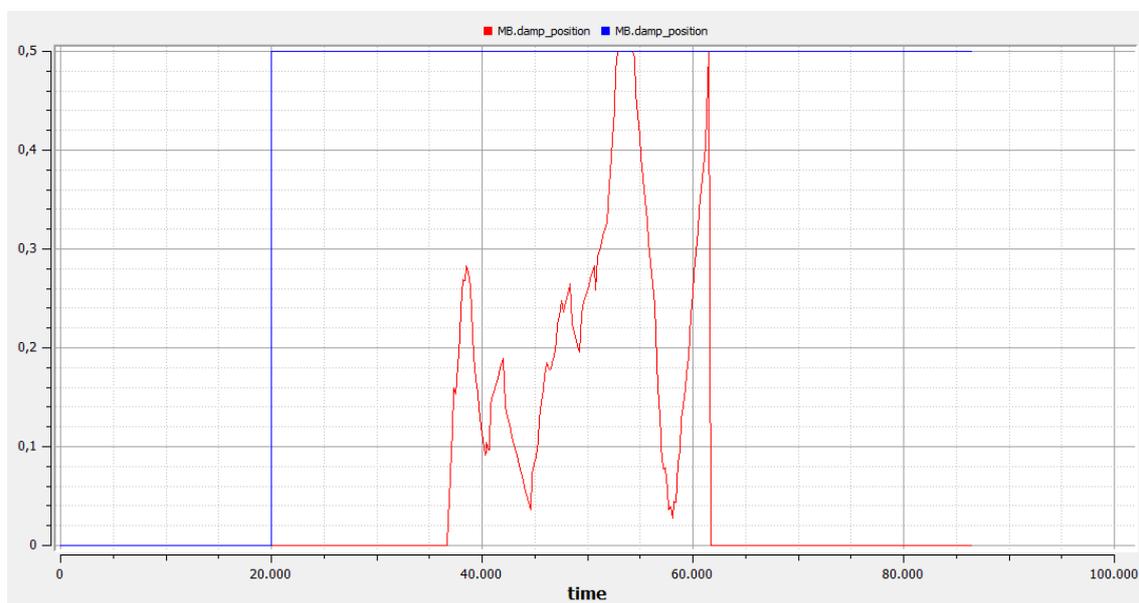


Figura 51: Experimento del 1 de Junio de 2013. Señal de control del módulo mezclador en modo nominal (rojo), y sujeta al Modo de Fallo 01 a partir de los 20.000 segundos (azul).

La señal de fallo (figura 51, en azul) se activa desde el segundo 20.000. En ese momento, la compuerta se abre sin que este cambio sea percibido desde el control y empieza a entrar aire exterior en el sistema y a mezclarse con el de retorno, en una proporción del 50% cada uno.

En el experimento nominal (figura 51, señal roja), la compuerta solo recibe señales entre el 40% y el 70% del total posible, ignorándose todas las que sean menores al umbral mínimo, e igualándose al 70% las que sean mayores a ese límite. Después, esa señal es filtrada con una función lineal cuyo resultado varía entre 0 y 0.5 (como mucho estará abierta al 50%) (Ver apartado 3.2.3).

El efecto en la temperatura del aire del sistema se aprecia en la siguiente gráfica.

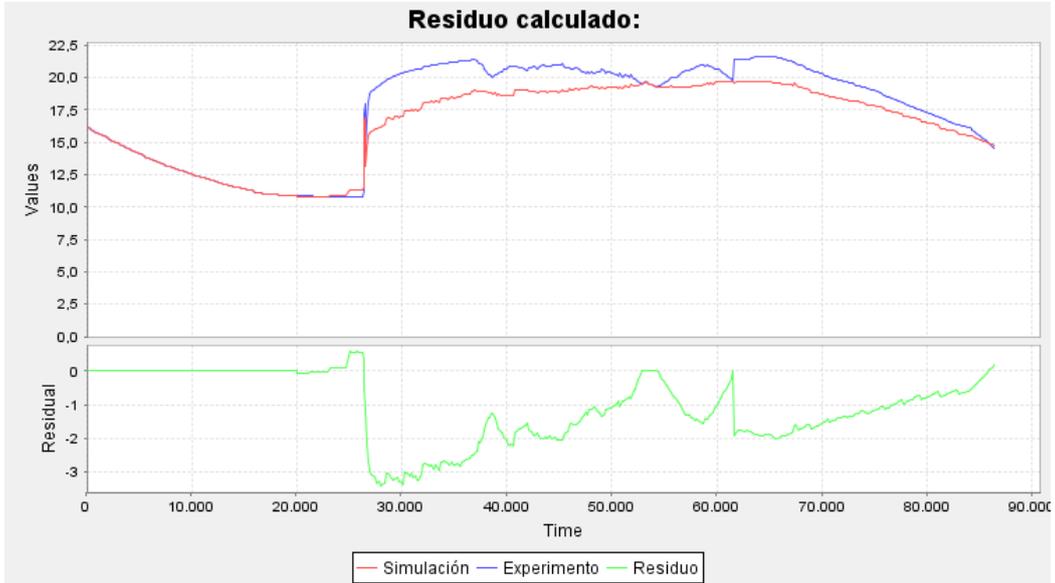


Figura 52: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF01 en $t = 20000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

Como vemos, las diferencias son bastante notables (La temperatura llega a caer más de $3^{\circ}C$). Sin embargo, como ya se predijo en el apartado 4.3.1, el signo del residuo depende directamente de la relación de temperaturas entre el aire exterior y el aire reciclado. Asimismo, el fallo no es realmente apreciable hasta los 25000 segundos aproximadamente, debido al grado de parecido de ambas señales. En cuanto a la humedad, nos encontramos con el siguiente escenario:

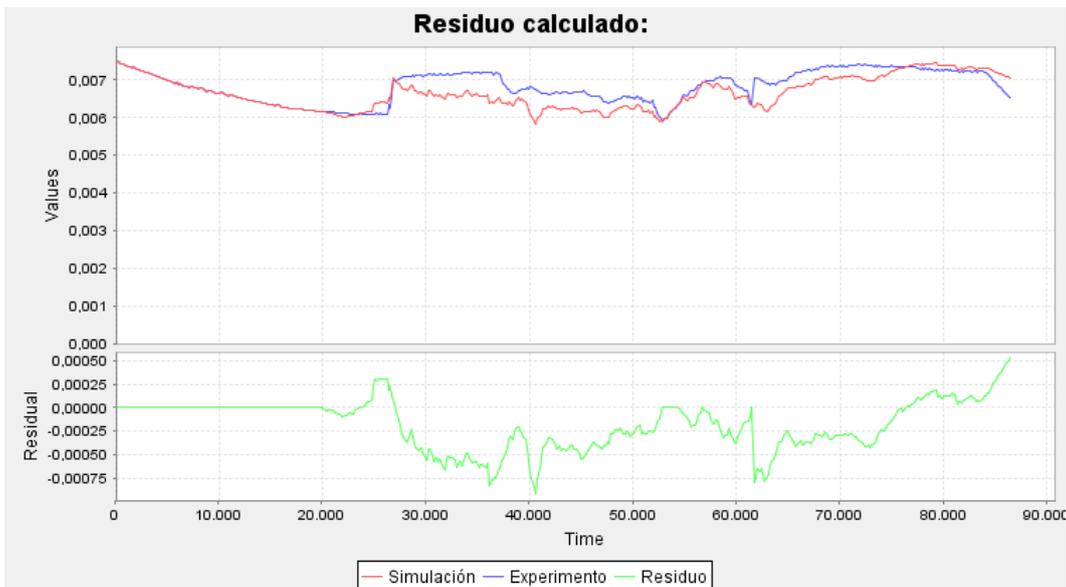


Figura 53: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF01 en $t = 20000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

En la gráfica anterior parece que la diferencia de humedad absoluta producida por el fallo MF01 no es muy grande en valor absoluto, pero tenemos que tener en cuenta la escala de la señal, que se mide en kilogramos de agua por kilogramo de aire en lugar de gramos por kilo. Para que se entienda, ese cambio, a la temperatura media del experimento y una presión de una atmósfera, podría suponer un cambio de un 7% de humedad relativa (del 48% al 41% en el instante $t = 52900$ s).

- MF01b: Fallo en la señal de control del módulo mezclador (compuerta cerrada). Se trata del caso opuesto al MF01. Cuando la compuerta se bloquea, queda cerrada hasta el final del experimento. Tomando como base el experimento 1 (Junio de 2013), se ha introducido el fallo en la señal de control del MB a los 50000 segundos, de manera que ésta cerrará la compuerta en mitad de su actividad. La figura 54 muestra el fallo introducido (señal azul) frente a la señal del experimento nominal (en rojo).

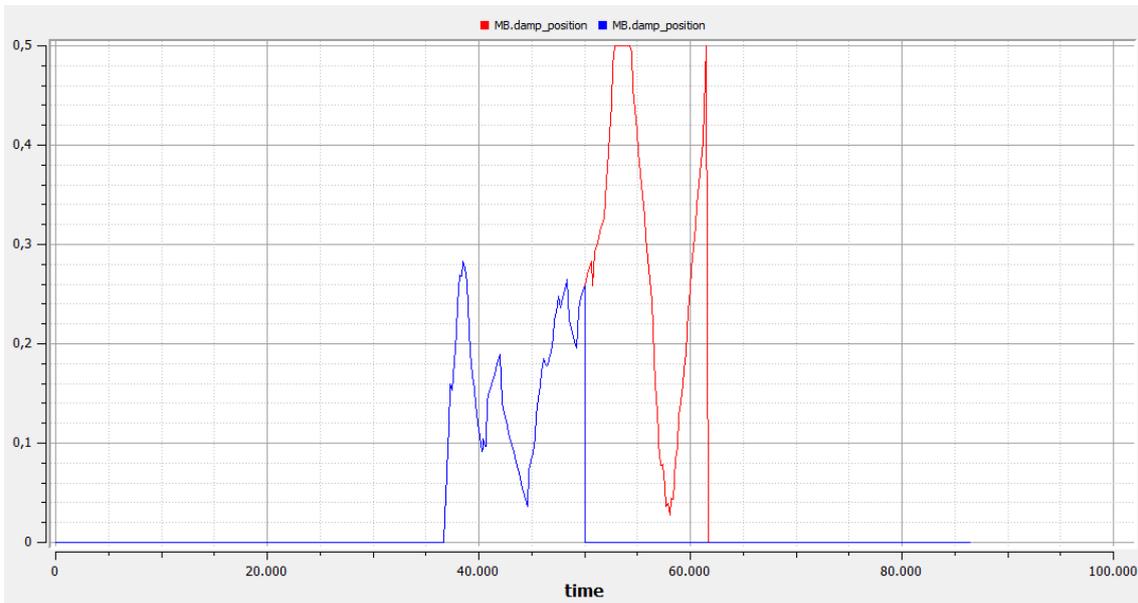


Figura 54: Experimento del 1 de Junio de 2013. Señal de control del módulo mezclador en modo nominal (rojo), y sujeta al Modo de Fallo 01 a partir de los 20.000 segundos (azul).

Como se ha comentado a lo largo de los capítulos anteriores, las consecuencias de este Modo de Fallo en la temperatura del aire circulante dependen del grado de similitud o diferencia entre las corrientes de aire exterior y de retorno. Puesto que el aire reciclado está más caliente que el de fuera (ver figura 14), el efecto debería ser una subida de la temperatura a partir del segundo 50000. La figura 55 muestra la temperatura de la simulación con fallo (en azul) frente a la nominal (en rojo). Se aprecia un aumento de hasta 2°C.

En lo referente a la humedad específica, la señal de aire exterior es, durante el tiempo en que la posición de la compuerta es diferente a la del experimento nominal, menor que la del aire reciclado (ver figura 15). Esto implica que el fallo debería causar un aumento en el ratio de humedad del aire circulante entre el segundo 50000 y el instante en que la compuerta se cierra en el experimento nominal, hacia el segundo 61700. Ver la figura 56 para más detalles.

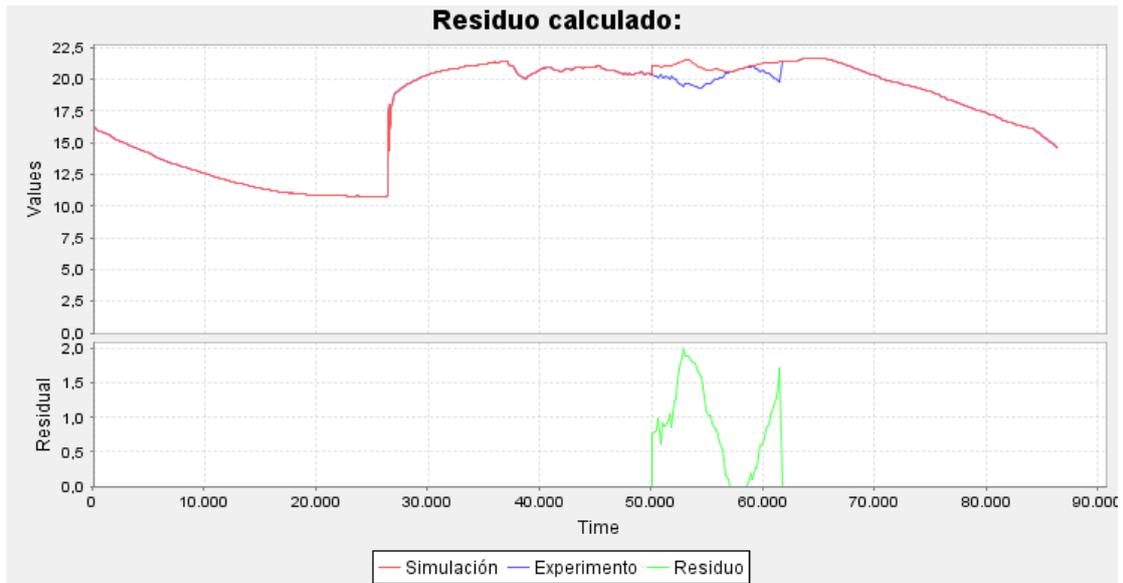


Figura 55: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF01b en t = 50000s (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

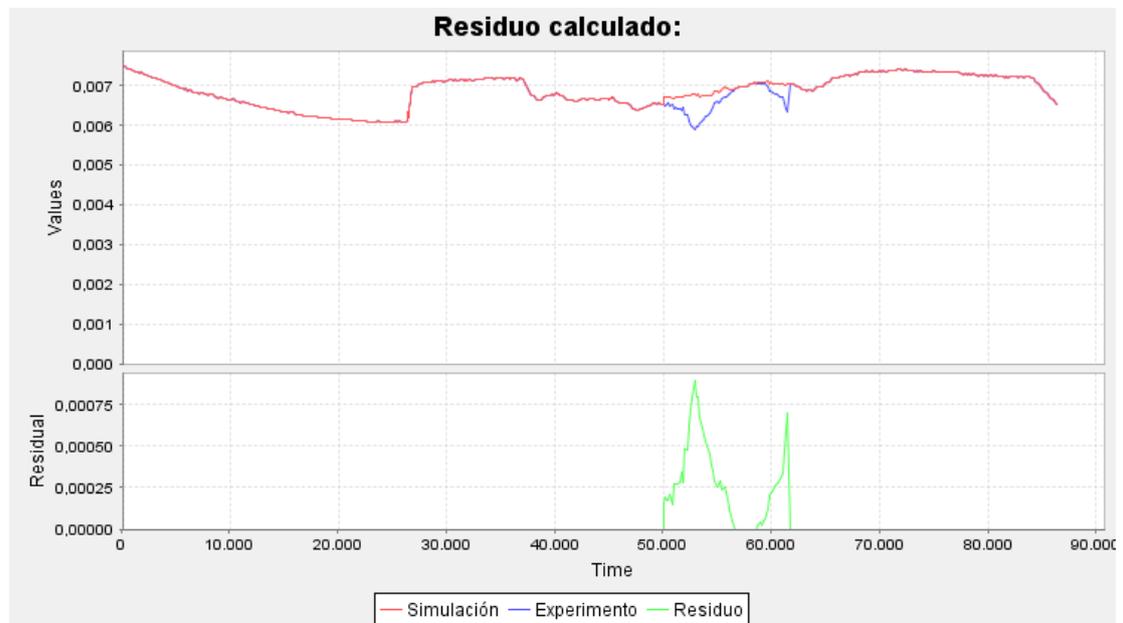


Figura 56: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF01b en t = 50000s (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

- MF02: Bloqueo en la válvula de la bobina de precalentamiento. El efecto de este fallo es el mismo que el del MF04 (bloqueo en la válvula de la bobina de recalentamiento). Ambos producen la misma variación de la temperatura por tratarse de componentes idénticos, pero separados en la secuencia de trabajo del AHU09. Es por ello que se estudiarán en detalle cuando revisemos el MF04, ya que entre los experimentos nominales que manejamos no hay uno en el que se vea específicamente el trabajo de la bobina precalentadora.
- MF02b: Fuga en la válvula de la bobina de precalentamiento. Es la misma situación que en el caso anterior, pero con respecto al Modo de Fallo MF04b. Desgraciadamente, veremos como no es posible aislar completamente estos fallos, más allá de un genérico “fallo en uno de los calentadores”. Esto es debido a la falta de sensores intermedios con lo que se suponía que contaba el sistema.

