



Universidad
de La Laguna

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Civil e Industrial

Trabajo final de grado

Análisis, diseño e implementación de un sistema de control para
mejorar el rendimiento de una colmena

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Alumno: César Pérez Méndez
Tutor: Marta Sigut Saavedra

Junio - 2014

Índice general:

Resumen	3
Memoria	5
Resultados obtenidos.....	43
Conclusiones.....	93
Bibliografía.....	96
Planos	98
Presupuesto.....	109
Anexo	113

Resumen

César Pérez Méndez

23-06-2014

Resumen:

En el presente trabajo de fin de grado se ha diseñado e implementado un sistema de control mediante una placa Arduino. Así, a partir de ciertos parámetros atmosféricos, concretamente la temperatura y humedad relativa tanto en el interior como en el exterior de la colmena, se actúa sobre dos sistemas distintos. Uno de ellos es un sistema de calentamiento consistente en una resistencia calefactora. El otro es un sistema de enfriamiento basado en un caballete de ventilación. El objetivo final de ambos sistemas es que el valor de la temperatura en el interior de la colmena esté tan próximo a los 35°C como sea posible, manteniendo los valores de humedad relativa tan bajos como se pueda. Estas son las condiciones que maximizan el rendimiento de la colmena.

Para la realización del sistema de control que se acaba de describir brevemente ha sido necesario realizar una serie de pruebas experimentales con el fin de ajustar ciertos parámetros de control y verificar el correcto funcionamiento del sistema diseñado. Este último punto cobra especial relevancia en este caso, ya que el sistema de control va a ser implantado en un ecosistema y, por tanto, debe presentar una fiabilidad elevada.

Summary:

In this work, a control system based on an Arduino board has been designed and implemented. Thus, two different systems are operated using the data corresponding to certain atmospheric parameters, more concretely temperature and relative humidity both inside and outside the hive. One of these systems is a heating one consisting of a heating resistor. The other one is a cooling system based on a ventilation ridge. The final objective of both systems is that the value of the temperature inside the hive is as near as 35 degrees as possible, keeping the values of relative humidity as low as possible. This is due to the fact that these are the conditions that maximize the performance of the hive.

To carry out the control system that has just been briefly described it has been necessary to perform a series of experimental tests in order to adjust certain control parameters and verify the correct operation of the system designed. This last aspect is particularly relevant in this case because the control system will be implemented in an ecosystem and, therefore, must have a high reliability.

Memoria

César Pérez Méndez

23-06-2014

Índice:

1. Introducción General:	2
2. Objetivos del trabajo de fin de grado:.....	3
3. Justificación del trabajo de fin de grado:	6
3.1. Problema 1: Condiciones ambientales en invierno:.....	6
3.1.1. Solución propuesta al problema 1:	6
3.2. Problema 2: Condiciones ambientales en épocas cálidas:	7
3.2.1. Solución a un exceso de temperatura moderado:	7
3.2.2. Solución a días muy calurosos:	7
4. Variables del sistema y sensores utilizados:	9
4.1. Temperatura y humedad relativa:	9
4.2. Fecha:	11
4.3. Apertura del caballete de ventilación:.....	13
4.4. Memoria:	15
5. Sistema de actuación:.....	16
5.1. Función de calefacción:.....	16
5.2. Función de refrigeración:	18
6. Sistema de control:.....	22
6.1. Equipo de control:.....	22
6.2. Procedimientos de control:.....	25
6.2.1. Control todo o nada:	25
6.2.2. Control PID:	26
6.2.3. Comparación entre el control todo o nada y el control PID.....	29
6.2.4. PI implementado:.....	29
7. Condiciones de control:	31
7.1. Sistema de calefacción:	31
7.2. Sistema de refrigeración:.....	34
7.2.1. Exceso de temperatura generado de forma natural:.....	34
7.2.2. Exceso de temperatura generado por la actuación del sistema:	34
7.3. Resumen del capítulo:.....	35
8. Mantenimiento:.....	36

1. Introducción General:

La apicultura representa una actividad agraria de gran tradición e importancia en las islas Canarias, destacando especialmente la isla de Tenerife. La obtención de miel y cera ha sido actividad frecuente desde el primer momento de la colonización española, debido en gran parte a la gran cantidad de enjambres silvestres que había.