- MF03: Bloqueo en la válvula de la bobina de enfriamiento. Un fallo de estas características en el módulo deshumidificador puede tener consecuencias sobre la temperatura y la humedad del aire circulante. Para observar estos efectos se ha elegido el experimento nominal del día 06 de Septiembre de 2012.

Se ha decidido activar el Modo de Fallo MF03 en el segundo 45000 de experimento, en mitad de la zona de operación de los módulos de enfriamiento y calentamiento, para comprobar la diferencia con el comportamiento nominal. A partir de ese instante, y hasta el final del experimento, la válvula del módulo deshumidificador permanecerá cerrada (bloqueada).

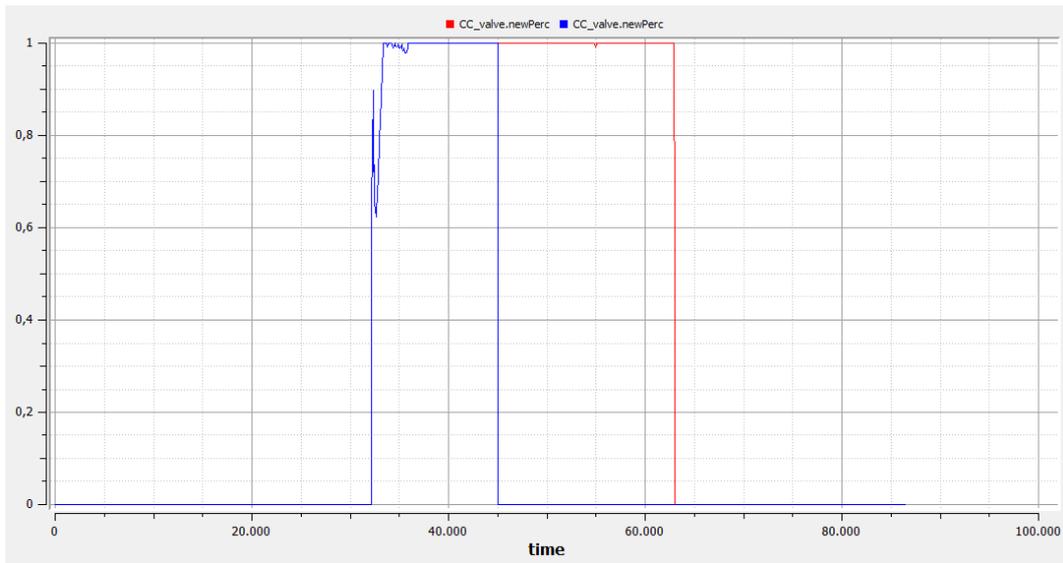


Figura 57: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Señal de control del módulo refrigerador en modo nominal (rojo), y sujeta al Modo de Fallo 03 a partir de los 45.000 segundos (azul).

La figura 57 muestra la nueva situación (en azul) frente a la nominal (en rojo). Hasta que se produce el fallo en el segundo 45000 ambas curvas son exactamente iguales, de ahí que sólo se aprecie una de ellas.

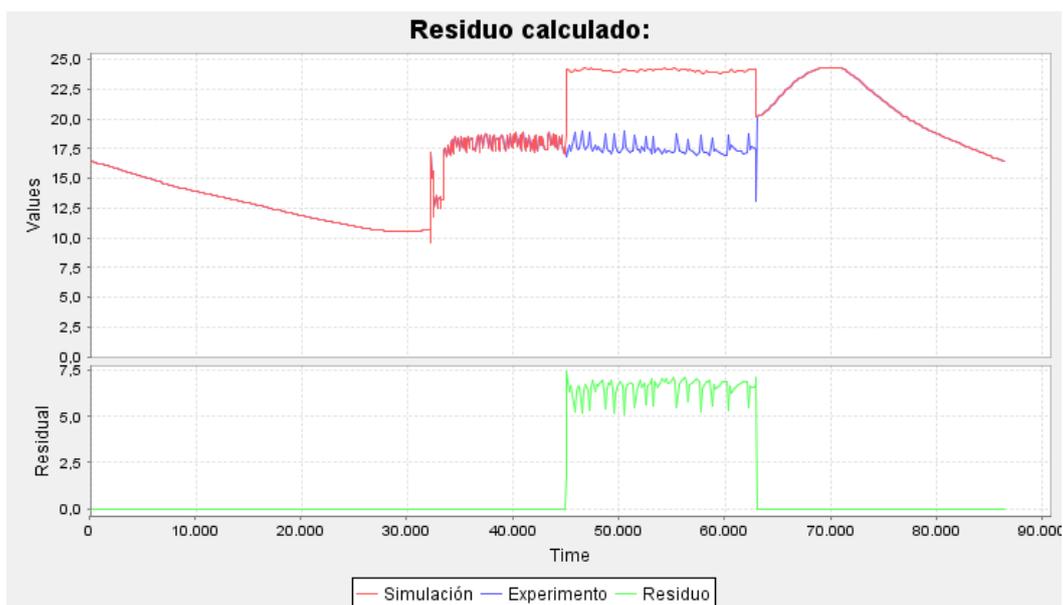


Figura 58: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF03 en $t = 45000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

La figura 58 deja ver la evidente diferencia entre las señales nominal y de fallo. Como se puede ver, el residuo es positivo cuando la válvula está cerrada, al contrario de lo que debería. Sin embargo, Cuando el control ordena cerrar la válvula el residuo es 0. Debemos prestar atención para no pensar que se ha corregido el fallo, sino que es simplemente una situación casual. El fallo sigue presente en esos instantes, por lo que es necesario haberlo identificado mientras el residuo era elevado.

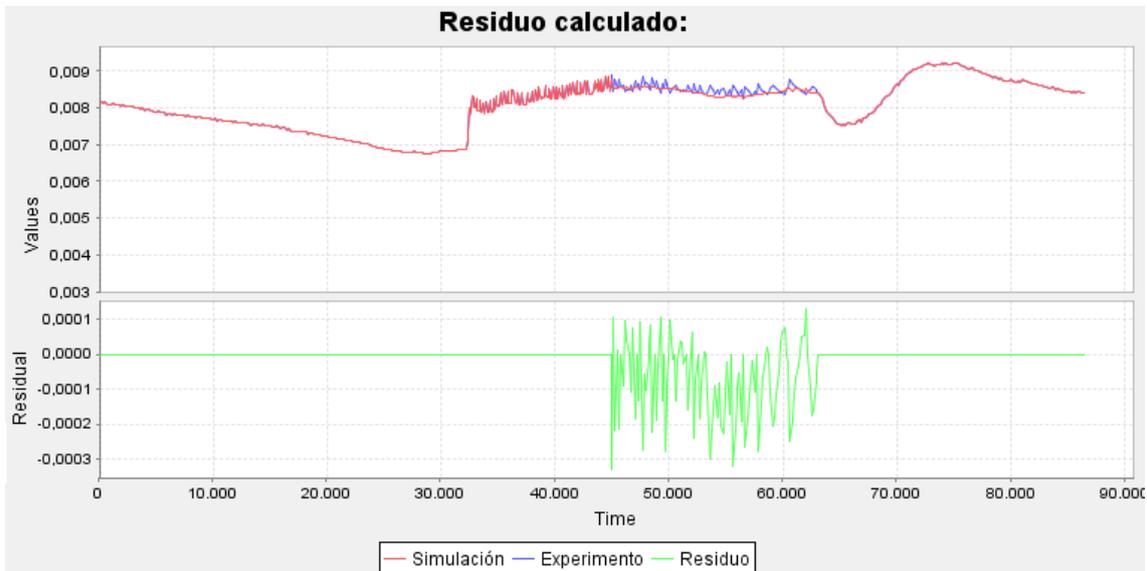


Figura 59: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal (azul) y con el fallo MF03 en $t = 45000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

- MF03b: Fuga en la válvula de la bobina de enfriamiento. En el apartado 3.6.4 se describe ampliamente un experimento real con este tipo de fallo. La consecuencia es una bajada de la temperatura durante el tiempo en que la fuga tiene efecto.
- MF04: Bloqueo en la válvula de la bobina recalentadora. Un fallo de este tipo se produce cuando la válvula que da paso al líquido calefactor no responde adecuadamente a las señales que recibe. En este caso, la compuerta se cierra cuando se produce el fallo y permanece así hasta el final.

Para comprobar los efectos que esto produce sobre las variables del sistema, se ha escogido el experimento nominal del 6 de Septiembre de 2012. Se trata del mismo caso que en el Modo de Fallo MF03, y se ha elegido porque los efectos deberían ser totalmente opuestos, y servirán para corroborar las suposiciones sobre el funcionamiento de los componentes.

El fallo introducido es un bloqueo total en la válvula de recalentamiento en el segundo 45000 de experimento, que supone que el aire circulante dejará de ser calentado después de haber sido enfriado (ver Figura 60).

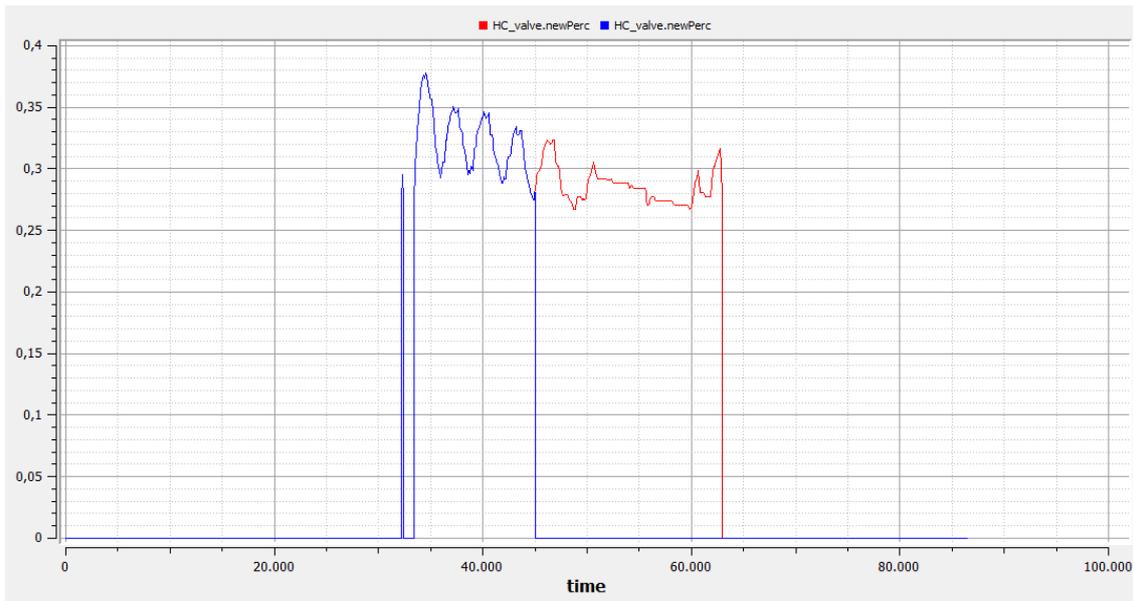


Figura 60: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Señal de control del módulo recalentador en modo nominal (rojo), y sujeta al Modo de Fallo 04 a partir de los 45.000 segundos (azul).

La figura 61 muestra una diferencia negativa a partir del segundo 45000, tal como se esperaba (hablando siempre de sim. fallo - exp. nominal). Cuando la bobina deja de calentar el aire, este se vuelve hasta 5°C más frío.

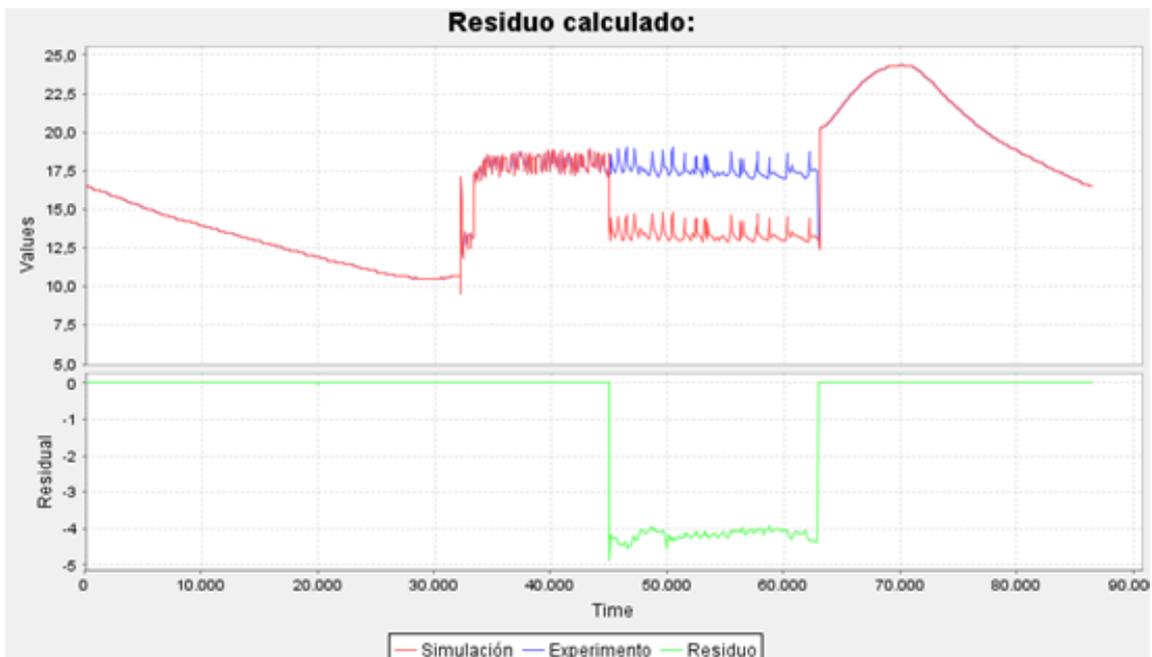


Figura 61: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF04 en $t = 45000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

Si ponemos esta gráfica en relación con la número 58, comprobamos que el efecto del fallo MF04 es el opuesto al del MF03. En cuanto a la humedad específica (figura 62), el Posible Conflicto 02 no refleja ningún cambio significativo con respecto al experimento nominal. Como ya se ha explicado, esto es debido a que los calentadores no afectan a la humedad específica.

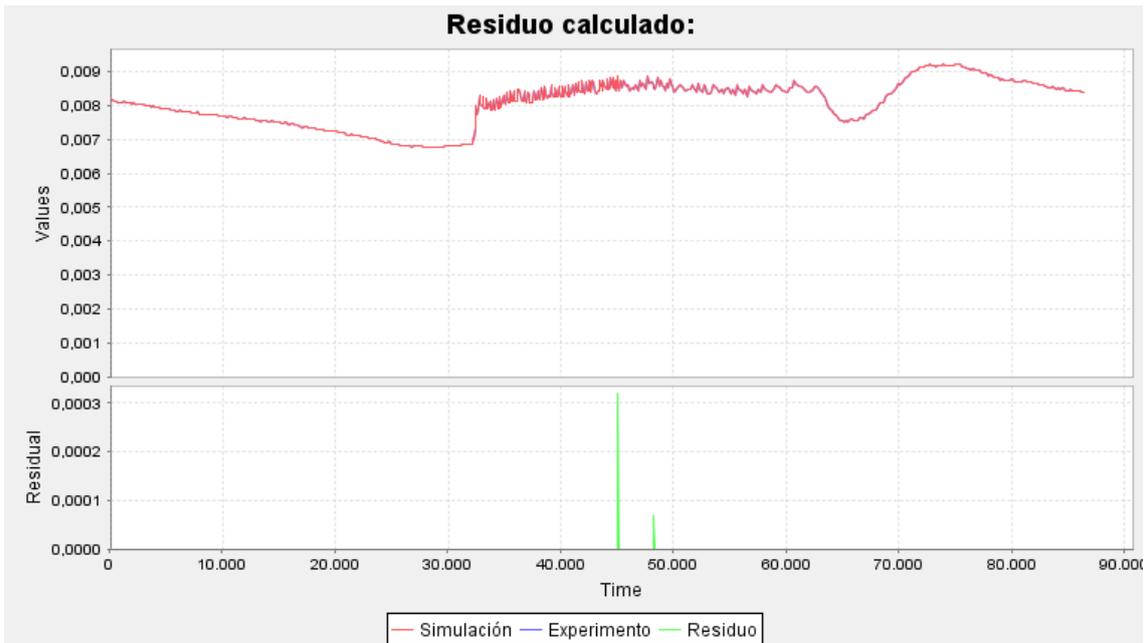


Figura 62: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF04 en $t = 45000$ s (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

- MF04b: Fuga en la válvula de la bobina recalentadora. Este fallo no representa solamente una fuga en la válvula, como indica su nombre, sino también un bloqueo de la misma en cualquier posición que no sea totalmente cerrada. Para simplificar suponemos que, en caso de fallo, la válvula deja pasar el 100% del líquido calefactor que recibe.

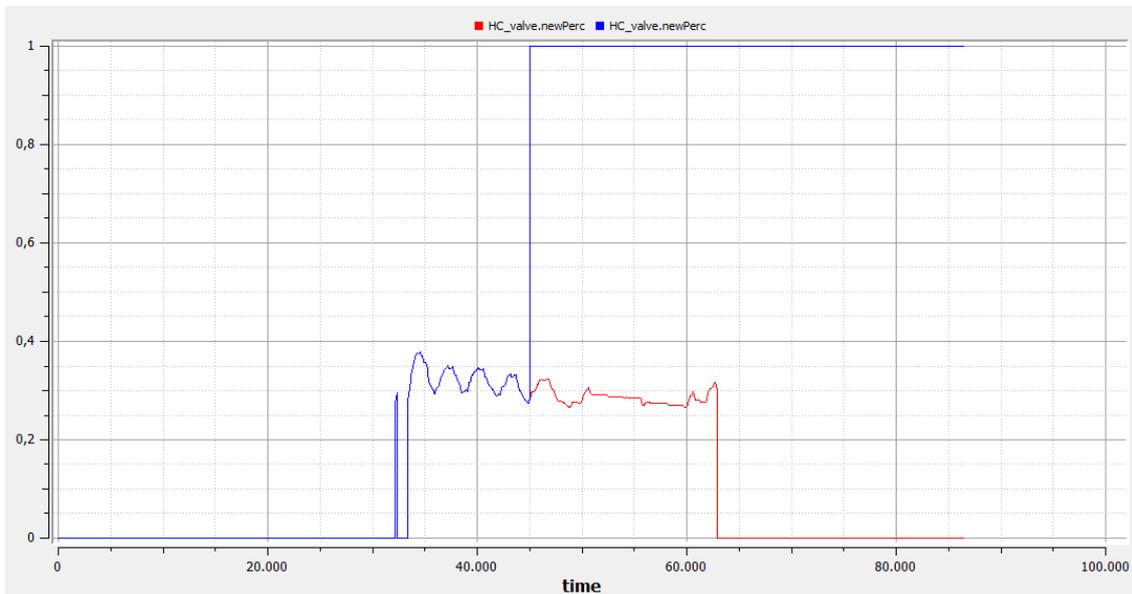


Figura 63: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Señal de control del módulo recalentador en modo nominal (rojo), y sujeta al Modo de Fallo 04b a partir de los 45.000 segundos (azul).

El experimento elegido para mostrar los efectos de una fuga en la válvula calentadora es, de nuevo, el del 6 de Septiembre de 2012, al que se le provoca el fallo en el instante 45000. Dado que en él el aire circulante es enfriado y después calentado de nuevo, los efectos de un calentamiento excesivo deberían ser similares a los de un enfriamiento insuficiente (MF03).

Sin embargo, la principal diferencia entre el modo de fallo MF04b (figura 64) y el MF03 (figura 58) es que en el primero el efecto no desaparece cuando se cierra la válvula, ya que el fallo la mantiene totalmente abierta. Además, la temperatura del aire no pierde su característica irregularidad como en el fallo de la bobina de enfriamiento, ya que es el agua refrigeradora la que le otorga esa peculiar forma a la señal.

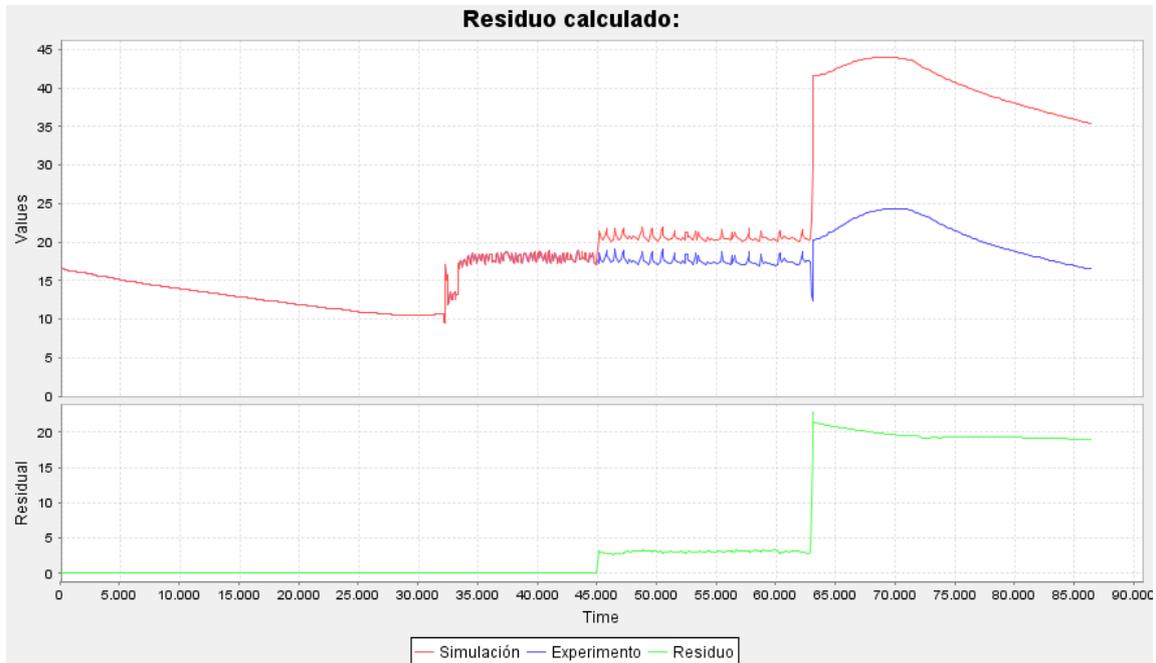


Figura 64: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF04b en $t = 45000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

En cuanto a la humedad, sabemos que los calentadores no la afectan, por lo que el residuo es nulo durante todo el experimento, como puede verse en la figura 65.

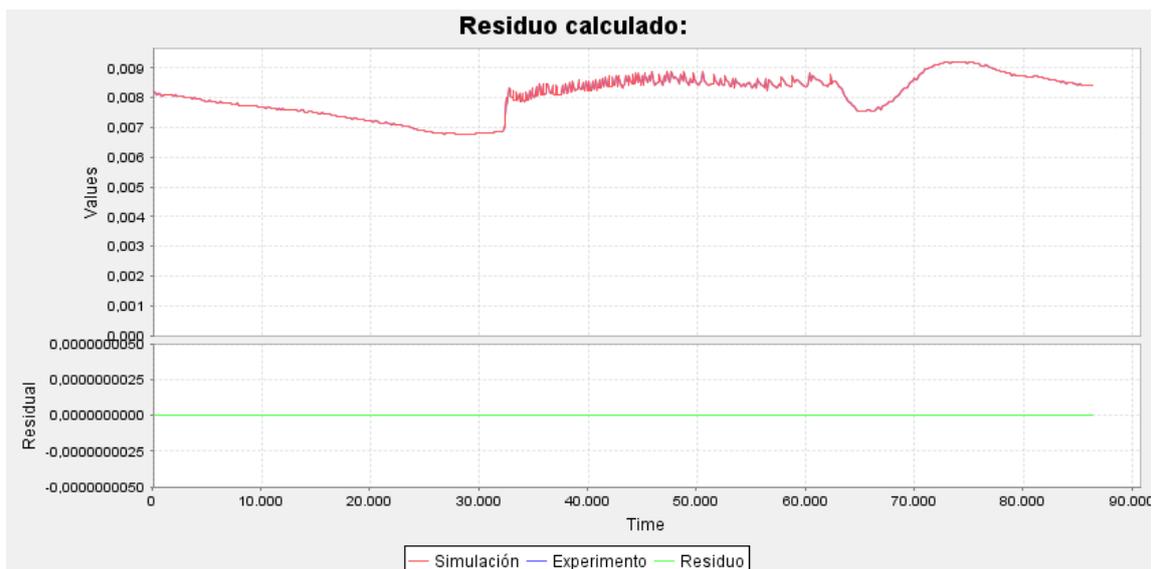


Figura 65: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF04b en $t = 45000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

- MF05: Bloqueo en la válvula del módulo humidificador. En este caso es el último paso de la secuencia del AHU-09 el que presenta un fallo. Se trata de un bloqueo en la válvula que da paso al vapor destinado a aumentar la humedad del aire circulante. Si

se produce, no se podrá humidificar el aire en modo alguno, con lo que corremos el riesgo de resecar el ambiente, lo que podría alterar las propiedades del sonido (recordemos que el sistema está instalado en una escuela de música).

Para comprobar los efectos de este fallo en el sistema, se ha utilizado el experimento del 7 de Febrero de 2013, en el que el módulo humidificador es el principal componente activo. Se someterá al Modo de Fallo MF05 en el segundo 50000 de simulación, momento a partir del cual la válvula en cuestión se cerrará por completo hasta el final (figura 66).

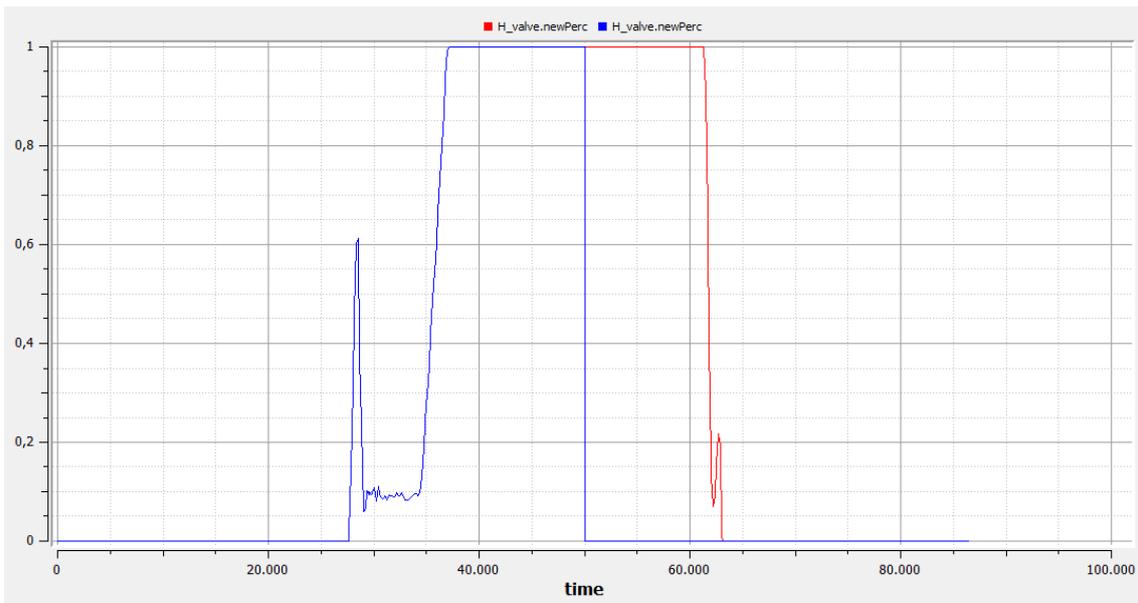


Figura 66: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Señal de control del módulo humidificador en modo nominal (rojo), y sujeta al Modo de Fallo 05 a partir de los 50.000 segundos (azul).

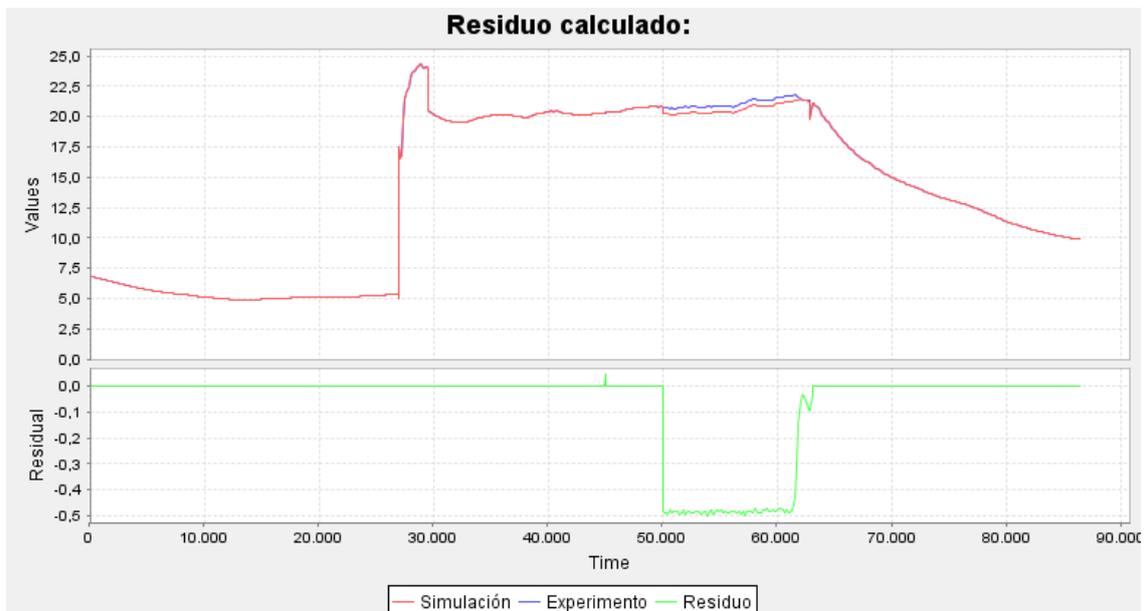


Figura 67: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF05 en $t = 50000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

Como es de esperar, el efecto solamente es perceptible entre los segundos 50000 y 63000, momento en que la válvula debería estar abierta y no lo está. Como se ve en la

gráfica 67, el hecho de añadir humedad al aire mediante vapor incrementa también su temperatura. Esto es debido a la temperatura del vapor que añadimos, de 100°C.

En el segundo Posible Conflicto, la humedad sufre un severo descenso tras la activación del fallo, pasando de más o menos 13 gramos de agua por kg de aire a solamente 7 (ver figura XXXX). En humedad relativa, teniendo en cuenta que el aire en el segundo 50000 está a 20,8°C y a una presión de una atmósfera, el cambio supone un descenso del 84,7% al 45.5% aproximadamente. Ver figura 68.

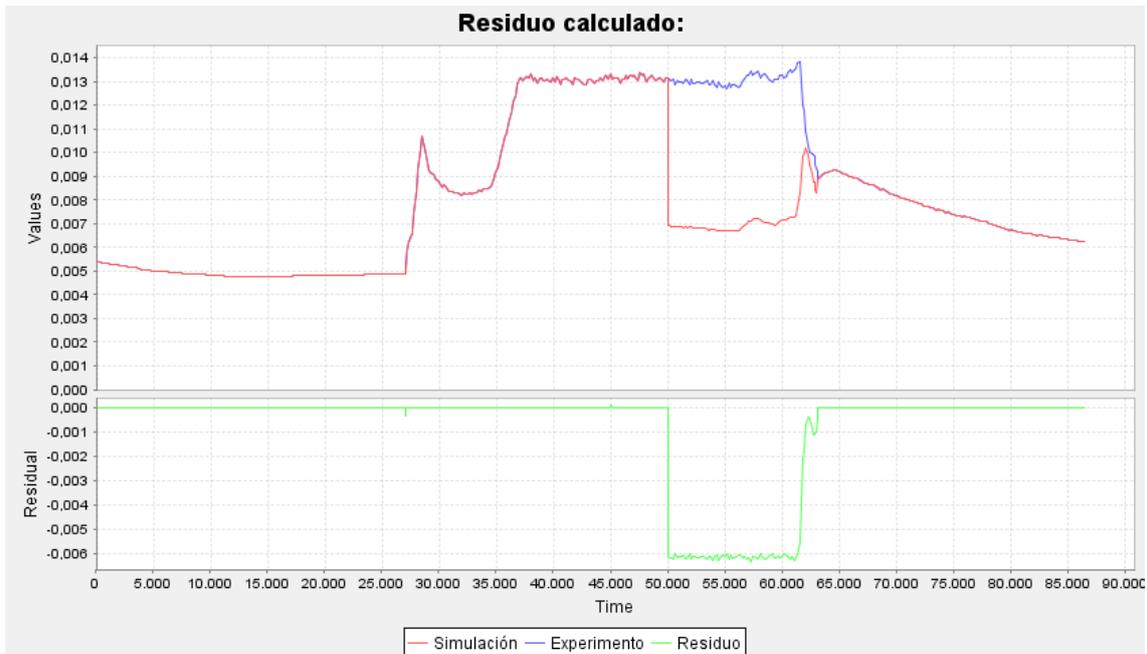


Figura 68: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF05 en $t = 50000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

- MF05b: Fuga en la válvula del módulo humidificador. Cuando el fallo en el sistema impide cerrar la válvula de este componente o provoca una fuga en el mismo, las consecuencias abarcan una ligera subida de la temperatura y un aumento descontrolado de la humedad, que puede sacarnos de la zona de confort.

Para mostrar los efectos de este fallo se ha elegido el experimento nominal del 7 de Febrero de 2013, en el que se activa la válvula al 100% desde el segundo 50000. Se ha decidido así para mostrar que, a pesar de detectar y aislar el fallo adecuadamente, a veces es posible no darse cuenta de que algo va mal hasta pasado un tiempo, y a veces incluso se termina el experimento y el fallo pasa desapercibido.

En este caso, todo parece funcionar correctamente hasta que se intenta cerrar la válvula del humidificador, pero ésta no responde (figura 69). Entonces se experimenta un ligero incremento de la temperatura (figura 70), acompañado de un aumento descontrolado de la humedad específica (figura 71).