La miel de Tenerife, producida a partir del néctar de las flores que crecen en los distintos ecosistemas de la isla, tiene denominación de origen protegida. Ésta se caracteriza por una gran variabilidad de sabores y colores, debido a la variabilidad de ecosistemas y flora con los que cuenta la isla. Además, la miel puede ser monofloral (retama, brezal, castaño, hinojo,...) o multifloral (costa, cumbre y monte).

Los productos más utilizados que producen las colmenas son la miel y la cera. Sin embargo, existen otros que también tienen su importancia en la sociedad de hoy en día. Éstos son el propóleo (utilizado tanto en la industria farmacéutica como en la cosmética), la apitoxina o veneno de abeja (utilizado en Apiterapia), la jalea real y el polen.

Otro de los efectos beneficiosos de las abejas para el ser humano y el medio ambiente es su influencia en la polinización. Sin embargo, desde hace años las poblaciones de abejas salvajes y domésticas están en declive, ya sea por el uso de venenos, enfermedades, parásitos, el cambio climático,...

En este Trabajo de Fin de Grado se va a tratar de estudiar, diseñar e implementar un sistema de control que mantenga los parámetros climáticos óptimos en el interior de una colmena, para así mejorar tanto la salud como la productividad de ésta.

2. Objetivos del trabajo de fin de grado:

El objetivo del presente proyecto es estudiar, diseñar e implementar un sistema de control que permita mantener tanto la temperatura como la humedad relativa en el interior de la colmena en unos valores tan próximos a los de consigna como sea posible. De estas dos variables, la más restrictiva es la temperatura en la cámara de cría, ya que si no está en el rango de 34.5 a 35.5°C, las crías podrían morir.

La idea es que el sistema diseñado opere de forma automática, de forma que sólo sea necesaria la presencia de una persona a la hora de la puesta en marcha o para la modificación de parámetros internos del sistema.

Una colmena es el hábitat donde vive una colonia de abejas, y se clasifican según su naturaleza en rústicas (naturales) o racionales (construidas por el hombre para optimizar la producción de miel y dar las mejores condiciones posibles a las abejas). Dentro de las rústicas, las colmenas se pueden desarrollar de forma horizontal o vertical.

En este Trabajo de Fin de Grado, se va a trabajar sobre una colmena racional vertical de tipo Langstroth. Dichas colmenas están compuestas por los elementos definidos a continuación y que se pueden ver en la figura 1:

- Suelo de colmena.
- Biquera: es la abertura por donde entran y salen las abejas de la colmena.
- Tabla de vuelo: es una superficie en el exterior de la biquera que sirve para que las abejas se apoyen en ella al llegar a la colmena o salir de ésta, evitando así aglomeraciones en la biquera.
- Cámara de cría: es la zona de la colmena donde las abejas ubican en los panales o cuadros las crías y las reservas necesarias para alimentarlas.
- Alzas: es la zona de la colmena donde las abejas almacenan la miel en los cuadros. La cantidad de alzas varía a criterio del apicultor según la época del año. En nuestro caso particular tenemos que en diciembre había un alza, mientras que en abril había dos.
- Entretapa (Techo): se sitúa en el techo de la última alza y su función es que las abejas no salgan por el techo y que se mantengan estables ciertos parámetros interiores, como pueden ser la temperatura y la humedad.
- Tapa: es una tapa metálica que se sitúa encima de la entretapa y cuya función es evitar que se filtre agua por el techo.

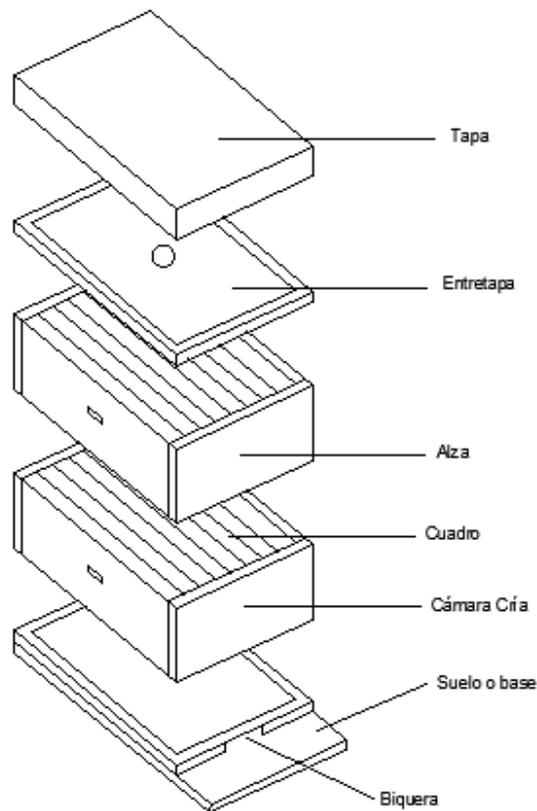


Figura 1. Colmena de tipo Langstroth.

Las variables que necesitamos para la implementación del sistema mencionado son la temperatura y la humedad fuera y dentro de la colmena. Dentro se realizan medidas en 3 posiciones diferentes (biquera, cámara de cría y techo).

La medición de la temperatura y la humedad tanto en el interior como en el exterior de la colmena permite actuar de forma adecuada sobre ésta y mantener estas variables en los valores óptimos, que son:

- Una temperatura en la cámara de cría a 35°C , siendo posibles fluctuaciones de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- Una humedad en el interior lo más baja posible.

Esto tendrá consecuencias beneficiosas desde el punto de vista de la productividad, ya que cuando no se controlan la temperatura y la humedad en la cámara de cría, son las propias abejas las que realizan la regulación de estas variables.

¿Qué ventajas esperamos obtener entonces del sistema que se ha diseñado e implementado?

En primer lugar, una mejora en la salud general de la colmena debido a que nuestro objetivo es que la temperatura se mantenga en el valor de consigna ya mencionado con la tolerancia permitida, siendo la humedad lo más baja posible. Como consecuencia de lo anterior, esperamos un aumento de la productividad debido a que las abejas no tendrán que realizar labores de regulación de la temperatura y la humedad, dejando de consumir recursos para ello y dedicándose a otras tareas, como puede ser la producción de miel.

3. Justificación del trabajo de fin de grado:

Este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado para implementar el sistema diseñado en una finca situada en Icod de los vinos que contiene 30 colmenas. Se va a implementar para resolver los problemas que se explican a continuación. Por tanto, se espera que sus consecuencias sean muy beneficiosas tanto para las colmenas como para el apicultor, y a un precio moderado.

Los dos problemas existentes a resolver por el sistema de control que se describe en este Trabajo de Fin de Grado son:

3.1. Problema 1: Condiciones ambientales en invierno:

El problema más importante es la temperatura y humedad que se alcanzan en dicha finca en invierno. Se han realizado medidas durante varios días que están reflejadas en el capítulo 1 (Medidas realizadas en la colmena de estudio en la finca Boquín) correspondiente al documento Resultados obtenidos, y se puede comprobar que la temperatura mínima medida en el exterior de la colmena es de 9.2°C, producida el día 6 de Enero de 2014 a las 7:28h. En ausencia de un sistema de control de temperatura, la diferencia de temperatura entre dicha temperatura entre estos 9.2°C y la temperatura óptima en la cámara de cría (35°C) la tienen que compensar las abejas. Es una diferencia de temperatura significativa y, por tanto, supone un trabajo enorme para estos insectos. Las consecuencias de dicho trabajo son perjudiciales para la productividad y la salud de la colmena, pudiendo incluso morir.