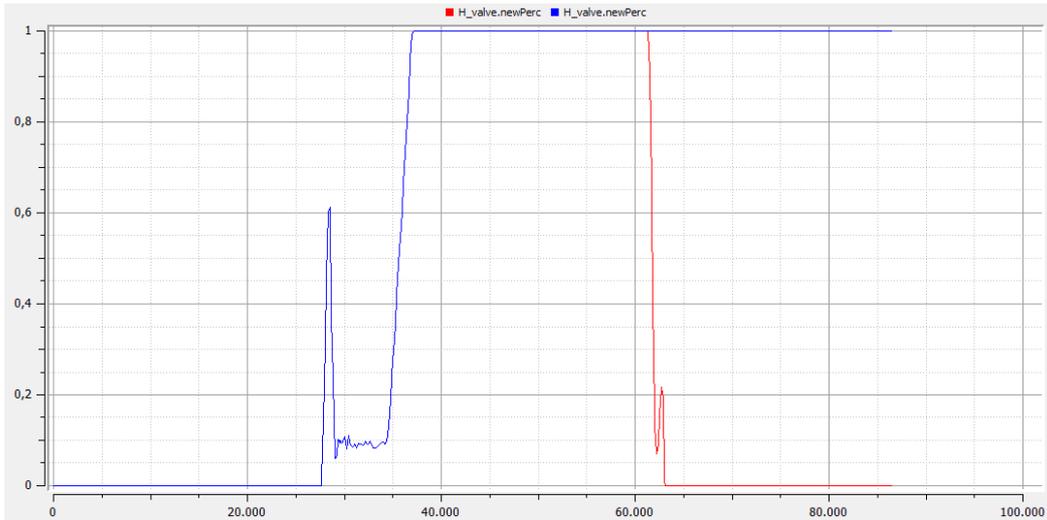


Figura 69: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Señal de control del módulo humidificador en modo nominal (rojo), y sujeta al Modo de Fallo 05b a partir de los 50.000 segundos (azul).

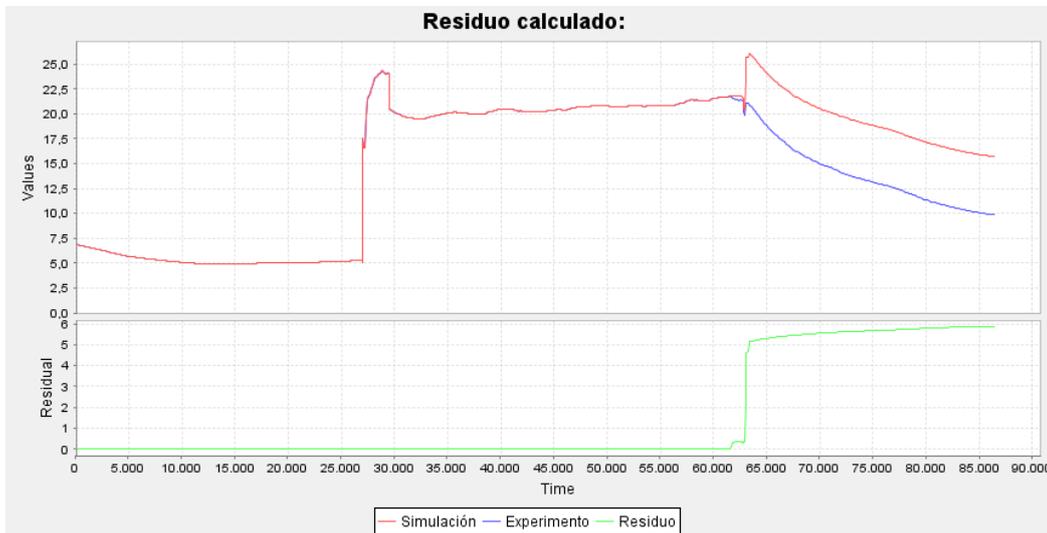


Figura 70: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF05b en $t = 50000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 01 (verde).

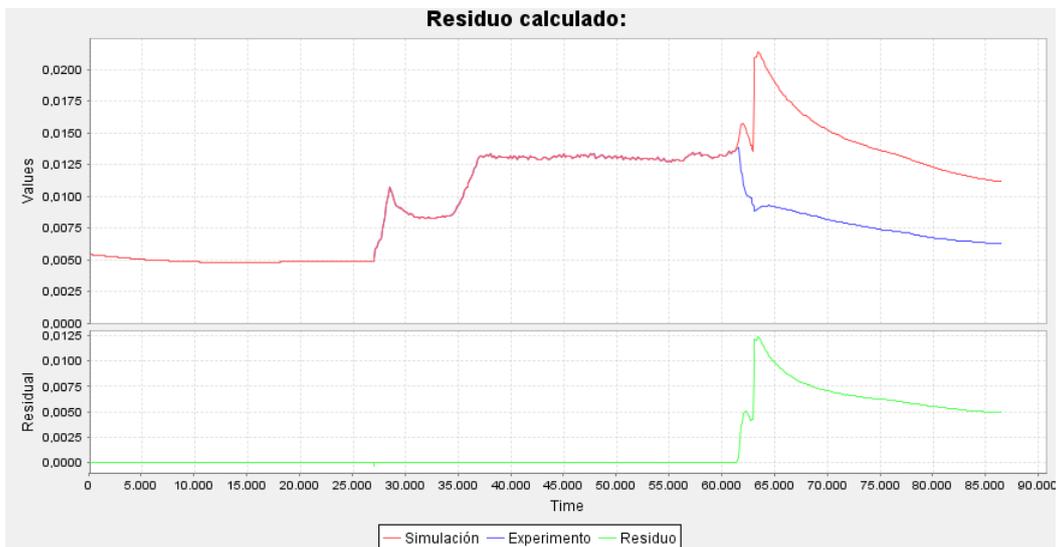


Figura 71: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF05b en $t = 50000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 02 (verde).

- MF06: Fallo en el sensor de la temperatura de salida. Se ha decidido mostrar los efectos de este modo de fallo en los tres experimentos nominales de que se dispone. En los tres casos, se incorporará el fallo en el segundo 43000, más o menos a mitad del estudio.

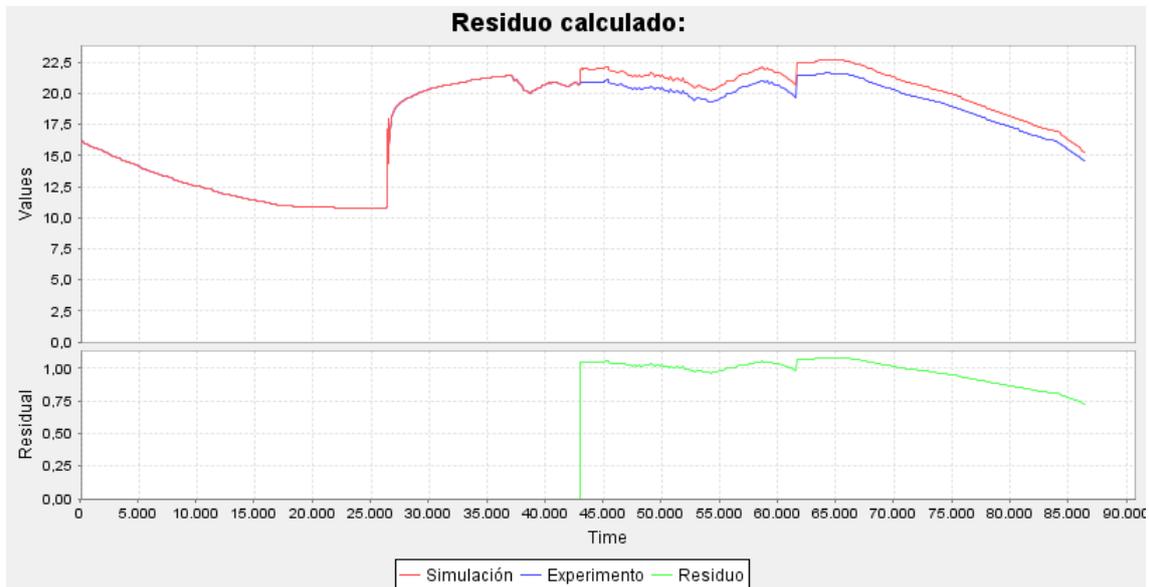


Figura 72: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF06 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 01 (verde).

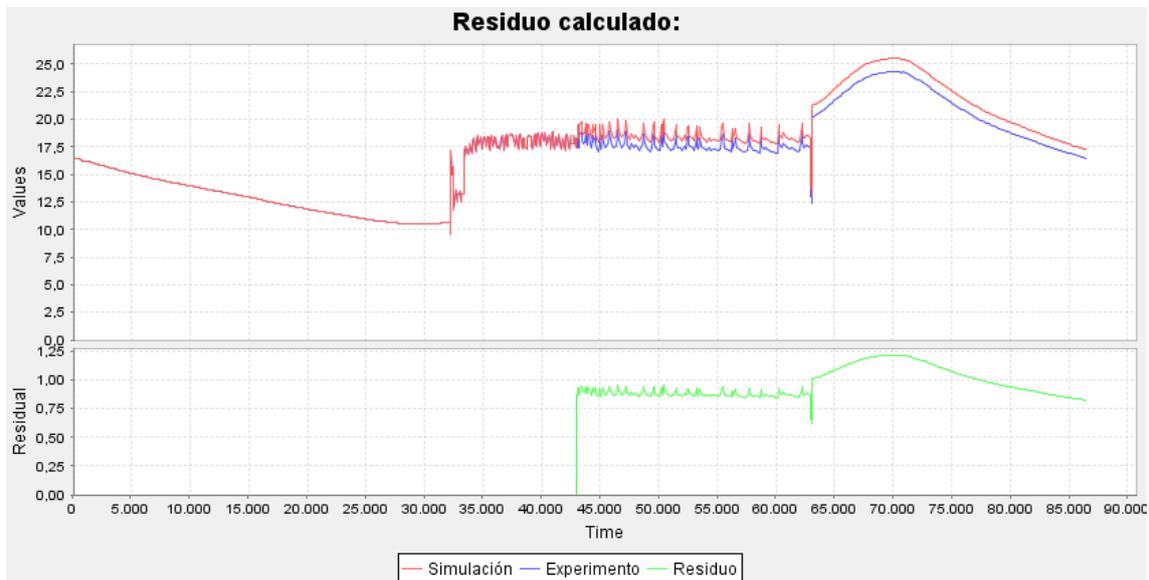


Figura 73: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF06 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 01 (verde).

Como se ve en las gráficas 72, 73 y 74 (a continuación), el residuo tiene dos características principales. Es siempre positivo, como ya se dijo debido al tipo de ruido añadido, y además tiene una forma similar a la de la curva correspondiente. Esto último es lógico, si tenemos en cuenta que el fallo es proporcional a la señal.

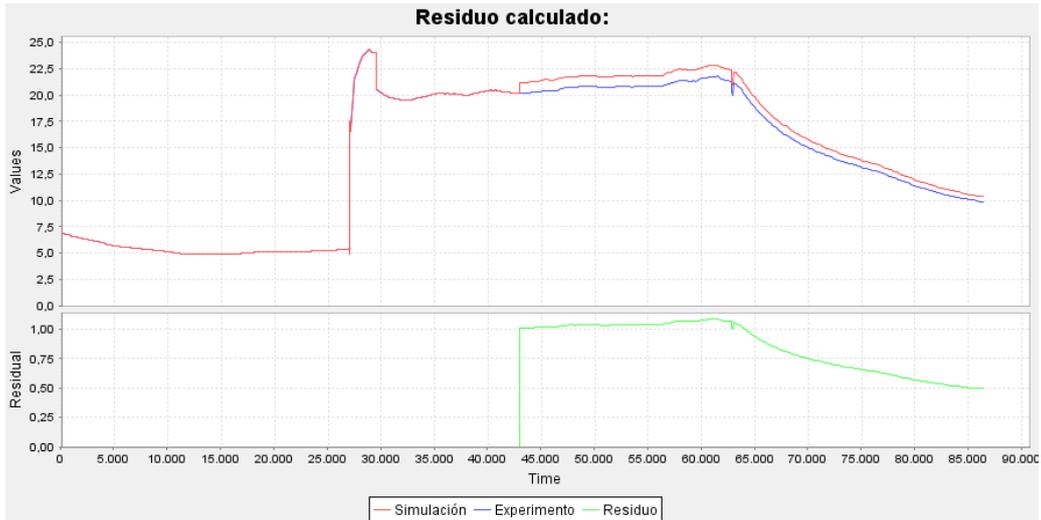


Figura 74: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF06 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 01 (verde).

Las señales de humedad específica no se ven afectadas en modo alguno por el MF06, como demuestran las gráficas 75, 76 y 77.



Figura 75: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal (azul) y con el fallo MF06 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 02 (verde).

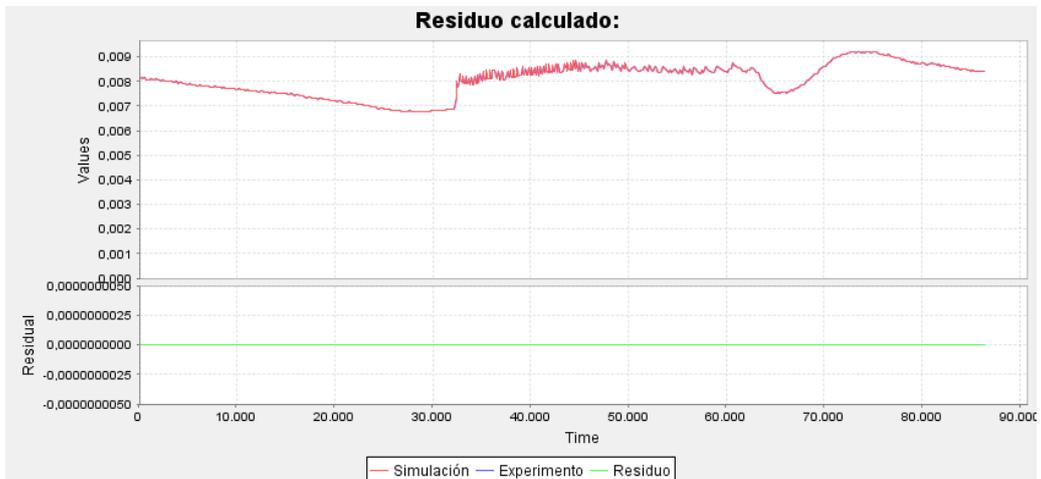


Figura 76: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal (azul) y con el fallo MF06 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 02 (verde).

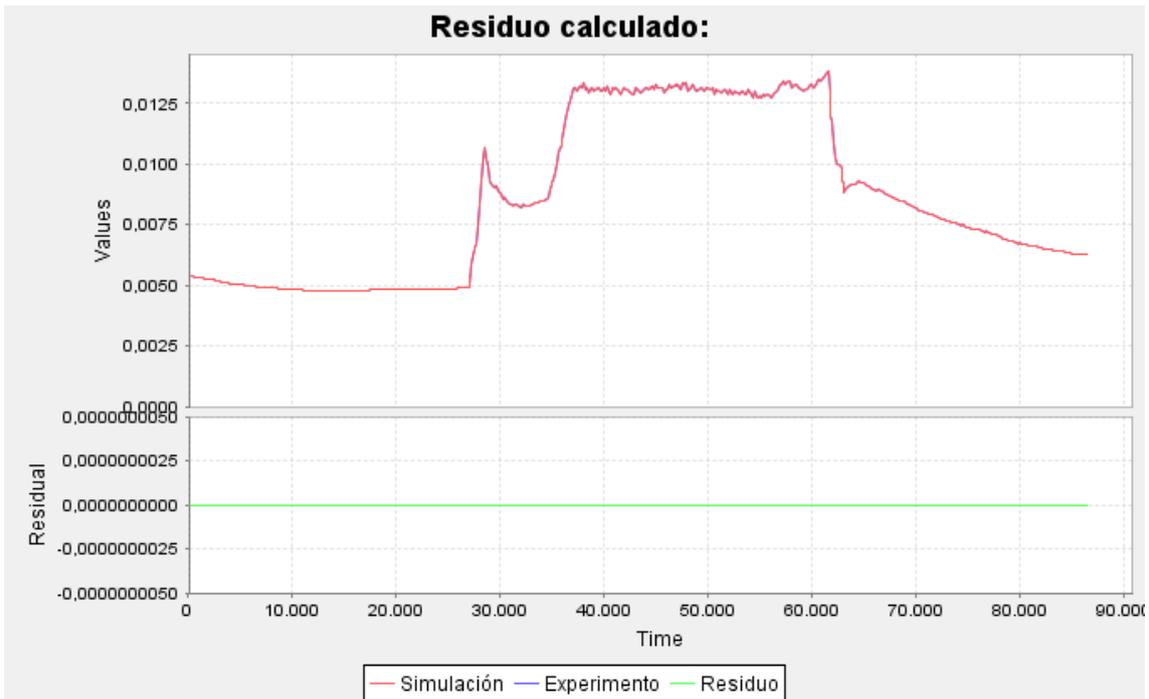


Figura 77: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal (azul) y con el fallo MF06 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 02 (verde).

- MF07: Fallo en el sensor de la humedad de salida. Al igual que en el caso anterior, se mostrarán los efectos de activar este modo de fallo a los 43000 segundos en los tres experimentos nominales que se manejan.