Además, una elevada humedad puede producir graves enfermedades en la colmena y un aumento del trabajo a realizar por las abejas, debido a que la miel se produce a valores de humedad bajos, y ellas tendrán que eliminar dicho exceso de humedad.

3.1.1. Solución propuesta al problema 1:

El problema que se acaba de describir se resuelve en el sistema diseñado mediante una resistencia calefactora situada debajo de la biquera, como se puede ver en el documento Planos, en los planos número 8 y 9, regulada mediante un control PID implementado en un Arduino.

3.2. Problema 2: Condiciones ambientales en épocas cálidas:

En épocas cálidas, la temperatura en el interior de la colmena puede superar el valor óptimo. Generalmente son las propias abejas las que hacen frente a este sobrecalentamiento, situándose en la biquera y batiendo las alas para producir una corriente de aire que fluya por el interior de la colmena. Si la temperatura es muy elevada, esto puede no ser suficiente y las abejas introducen pequeñas gotas de agua que, al evaporizarse, reducen la temperatura. En estas condiciones, cuando es necesario enfriar la cámara de cría, el sistema diseñado funciona como se explica a continuación:

3.2.1. Solución a un exceso de temperatura moderado:

El problema de un exceso de temperatura moderado se ha resuelto mediante el uso de un “caballete de ventilación”, cuyo funcionamiento se explica más adelante en el apartado 5.2 (Función de refrigeración) del capítulo 5 (Sistema de actuación) correspondiente al presente documento. Dicho caballo se sitúa en el techo de la colmena, como se puede ver en el documento Planos, en los planos 8 y 9. Se trata de un sistema todo o nada que se controla a través del Arduino. En un primer momento se pensó controlar la apertura del caballo con un controlador PID, de forma que éste se abriera más o menos dependiendo de cuánto se debiera reducir la temperatura en el interior de la colmena. Sin embargo, las mediciones realizadas del enfriamiento producido abriendo en diferentes porcentajes el caballo de ventilación reflejadas en el capítulo 2.1 (Prueba 1: Diferentes porcentajes de apertura del caballo de ventilación), en el documento Resultados obtenidos, muestran que lo que realmente nos interesa cuando hay que enfriar el interior de la colmena es abrir el caballo al máximo. De ahí la estrategia de control elegida.

3.2.2. Solución a días muy calurosos:

En las horas centrales de los días muy calurosos es posible que no sea suficiente abrir el caballo de ventilación para reducir la temperatura en el interior de la colmena (con el caballo la temperatura en el interior baja hasta alcanzar la temperatura ambiente) hasta el valor deseado, teniendo entonces que recurrir a otra forma de enfriarla. Imitando la forma en la que las abejas hacen frente a este problema, la solución propuesta se basa en humidificar el interior de la colmena.

Esta solución es conocida como refrigeración evaporativa, y basa su funcionamiento en la evaporación del agua, la cual al cambiar de estado (líquido a gas) consume una gran cantidad de energía (la energía la cede el aire del entorno), provocando el descenso de temperatura deseado. Dicho descenso de temperatura es proporcional a la cantidad de agua evaporada. Las aplicaciones de la refrigeración evaporativa para lograr enfriamiento son numerosas. El botijo, la sudoración, la sensación de fresco en la orilla del mar,... son ejemplos de ella. En este Trabajo de Fin de Grado, dicho sistema no ha sido implementado debido a falta de tiempo y a que produce un aumento significativo en la humedad de la colmena, generando un efecto más nocivo que beneficioso sobre la salud de la misma. Por ello, su uso se debe limitar a casos extremos. En cambio, sí se han obtenido datos del enfriamiento producido humidificando manualmente el interior de la colmena a intervalos regulares de tiempo, tal y como se refleja en el apartado 2.3 (Prueba3: Pulverización) del capítulo Resultados obtenidos, en concreto en las figuras 45 y 46 de dicho capítulo.