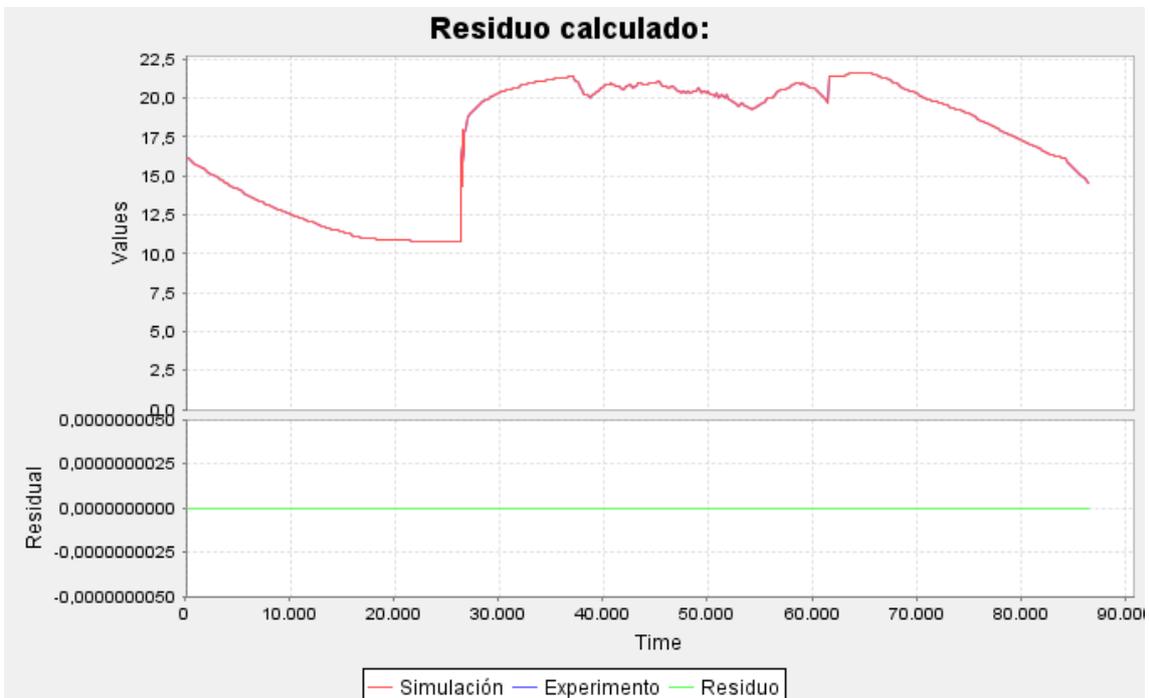


Figura 78: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF07 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 01 (verde).

Como se ve en las gráficas 78, 79 y 80, el Modo de Fallo 07 no afecta en absoluto a la temperatura del aire circulante.

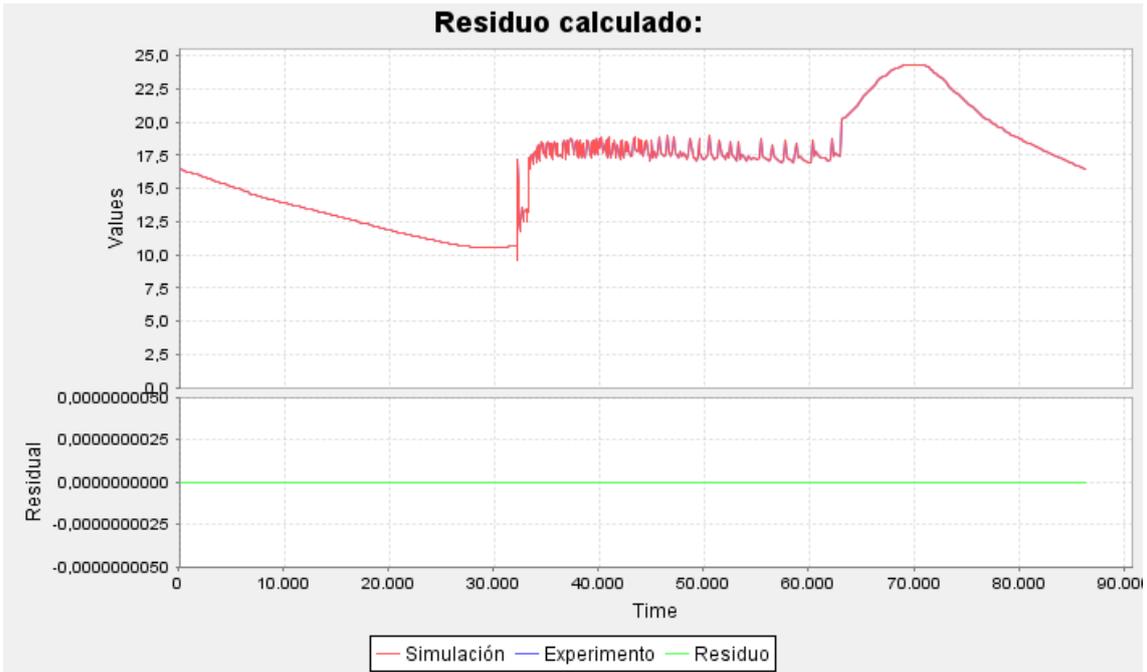


Figura 79: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF07 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 01 (verde).

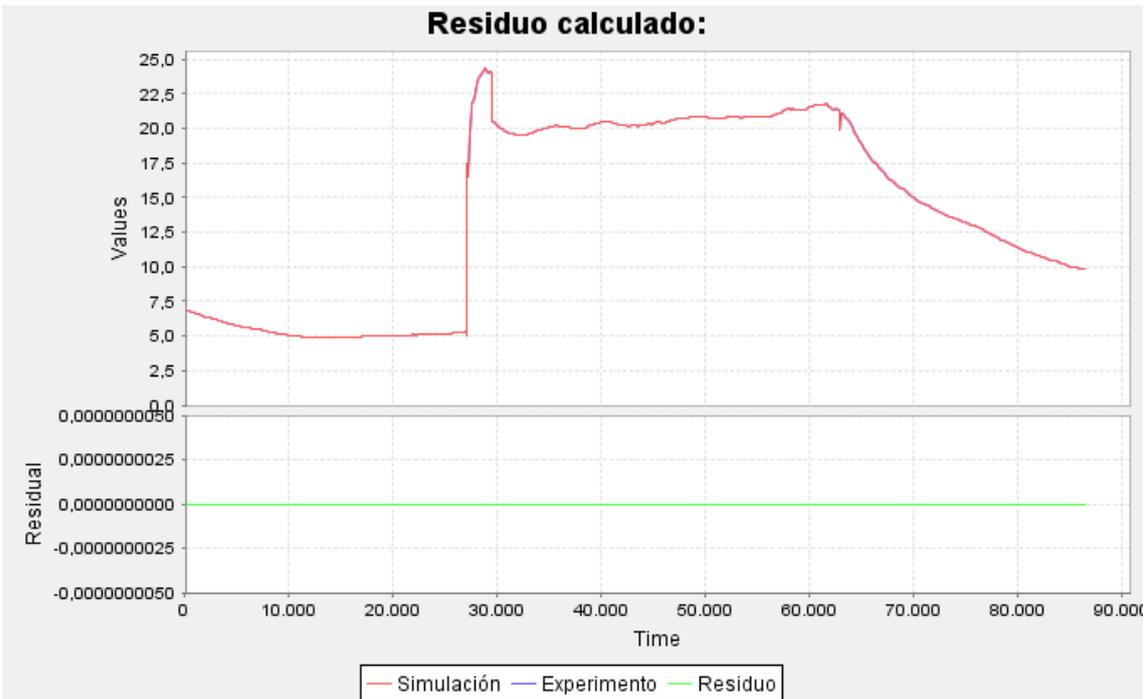


Figura 80: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF07 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del Posible Conflicto 01 (verde).

En cuanto al Posible Conflicto 2, relativo a la humedad específica, el Modo de Fallo 07 sí tiene efecto sobre él. Las gráficas 81, 82 y 83 muestran un aumento de la humedad a partir del momento en que se activa el fallo.

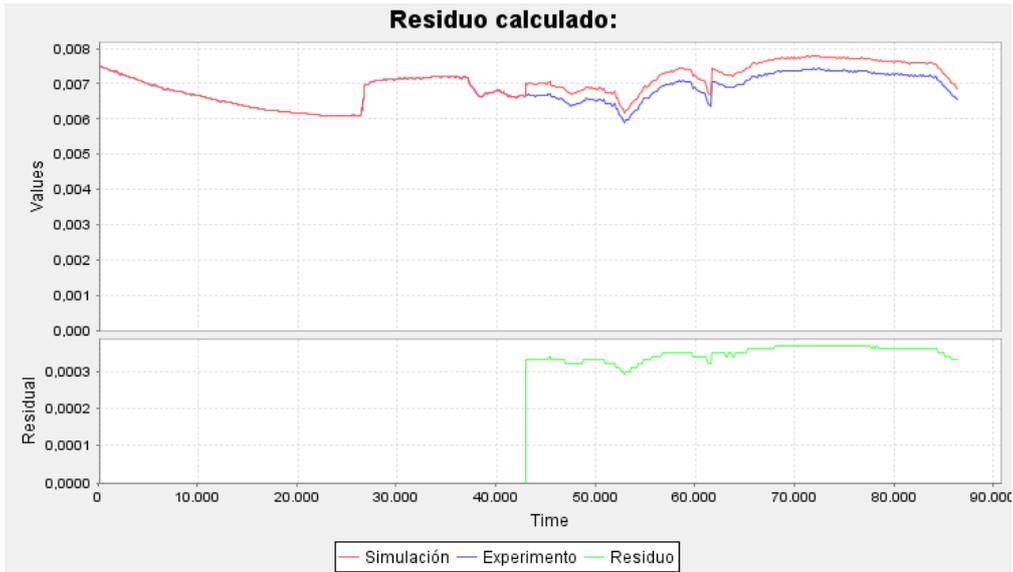


Figura 81: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF07 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

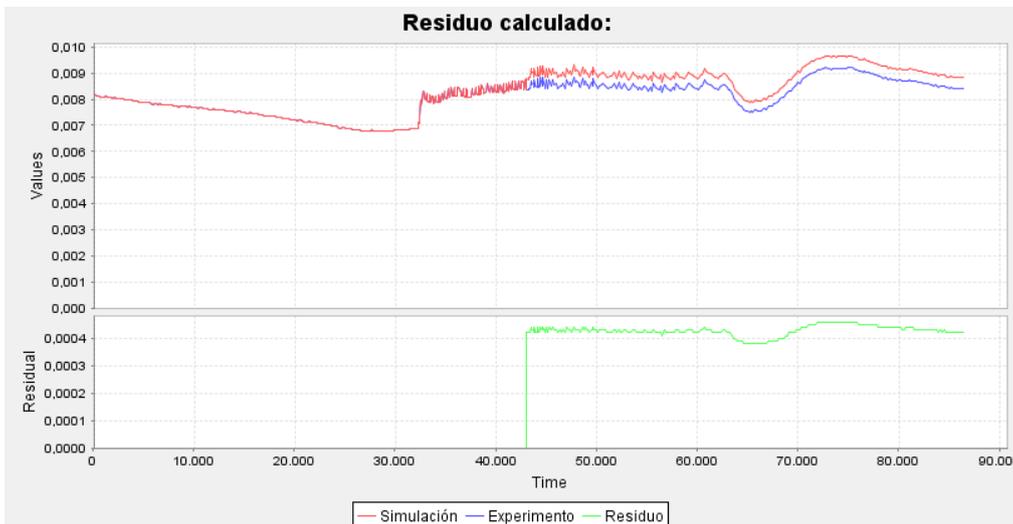


Figura 82: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF07 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

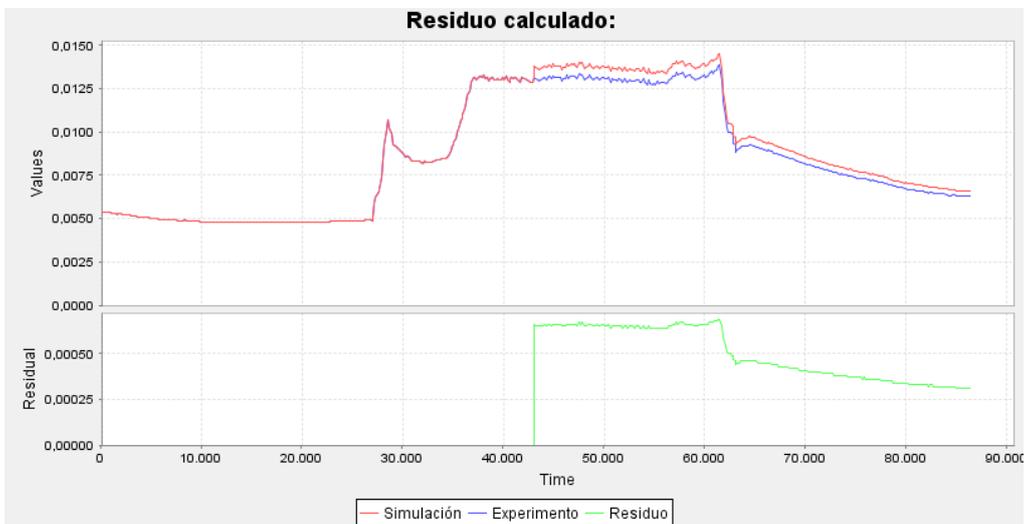


Figura 83: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF07 en $t = 43000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

- MF08: Pérdida de aire entre componentes. Una fuga en el conducto de aire entre dos módulos podría desencadenar una pérdida de aire mezclado en el sistema, que se reemplazaría inmediatamente por aire procedente del exterior. El motivo es que el resto de flujos del sistema están impuestos mediante ventiladores, por lo que solo queda esa alternativa.

Cabría la posibilidad de que en lugar de sacar parte de ello, la fuga introdujese aire u otros elementos (lluvia, etc.) en el sistema, pero esta posibilidad no se considera en este proyecto.

Para las gráficas que se muestran se ha elegido introducir el fallo en el instante 45000 del experimento del 1 de Junio de 2013, que muestra perfectamente el cambio en temperatura y humedad provocado por la fuga.

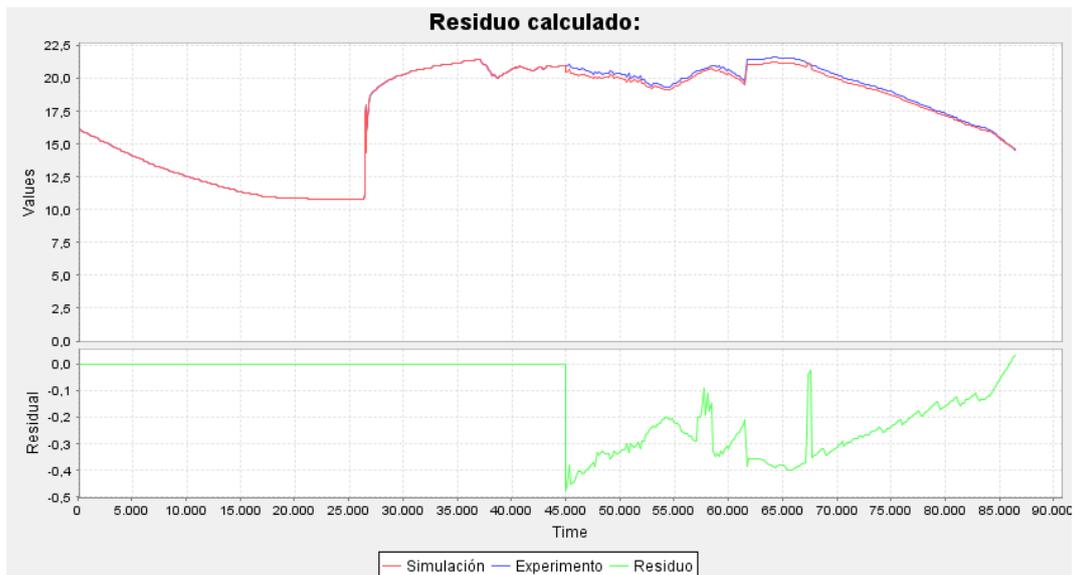


Figura 84: Experimento del 1 de Junio de 2013. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF08 en $t = 45000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

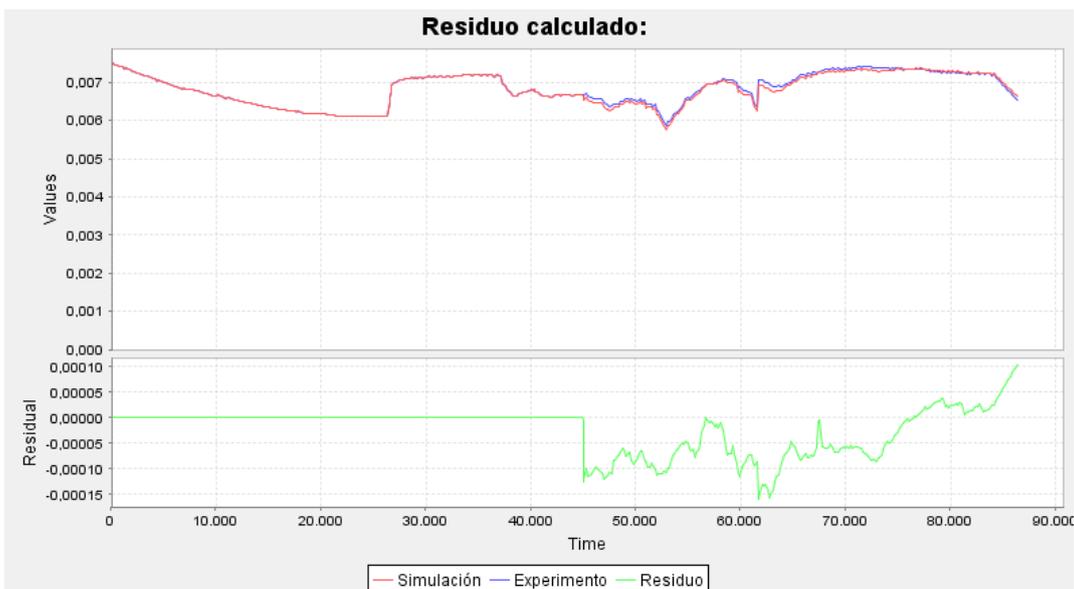


Figura 85: Experimento del 7 de Febrero de 2013. Arriba, diferencia entre la humedad del aire nominal (azul) y con el fallo MF08 en $t = 45000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

Como se ve en la gráfica 84, la fuga provoca un leve descenso en la temperatura, que se convierte en un ligero aumento hacia el final del experimento. Esto es debido a que la temperatura del aire exterior es menor que la del aire reciclado, excepto en los últimos minutos (ver figura 14). En la gráfica 85 se ve el mismo efecto con la humedad del aire circulante, pero el cambio se produce antes, alrededor del segundo 76000. En la figura 15 es posible ver cómo la humedad exterior supera a la del aire reciclado justo en ese instante.