Los principales beneficios de la refrigeración evaporativa son:

- Importante ahorro energético, debido a que sólo consume energía en el momento de la pulverización.
- Bajo costo de instalación y mantenimiento en comparación con otros sistemas con la misma función.
- Introducción de un sistema de refrigeración en una colmena que no altera excesivamente las condiciones de vida de las abejas. Esto se logra gracias a que es el mismo procedimiento que ellas realizan para reducir la temperatura, variando únicamente que con el sistema implementado se lleva a cabo de forma automática.

4. Variables del sistema y sensores utilizados:

Con objeto de llevar a cabo el control del sistema, las variables a medir son la temperatura y la humedad relativa tanto en el exterior como en el interior de la colmena, y el porcentaje de apertura del caballete de ventilación. También se registra la fecha y hora en la que se realizan las mediciones. A continuación, se explica cómo se llevan a cabo dichas mediciones:

4.1. Temperatura y humedad relativa:

La toma de datos de la temperatura y la humedad relativa ha sido realizada empleando cuatro sensores DTH21/AM2301 (figura 2). Se dispone de uno en el exterior de la colmena, a una altura similar a la entretapa; y de tres en el interior. En concreto, en la biquera, en la cámara de cría y en el techo. Dicha disposición se puede observar en el documento planos, en los planos número 5 y 6. Los sensores DTH21/AM2301 poseen 3 pines cuyas funciones son:

- Tierra (Cable negro)
- Alimentación (Cable rojo)
- Datos (Cable amarillo). Se conecta a un pin digital del Arduino.



Figura 2. Sensor DHT21/AM2301.

En la figura 3, se muestra la conexión a realizar entre los sensores DHT21 y un Arduino ATmega2560 R3.

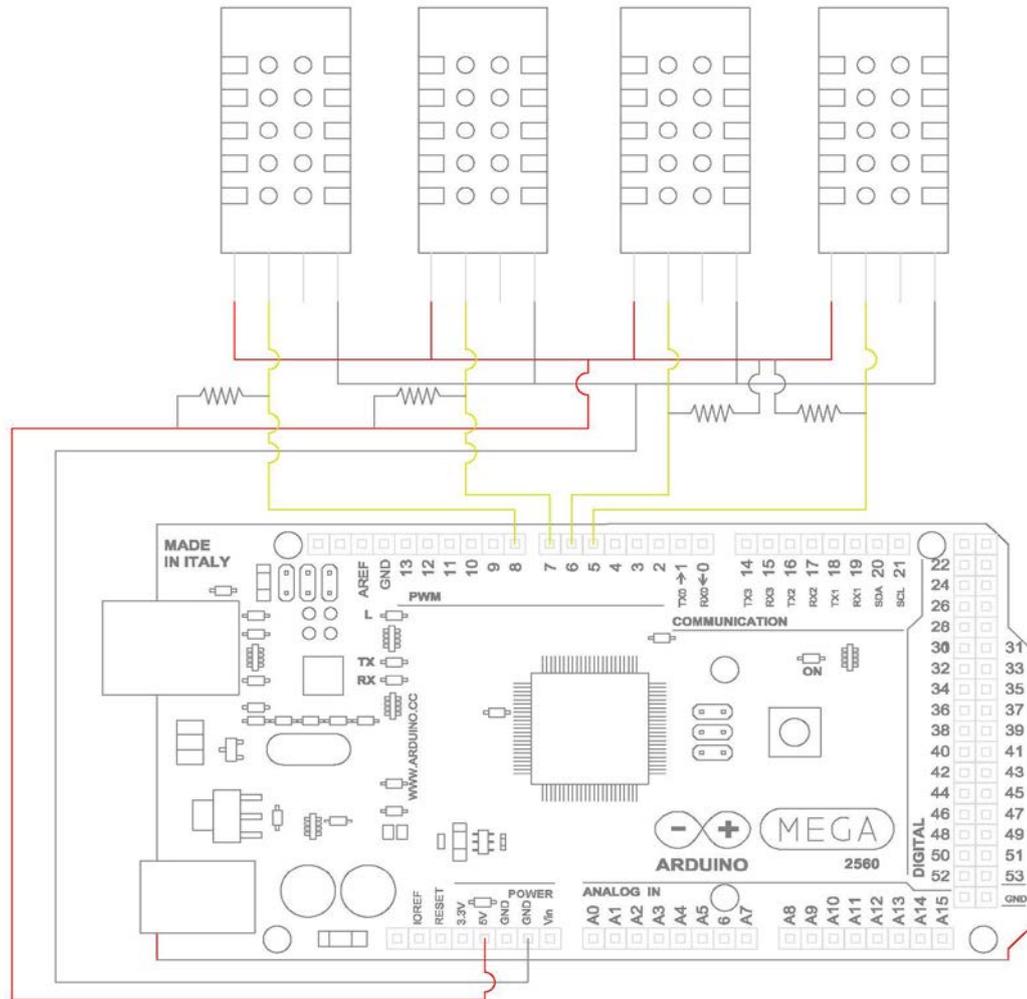


Figura 3. Conexión entre el sensor DHT21/AM2301 y la placa Arduino.

Las características técnicas de este sensor son las siguientes:

- La tensión de alimentación debe estar en el rango 3.3 - 5 VDC.
- Los datos se transmiten al Arduino a través de una transmisión digital codificada en ASCII.
- Resolución de un decimal (0.1).
- Tiene un rango de trabajo de 0 a 100% de humedad relativa.
- Tiene un rango de trabajo de - 40 a 80°C de temperatura.
- La precisión en la medida de la humedad relativa es de $\pm 3\%$.
- La precisión en la medida de la temperatura es de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.
- Hay que conectar una resistencia de 10K Ω entre el pin VCC y el pin de datos.

4.2. Fecha:

Para obtener la fecha, se emplea un reloj DS1307 (figura 4). Una vez configurado el reloj y la librería de éste en el Arduino, se obtiene el año, mes, día, hora, minuto y segundo en el que se realiza la medición.

Los pines son los siguientes:

- VCC : Alimentación
- GND: Tierra
- SCL y SDA: Son los pines necesarios para realizar la comunicación con el Arduino basado en el protocolo I2C.

Las conexiones que es necesario realizar para su correcto funcionamiento se muestran en la figura 5.

Además, el sensor incluye una pila que asegura que se mantenga en hora el reloj aunque se produzca un fallo de alimentación.

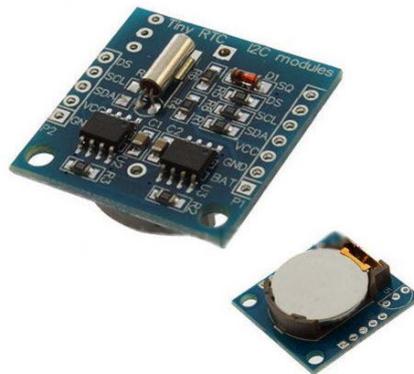


Figura 4. Reloj DS1307.