- MF09: Pérdida de efectividad de los calentadores. Este modo de fallo es un tanto genérico, y engloba a cualquier tipo de defecto de fabricación o causado por el paso del tiempo u otros factores, y que afecte a la efectividad de los calentadores. Para simplificar, hemos elegido uno de los parámetros que mejor representa la “bondad” del proceso de calentamiento: la eficacia.

Así, se ha modificado el modelo del experimento del 6 de Septiembre de 2012 añadiendo un factor de fallo, como se explica en el apartado 4.3. Este factor se activa para la bobina recalentadora, con valor 0.95, a partir del segundo 40000 de experimento.

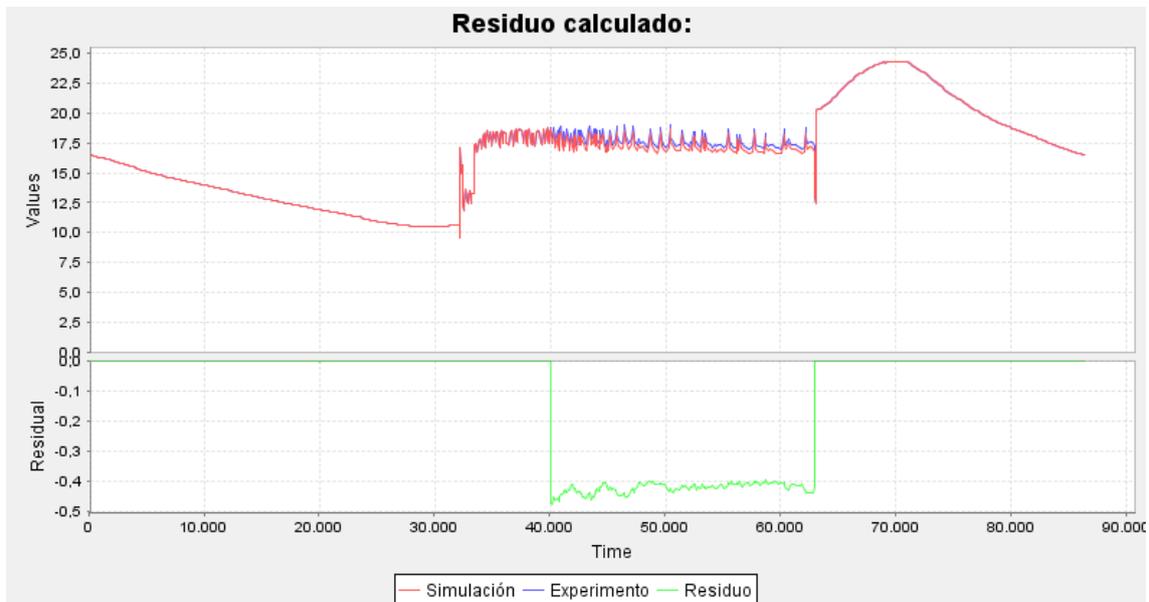


Figura 86: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF09 en $t = 40000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

Como se ve en la gráfica 86, el ligero desvío en la temperatura sólo se aprecia mientras actúa el recalentador, de manera que podría incluso pasar inadvertido si éste no entra en funcionamiento.

La gráfica 87 del Posible Conflicto 02 confirma que, como ya se ha comentado en varias ocasiones, los fallos relativos a los calentadores y, en general a los aumentos de temperatura, no afectan a la humedad del aire circulante.

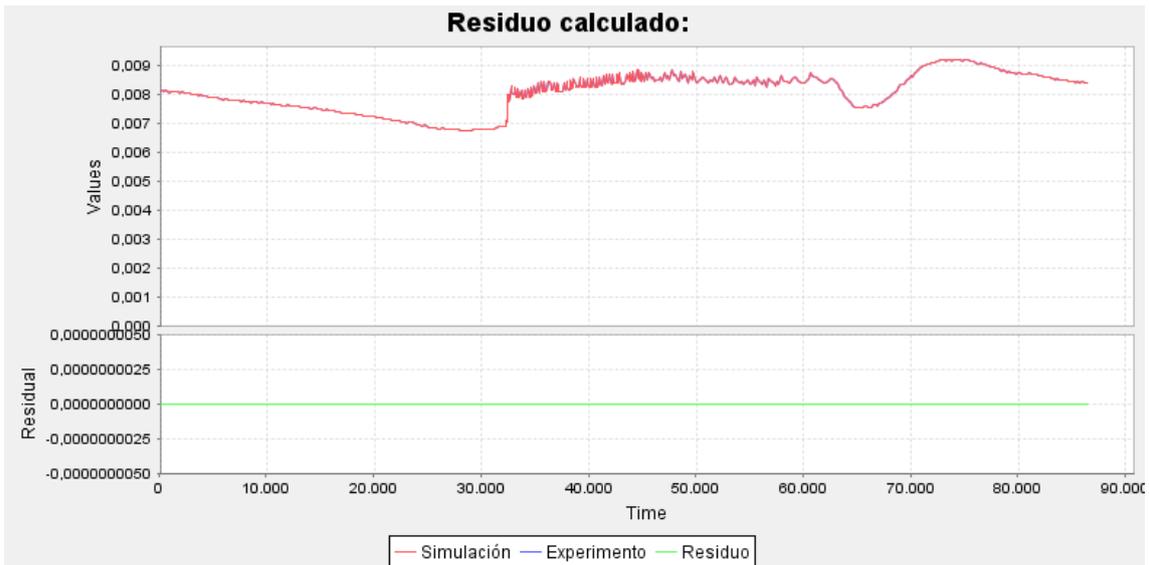


Figura 87: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal (azul) y con el fallo MF09 en $t = 40000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 02 (verde).

- MF10: Pérdida de efectividad en el módulo deshumidificador. Como en el caso anterior, este Modo de Fallo comprende a otros más específicos, tales como desgaste de piezas, acumulación de óxido, etc., que afectan a la eficacia del módulo enfriador.

De nuevo, se ha optado por la simplificación, modelando todo este tipo de defectos como un fallo en la eficacia del componente. En el modelo, se ha introducido un factor con valor 0.95 a la hora de calcular la eficacia (ver la sección 4.3), que para la simulación se activa en el segundo 50000.

El experimento elegido es, de nuevo, el del 6 de Septiembre de 2012, por ser aquél en el que más se aprecian los fallos del módulo deshumidificador en la temperatura del aire.

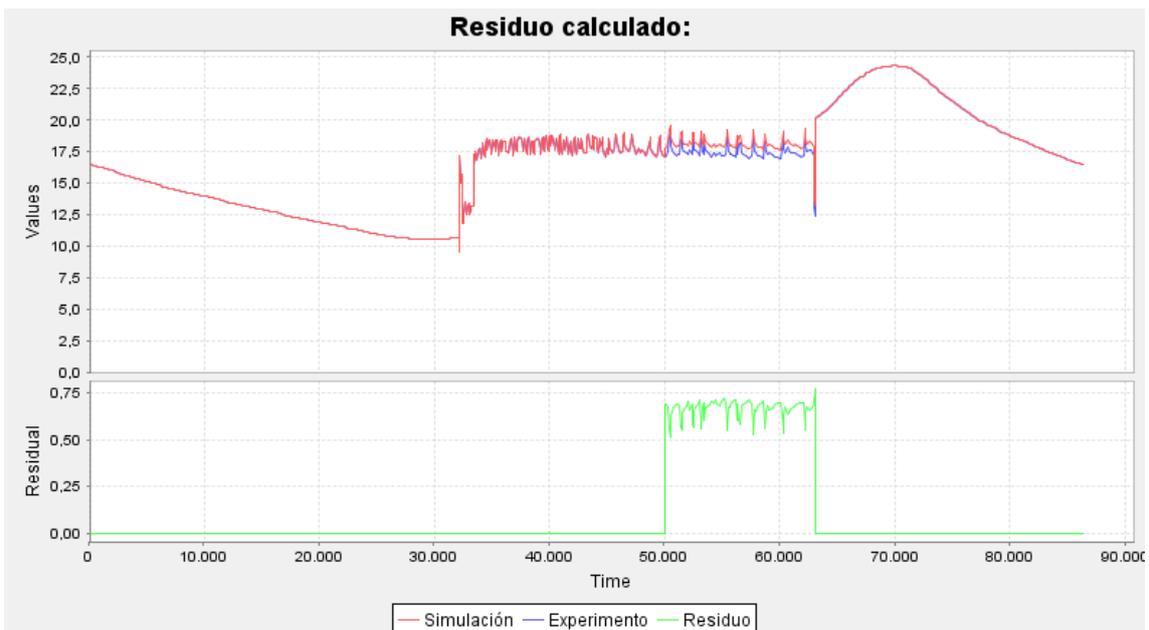


Figura 88: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la temperatura del aire nominal (azul) y con el fallo MF10 en $t = 50000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto 01 (verde).

Como se ve en la figura 88, la pérdida de efectividad en el módulo enfriador hace que el sistema enfríe el aire más de medio grado centígrado menos de lo que debería, y por eso el residuo sale positivo.

En cuanto a la humedad específica, el MF10 no la afecta en absoluto (ver figura 89).

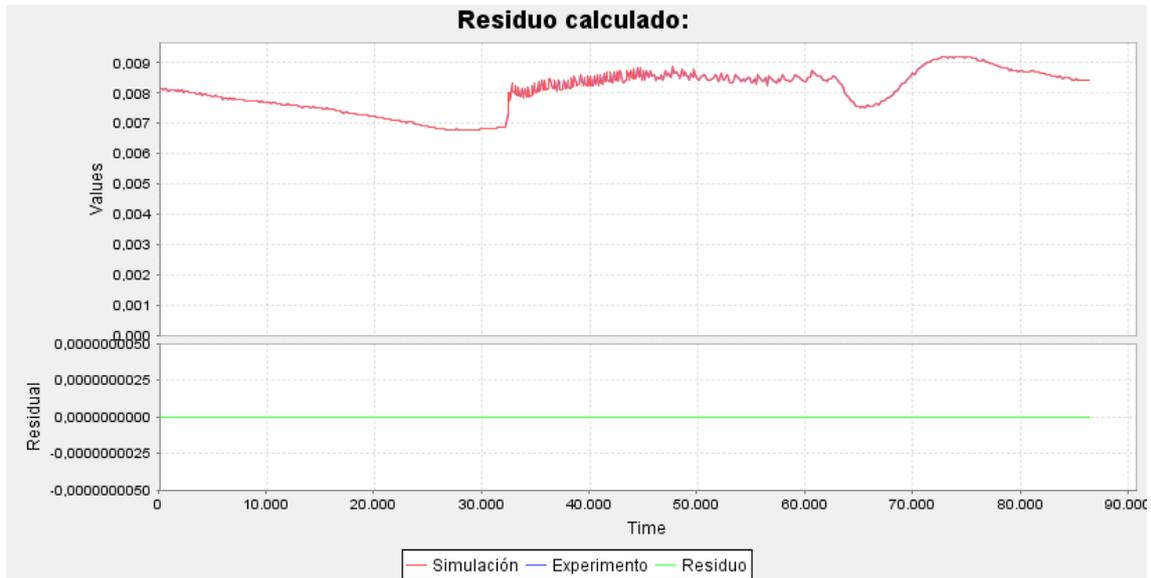


Figura 89: Experimento del 6 de Septiembre de 2012. Arriba, diferencia entre la humedad específica del aire nominal (azul) y con el fallo MF10 en $t = 40000s$ (rojo). Abajo, valor del residuo del posible conflicto O2 (verde).

Capítulo 6:

Resultados de la diagnosis

6.- Resultados de la diagnosis

A continuación se detallan los resultados obtenidos del estudio de los residuos, y las conclusiones que de ellos se desprenden.

6.1.- Resultados del diagnóstico

La siguiente tabla detalla el resultado de la detección de los diferentes Modos de Fallo por el Sistema de Diagnóstico.

Modo de Fallo	Tiempo de fallo	Firma	Detección	Tiempo de detección
MF01	20000	{1, 1}	Correcta	21945.6
MF01b	50000	{1, 1}	Correcta	50284.8
MF02	45000	{1, 0}	Correcta	45100.8
MF02b	45000	{1, 0}	Correcta	45100.8
MF03	45000	{1, 0}	Correcta	45091.9
MF03b	44200	{1, 0}	Correcta	44582.4
MF04	45000	{1, 0}	Correcta	45100.8
MF04b	45000	{1, 0}	Correcta	45100.8
MF05	50000	{1, 1}	Correcta	50070.28
MF05b	50000	{1, 1}	Correcta	50284.8
MF06	43000	{1, 0}	Correcta	43200
MF07	43000	{0, 1}	Correcta	43200
MF08	45000	{1, 1}	Correcta	45115.3
MF09	40000	{1, 0}	Correcta	45060
MF10	50000	{1, 0}	Correcta	50207.5

Tabla 4: Resultados de la detección de fallos por parte del Sistema de Diagnosis.

Como puede verse resumido en la tabla, el sistema es capaz de detectar correctamente todos los fallos, aunque lo hace con un retraso medio de 269.67 segundos, es decir, entre dos y tres periodos de muestro de la simulación de OpenModelica.

El retraso en la detección es bastante aceptable, teniendo en cuenta que el método estadístico utilizado para realizarla, denominado Z-test, necesita distinguir los verdaderos fallos de un posible ruido en la señal.

De entre las posibilidades para acelerar la detección destacan disminuir la confianza (alfa) del test, que hemos fijado en el 95%, y jugar con los intervalos de muestreo, que en este caso son del orden de minutos.

En cuanto al aislamiento, la tabla 5 muestra la comparación entre los candidatos a fallo generados por el Sistema de Diagnosis según la MFFC y el verdadero motivo del fallo. El aislamiento se declara correcto cuando el sistema acierta la causa del fallo, coherente cuando el modo de fallo correcto está entre los candidatos generados, e incorrecto en otro caso.

Modo de Fallo	{PC1, PC2}	Candidatos del SD	Aislamiento
MF01	{+, +}	MF01, MF01b, MF03, MF05b, MF08	Coherente
MF01b	{+, +}	MF01, MF01b, MF08	Coherente
MF02	{-, 0}	MF02, MF03b, MF04, MF09	Coherente
MF02b	{+, 0}	MF02b, MF03, MF04b, MF06, MF10	Coherente
MF03	{+, 0}	MF02b, MF03, MF04b, MF06, MF10	Coherente
MF03b	{-, 0}	MF02, MF03b, MF04, MF09	Coherente
MF04	{-, 0}	MF02, MF03b, MF04, MF09	Coherente
MF04b	{+, 0}	MF02b, MF03, MF04b, MF06, MF10	Coherente
MF05	{-, -}	MF01, MF01b, MF03b, MF05, MF08, MF10	Coherente
MF05b	{+, +}	MF01, MF01b, MF03, MF05b, MF08	Coherente
MF06	{+, 0}	MF02b, MF03, MF04b, MF06, MF10	Coherente
MF07	{0, +}	MF07	Correcto
MF08	{+, +}	MF01, MF01b, MF08	Coherente
MF09	{-, 0}	MF02, MF03b, MF04, MF09	Coherente
MF10	{+, 0}	MF02b, MF03, MF04b, MF06, MF10	Coherente

Tabla 5: Aislamiento de fallos del Sistema de Diagnóstico sobre el AHU-09

La tabla 5 muestra los resultados esperados. No hay aislamientos incorrectos, pero tan sólo el MF07 (fallo en el sensor de la humedad) es localizado de forma precisa. Todos los demás generan una serie de posibles candidatos entre los que no es posible diferenciar.

Así, por ejemplo, un fallo de bloqueo en la válvula del precalentador es indistinguible de uno en la válvula del calentador, o de una fuga en la del módulo enfriador. Tampoco se diferencia de un fallo en la efectividad de los calentadores.

El motivo es, como suponíamos al encontrar los PCs, la localización de los sensores, que dejan a todo el sistema como una gran caja negra.

El siguiente paso podría ir encaminado en este sentido, mejorar el aislamiento y realizar identificación de los fallos, mediante la adición de conocimiento experto de los mismos.

Por ejemplo, el MF05b (fuga en el módulo de humidificación) es muy característico, ya que es el único que aumenta muy poco la temperatura y mucho la humedad específica. Los otros elementos de su conjunto de candidatos son diferenciables, ya que el MF03 evita la reducción de la humedad específica (pero no la eleva realmente) y los MF01, MF01b y MF08 son dependientes de las masas de aire de entrada. De hecho, si nos fijamos de nuevo en la tabla 5, podría formarse una clase de equivalencia con estos tres Modos de Fallo, ya que siempre aparecen siempre juntos en los conjuntos de candidatos y son indistinguibles.

Capítulo 7:

Conclusiones

7.- Conclusiones

Como principales conclusiones del trabajo, es necesario contrastar los objetivos del trabajo con los resultados obtenidos.

Se ha realizado un Diagnóstico Basado en Consistencia de los modos de fallo del sistema AHU-09 de manera exitosa. Se han analizado los modelos en busca de potenciales fallos, además de los proporcionados por el equipo de modelado, logrando detectar todos y cada uno de los modos, y aislando los mismos en base a las posibilidades que ofrece el modelo original.

Para ello, la aplicación de la técnica de Posibles Conflictos ha sido clave, suponiendo además gran parte del grueso del trabajo. Dicha tarea ha resultado especialmente difícil, dada mi formación en la que no había estudiado lenguajes de simulación ni modelado de sistemas físicos complejos multidominio. Deja sin embargo un sabor agri dulce el hecho de que, debido a un malentendido con la información disponible sobre el sistema en cuanto a los sensores con los que contaba el modelo, los resultados no hayan sido los ideales. Quizá incluso se habría replanteado el objeto del TFM.

De hecho, puede observarse que las diferencias entre ambos Posibles Conflictos estriban solamente en el módulo humidificador y en las ecuaciones del aire de salida del aparato. Este hecho, junto con el reducido número de PCs generados y la complejidad del sistema hacen que el aislamiento ofrezca unos resultados poco específicos, aunque esperados al usar sólo modos de funcionamiento correcto y tener tan pocos sensores de salida. No es quizá el mejor sistema para mostrar las bondades de la técnica de Posibles Conflictos.

Por otra parte, el trabajo ha supuesto mi primera aproximación seria al ámbito de la investigación, que no puedo dejar de describir como satisfactoria.

En cuanto al grado de cumplimiento con las restricciones temporales, he aprendido mucho sobre las diferencias de los trabajos de investigación con respecto a los proyectos software a los que estaba acostumbrado.

En ese sentido, la fase preliminar de familiarización con el entorno y el ámbito de aplicación se ha alargado más de lo previsto, ya que se trata de un dominio complejo con muchas variables a tener en cuenta. Sin embargo, es indudable que la cantidad y la calidad de la documentación que se ha producido disminuirán notablemente el tiempo de adaptación al dominio en futuros trabajos.

Por último, estar en contacto con el ambiente de investigación y colaborar con colegas de otras universidades y países ha supuesto para mí descubrir un nuevo campo al que nunca pensé que podría dedicarme. En adelante, consideraré las ofertas con una renovada amplitud de miras.

7.3.- Posibles líneas de trabajo futuras

Con el objetivo de reducir la carga de trabajo que supone buscar manualmente los Posibles Conflictos, se podría pensar en desarrollar un intérprete para traducir los modelos desarrollados en Modelica a una sintaxis legible por las herramientas de cálculo automático desarrolladas en la Universidad. Así se podría combinar la versatilidad y el gran número de bibliotecas disponibles para OpenModelica con el poder de cómputo de estas aplicaciones.

Además, dado que la aplicación software desarrollada para el cálculo de los residuos y detección de discrepancias es una versión temprana, podría ampliarse para incluir varios tipos de elaboración de umbrales, cálculo de varios residuos a la vez, etc. De esa manera podría conseguirse que fuese útil en tareas de diagnóstico online, así como su integración con las técnicas de diagnóstico basadas en PCs ya desarrolladas.

Por último, y en línea con lo comentado en el capítulo de resultados, sería conveniente estudiar la inclusión de conocimiento experto para mejorar el aislamiento y realizar identificación de fallos, si se va a continuar con el estudio del modelo utilizado.

Lista de términos

A continuación se detalla una relación de palabras y acrónimos que puedan resultar poco conocidos o de difícil interpretación

- **AHU (Air Handling Unit):** Se trata de un acrónimo genérico en inglés que denota a todos los tipos de sistemas de tratamiento de aire.
- **CC (Cooling Coil):** Es la bobina de enfriamiento, el tercer componente en orden de secuencia del sistema objeto de estudio.
- **COV (Compuestos Orgánicos Volátiles):** Son sustancias químicas que contienen carbono y se encuentran en todos los elementos vivos. Además, se convierten fácilmente en gases y pueden ser peligrosos para la salud.
- **DBC (Diagnóstico Basado en Consistencia):** Es una aproximación al DBM que redefine el concepto de sistema como un conjunto de sentencias de primer orden, y busca inconsistencias entre las diferentes ecuaciones.
- **DBM (Diagnóstico Basado en Modelos):** Se trata de un paradigma de diagnóstico de sistemas que sigue los principios de RBM.
- **GSI (Grupo de Sistemas Inteligentes):** Es el GIR de la Universidad de Valladolid en el seno del cual se ha desarrollado este trabajo.
- **H (Humidifier):** Se denota así al quinto componente principal del sistema AHU-09, encargado de la humidificación del aire.
- **HC (Heating Coil):** La bobina calentadora es el cuarto elemento en la secuencia de paso del aire circulante por el sistema objeto de estudio. Se encarga de calentar el aire.
- **HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning):** Es un acrónimo muy común para denominar a todo tipo de sistemas de climatización, ventilación y calefacción.
- **MB (Mixing Box):** También llamado módulo mezclador, es el primer componente en la secuencia de paso del aire circulante por el sistema AHU-09. Su cometido es mezclar el aire reciclado y el exterior.
- **MF (Modo de Fallo):** Es una modificación sobre un modelo nominal de un sistema para representar fielmente el efecto de un fallo en el sistema físico real.
- **MFFC (Matriz de Firmas de Falos Cualitativa):** Es una evolución de la MTF que incorpora celdas ternarias, las cuales informan de cómo afecta cada fallo a los residuos de los PCs (1 ó -1, en caso de hacerlo, y 0 en caso contrario).
- **MTFF (Matriz Teórica de Firmas de Fallo):** Se trata de una tabla binaria que enfrenta los residuos de los Posibles Conflictos con los Modos de Fallo encontrados. Cada celda toma el valor 1 en caso de que el fallo correspondiente active el residuo.
- **NTU (Number of Transfer Units):** Es una medida adimensional del número unidades de calor que gana o pierde un fluido al atravesar un intercambiador de calor.
- **NTU-eff:** Se trata de un método de cálculo de la tasa de transferencia de calor. Se utiliza cuando no hay información suficiente sobre la diferencia de temperaturas a la entrada y la salida de los intercambiadores de calor.
- **OSMC:** Es una organización no gubernamental y sin ánimo de lucro cuyo objetivo es el desarrollo y promoción de uso del lenguaje de modelado Modelica y de las herramientas y bibliotecas open-source asociadas al entorno OpenModelica.
- **PC (Posible Conflicto):** El acrónimo puede hacer referencia a dos términos:
 - Un sistema de ecuaciones sobredeterminado y con redundancia analítica mínima.

- Técnica de compilación estructural que facilita la Diagnósis Basada en Consistencia en sistemas dinámicos mediante los conjuntos de ecuaciones antes mencionados.
- **pre_HC (Preheating Coil):** Se trata de la bobina de precalentamiento, el segundo componente en el orden de secuencia del AHU-09.
- **RBM (Razonamiento basado en Modelos):** Es un proceso de inferencia que utiliza modelos abstractos de la realidad de un sistema físico.
- **TFM (Trabajo de Fin de Máster):** Se refiere a la presente investigación y toda la documentación anexa.

Capítulo 8:

Referencias

Referencias

- **[Bregón, 2007]** A. Bregón. “Propuesta de Integración de Técnicas FDI en el Diagnóstico Basado en Consistencia con Posibles Conflictos”. Trabajo de Investigación Tutelado. Doctorado en Informática. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Valladolid, Año 2007.
- **[Campos, 2010]** F. Campos. “Sistemas Constructivos. Aspectos físicos de la construcción – 02 Factores de confort. Conceptos térmicos aplicables”. Año 2010 <http://es.slideshare.net/franarq82/clase-02-unidad-i-confort-higrotermico> (Última Visita: 2/9/2015).
- **[Ceballos, 2005]** R. Ceballos. “Técnicas automáticas para la diagnosis de errores en software diseñado por contrato”. Memoria de Proyecto de Investigación. Universidad de Sevilla. Año 2005.
- **[Devatec, 2015]** “Teoría sobre humidificación | Devatec”. Sitio Web de la empresa Devatec con información y conceptos sobre humidificación. Incluye diagramas psicrométricos explicados. <http://www.devatec.com/es/teoria-humidificacion> (Última Visita: 2/9/2015).
- **[EMWiNS, 2012]** “Emwins – Energy-Monitoring Wireless Networked System”. Página Web del proyecto EMWiNS, en la que se describen los objetivos del mismo y se enlaza a los diferentes proyectos. http://www.aws.cit.ie/emwins/?page_id=22 (Última Visita: 15/7/2015).
- **[Fernández-Díez, 1996]** P. Fernández-Díez. “Termodinámica técnica”. PDF de la Web personal del profesor Pedro Fernández Díez. <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=2> (Última Visita: 2/9/2015).
- **[Fracacci & cols, 2012]** A. Fracacci, J. Febres, G. Provan, R. Sterling & P. Struss. “EMWiNS – AHU Model”. En EMWiNS. Año 2012.
- **[FSEC, 2015]** Florida Solar Energy Center “HVAC Systems”. Espacio Web del centro de investigación en energía solar de Florida. <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/buildings/commercial/hvac.htm> (Última Visita: 15/07/2015).
- **[Hernández, 2013]** A. Hernández. “Diagnosis de fallos de un sistema de climatización”. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Valladolid, Año 2013.
- **[Modelica, 2000]** Modelica “ModelicaTM – A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling, Versión 1.4”. Espacio web Modelica destinado a la formación básica de los usuarios en el lenguaje de programación Modelica. <https://modelica.org/documents/ModelicaTutorial14.pdf> (Última Visita: 2/9/2012).
- **[Moya, 2010]** N. Moya. “Factorización de Redes Bayesianas Dinámicas mediante Posibles Conflictos y propuesta de aplicación a la Diagnosis Basada en Consistencia”. Trabajo de Investigación Tutelado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Valladolid, Año 2010.
- **[NTU, 2015]** “NTU Method – Wikipedia, the Free Encyclopedia”. Página de Wikipedia dedicada al método clásico NTU-eff de cálculo de la transferencia de calor en intercambiadores de calor. https://en.wikipedia.org/wiki/NTU_method (Última Visita: 2/9/2015).
- **[OpenModelica, 2015]** OpenModelica “User Documentation”. Espacio web OpenModelica destinado a la formación básica de los usuarios en el manejo de la herramienta OpenModelica y el desarrollo de modelos de sistemas y bibliotecas de

componentes. <https://modelica.org/documents/ModelicaTutorial14.pdf> (Última Visita: 2/7/2015).

- **[Pulido & cols, 2001]** B. Pulido, C. Alonso, & F. Acebes. "Lessons learned from diagnosing dynamic systems using possible conflicts and quantitative models." Engineering of Intelligent Systems. Springer Berlin Heidelberg, 135-144. Año 2001.
- **[Pulido & Alonso-González, 2004]** B. Pulido & C. Alonso-González. "Possible conflicts: a compilation technique for consistency-based diagnosis". En Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 34(5):2192–2206, Oct. 2004.
- **[Pulido & Alonso-González & Bregón, 2014]** B. Pulido, C. Alonso-González & A. Bregón. "DXPCS: A software tool for consistency-based diagnosis of dynamic systems using Possible Conflicts". En DX'14, The 25th DX Workshop. Año 2014.
- **[Sterling & Provan, 2014]** R. Sterling, G. Provan & cols. "Model-based fault detection and diagnosis of air handling units: A comparison of methodologies." Energy Procedia 62 (2014): 686-693. 6th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-14. Año 2014.
- **[Sterling & Struss, 2014]** R. Sterling, P. Struss & cols. "From Modelica Models to Fault Diagnosis in Air Handling Units." 10th International Modelica Conference. Año 2014.
- **[Struss & Sterling, 2014]** P. Struss & R. Sterling & cols. "Diagnosis of Air Handling Units Based on Engineering and Qualitative Models". En DX'14, The 25th DX Workshop. Año 2014.

Apéndices

Apéndice A: Código del AHU-09

Contactar con Belarmino Pulido (belar@infor.uva.es) o Carlos Alonso (calonso@infor.uva.es) para más información sobre esta sección.

Apéndice B: Herramienta de cálculo de residuos y detección de fallos

El siguiente apartado describe la aplicación Java construida para calcular de manera automática los residuos de las simulaciones generadas con OpenModelica y los experimentos cedidos por el equipo creador del modelo, y detectar las discrepancias de los mismos.

Requisitos

Dado que se trata de una aplicación muy sencilla, los requisitos no son muy numerosos

- El sistema debe ser capaz de calcular las diferencias entre dos conjuntos de valores en notación de doble precisión.
- El sistema debe poder leer los valores de archivos externos en formato .csv.
- El sistema debe ofrecer una interfaz sencilla para que cualquier usuario, no necesariamente con conocimientos informáticos, pueda manejarla.
- El sistema debe ofrecer una gráfica con el resultado obtenido.
- El sistema debe mostrar los resultados en la interfaz de la aplicación y almacenarlos en un archivo externo .csv para su posterior estudio.

Casos de Uso

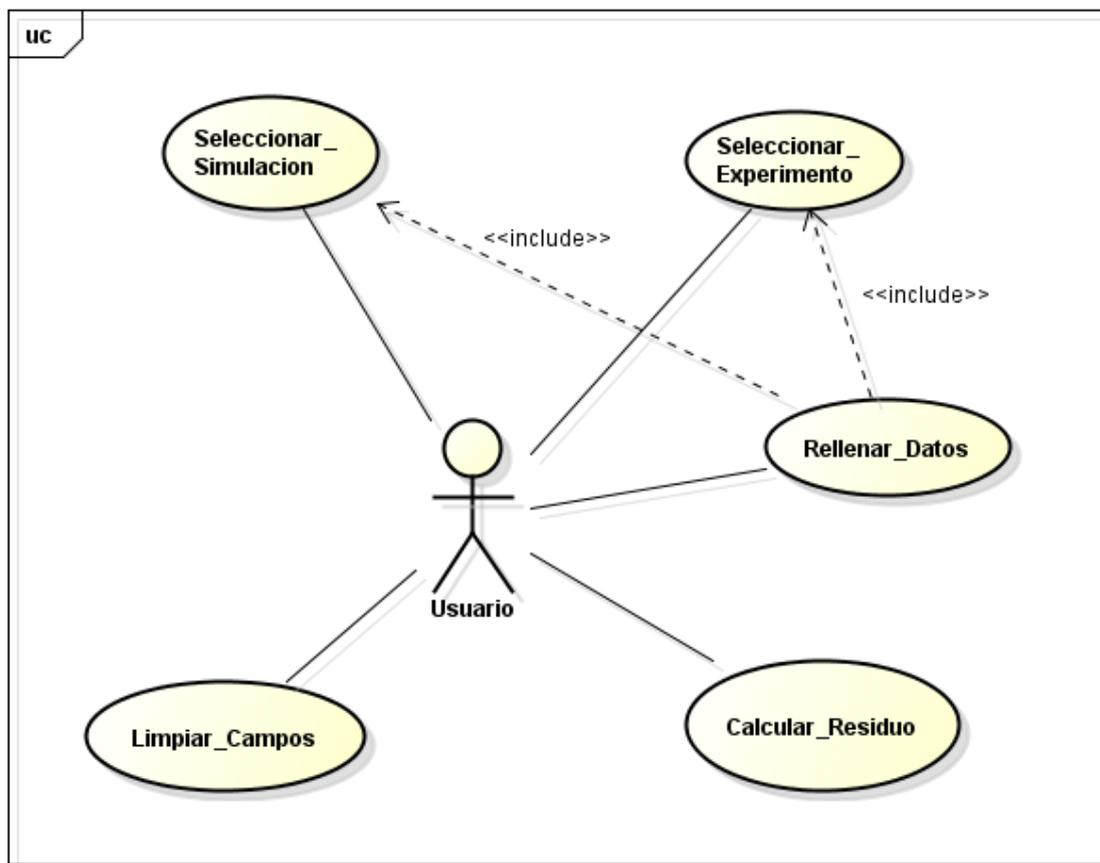


Figura 90: Diagrama de Casos de Uso de la aplicación de cálculo de residuos y detección de fallos

El sistema cuenta con 5 Casos de Uso principales:

- **Seleccionar_Simulacion:** El usuario selecciona la opción de búsqueda de ficheros .csv de resultados de simulaciones en OpenModelica. El sistema muestra un diálogo donde se pueden buscar en el sistema los archivos deseados.
- **Seleccionar_Experimento:** El usuario selecciona la opción de búsqueda de ficheros .csv de resultados de experimentos reales. El sistema muestra un diálogo donde se pueden buscar en el sistema los archivos deseados.
- **Rellenar_Datos:** El usuario introduce toda la información necesaria para realizar el cálculo de los residuos y la detección de fallos. Incluye los Casos de Uso “Seleccionar Simulación y Seleccionar Experimento.
- **Limpiar_Campos:** El usuario decide eliminar toda la información antes mencionada con una sola acción. El sistema restaura todos los campos a los valores por defecto.
- **Calcular_Residuo:** El usuario selecciona la opción de cálculo de residuos, una vez ha introducido toda la información necesaria. El sistema calcula la diferencia entre ambos conjuntos de valores y muestra en el campo de resultados si ha encontrado o no alguna discrepancia. En caso afirmativo, indica también el instante y el tipo de detección.

Diagrama de Clases

El modelo de dominio queda representado con el siguiente diagrama de clases:

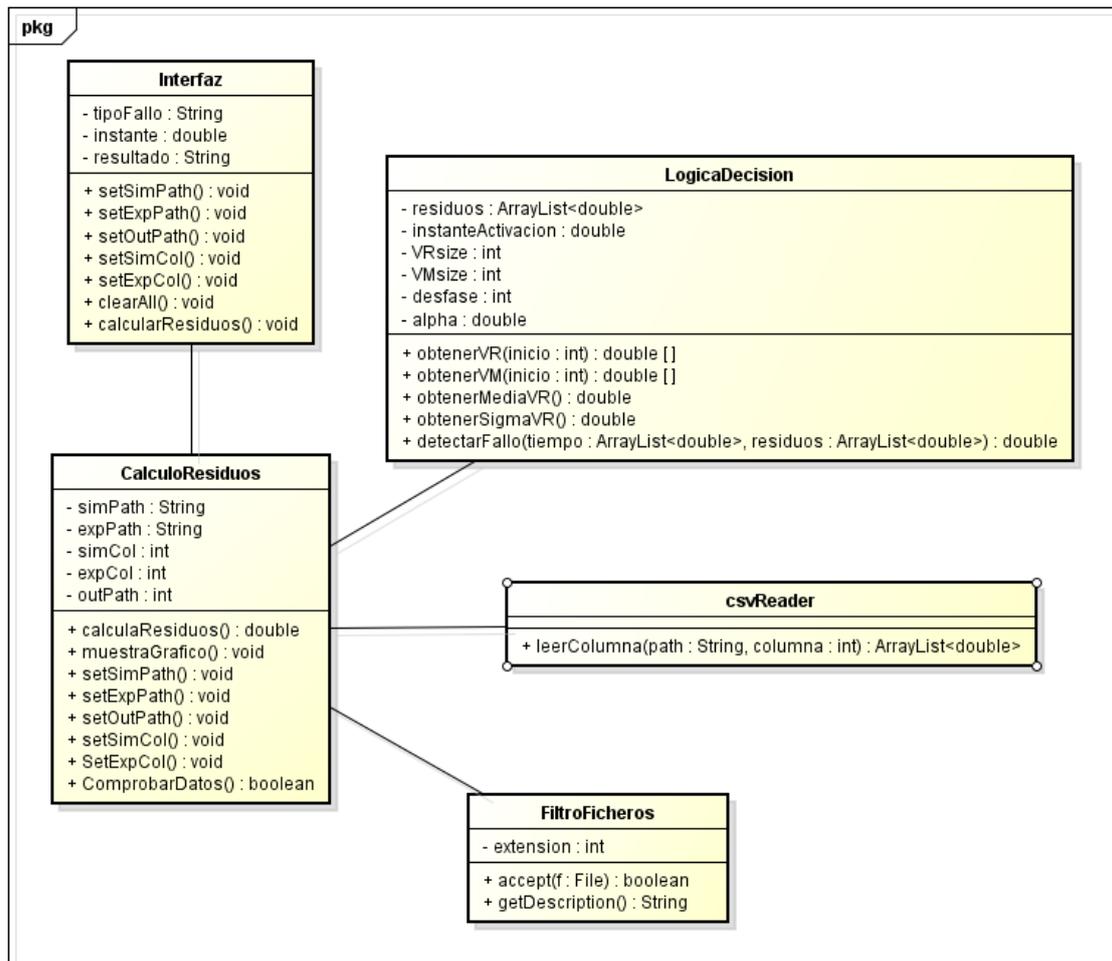


Figura 91: Diagrama de Clases de la aplicación de cálculo de residuos y detección de fallos

Clases de apoyo:

- CsvReader: Es la clase encargada de leer los ficheros .csv de entrada y extraer los datos de las columnas requeridas.
- FiltroFicheros: Muestra un diálogo de selección de archivos en el que sólo aparecen los que tengan la extensión adecuada (que recibe como parámetro).

Clase de interfaz con el usuario:

- Interfaz: Muestra la ventana principal, sobre la que actúa el usuario. Se encarga de transmitir a la clase principal las peticiones del mismo y mostrar el resultado de los cálculos.

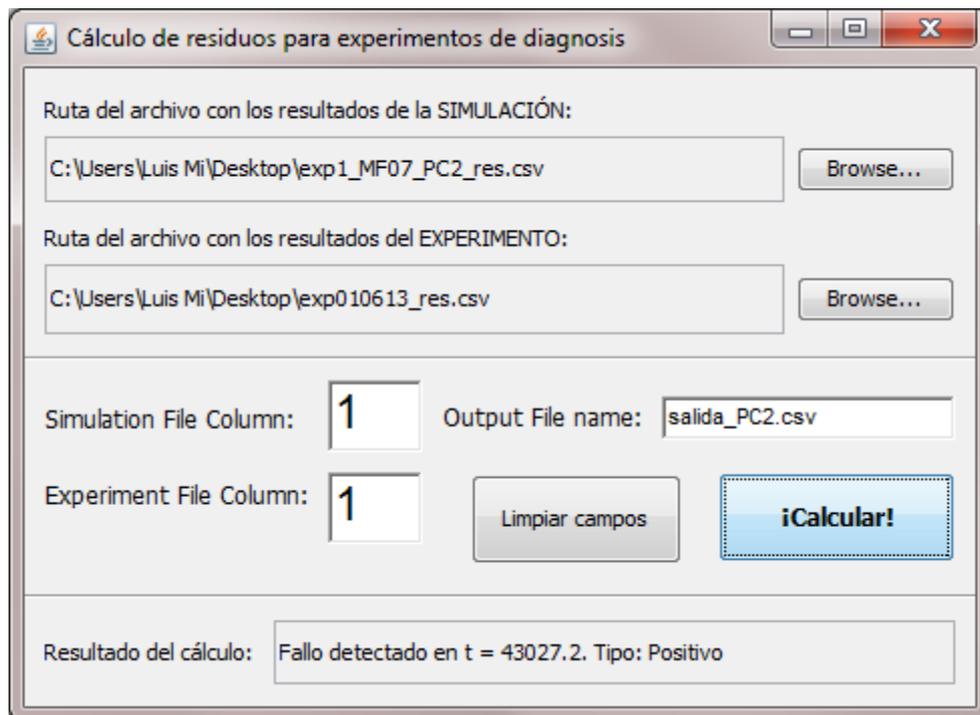


Figura 92: Interfaz gráfica de la aplicación de cálculo de residuos y detección de fallos

Clases principales:

- LogicaDecision: Se ocupa de la detección de fallos, dado el residuo de las señales de simulación y del experimento. Realiza test estadístico denominado Z-test, para lo que se apoya en la biblioteca externa `jsc.onesample.Ztest`.
- CalculoResiduos: Actúa como control de toda la aplicación, realizando llamadas al resto de clases cuando es necesario, y además se encarga del cálculo del residuo.

Nota: La última versión de la aplicación puede encontrarse junto con el código fuente en la documentación adjunta al TFM.

Diagramas de Secuencia

A continuación se representan los Diagramas de Secuencia más importantes.

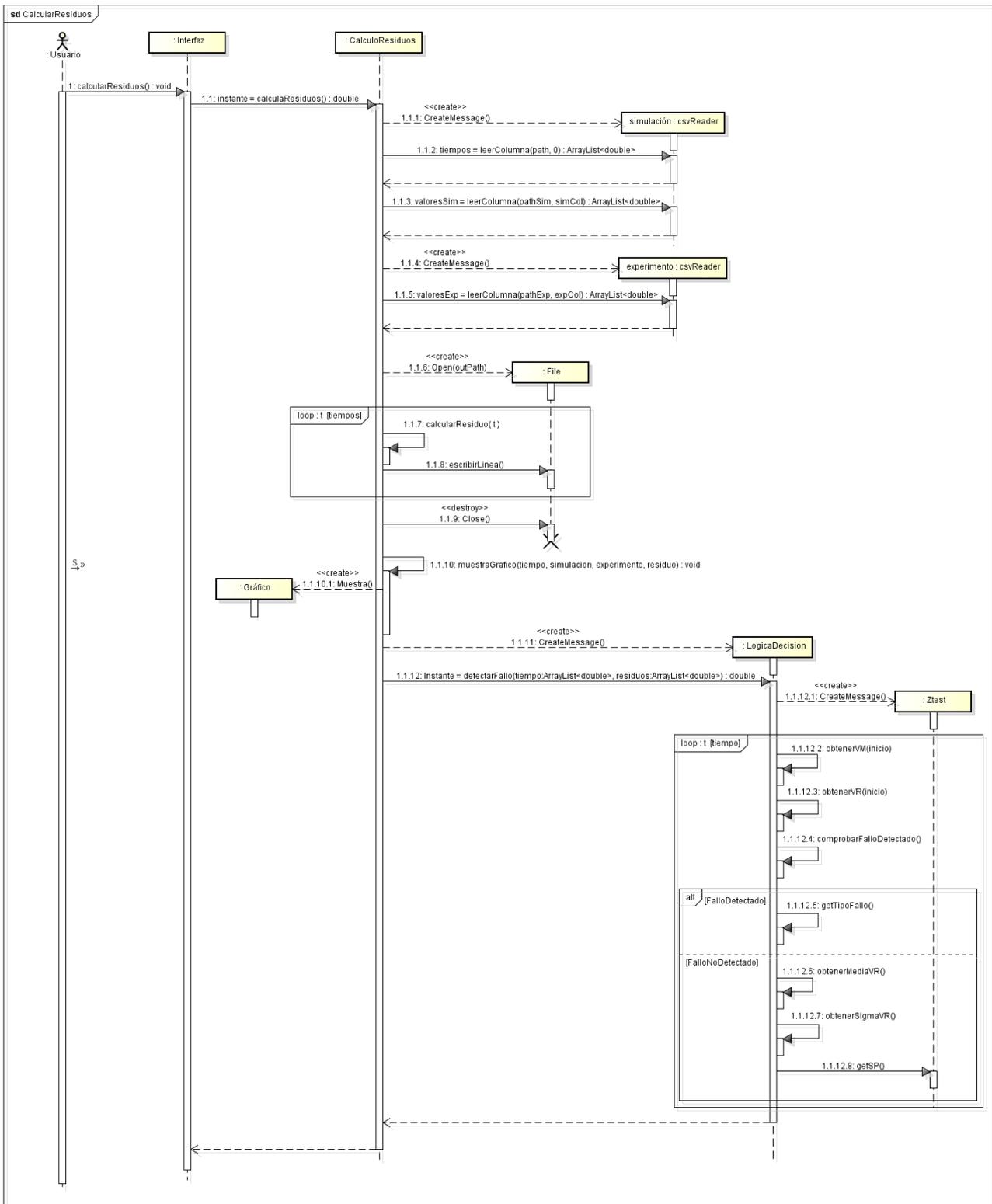


Figura 93: Diagrama de secuencia: CalcularResiduos

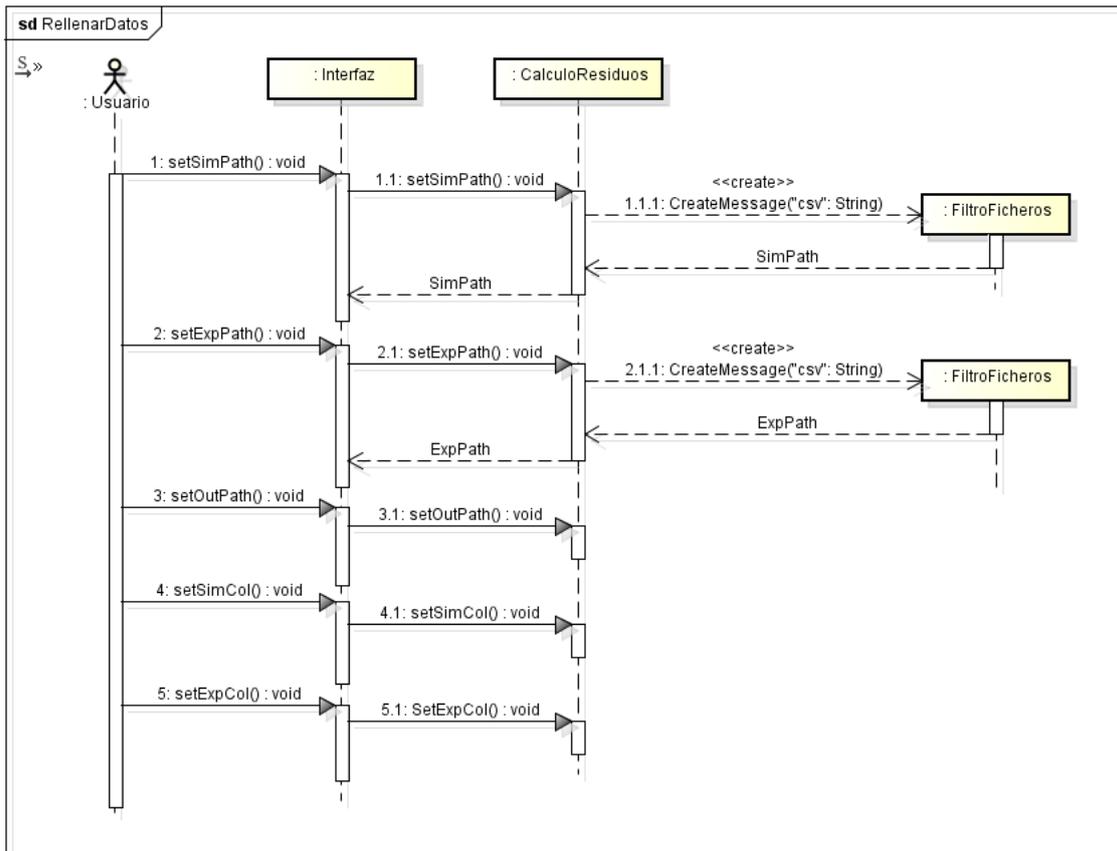


Figura 94: Diagrama de secuencia: RellenarCampos

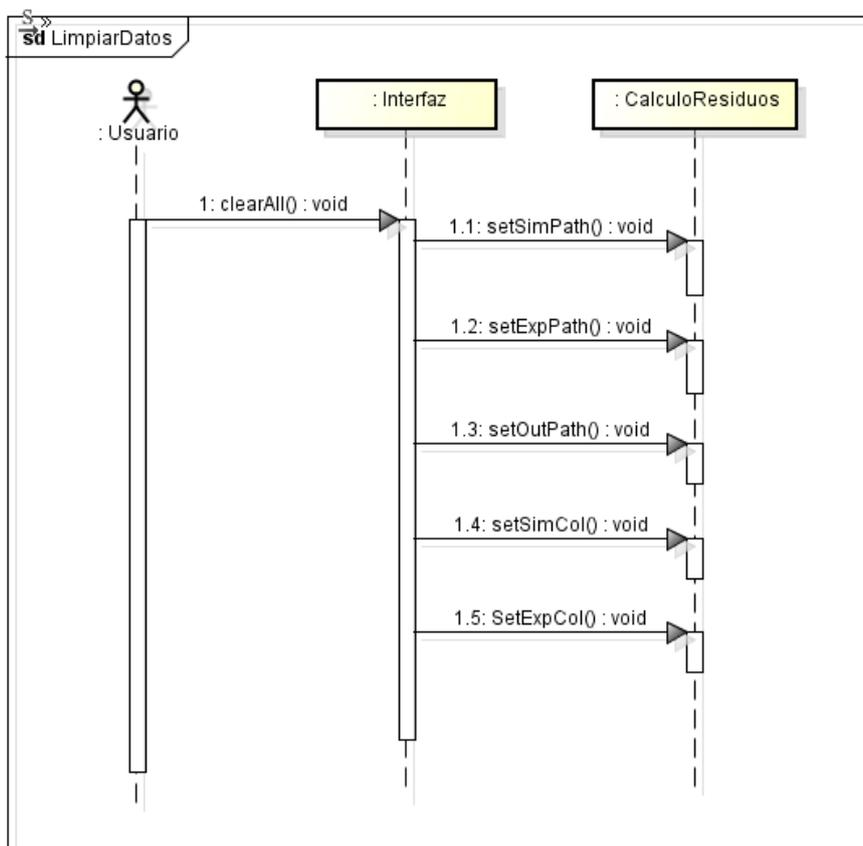


Figura 95: Diagrama de secuencia: LimpiarDatos