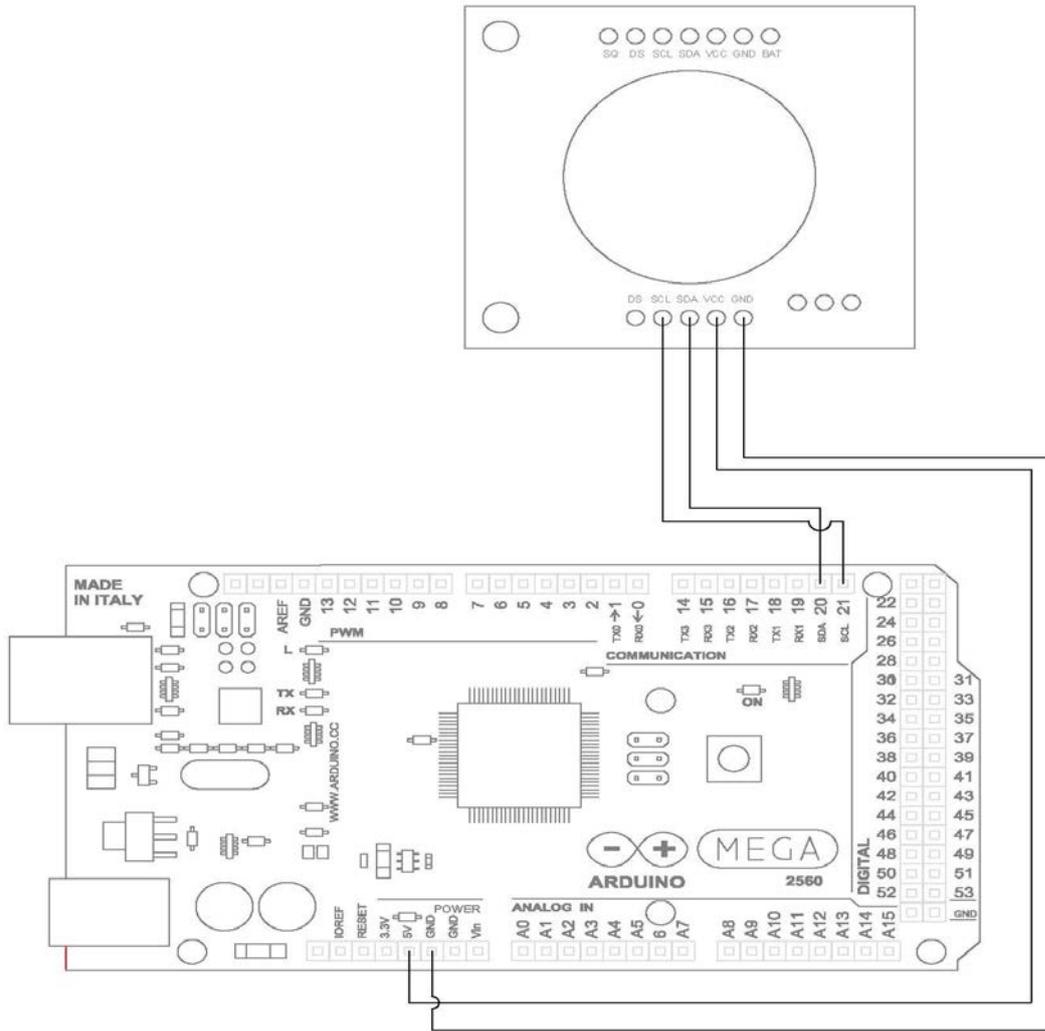


Figura 5. Conexión del integrado DS1307(Reloj) con la placa Arduino.

4.3. Apertura del caballete de ventilación:

En un principio, se pensó que saber el porcentaje de apertura del caballete iba a ser importante para variar el grado en el que se quería refrigerar el interior de la colmena o descender la humedad relativa en el interior de ésta. Para ello se adquirió un sensor llamado magnetopot (figura 6). Dicho sensor es un potenciómetro cuyo valor de resistencia entre los 2 pines a medir varía con el movimiento de un objeto magnético (en este caso se ha usado un imán) que esté cercano a éste, sin ser necesario un contacto entre ambos.

Sin embargo, como ya se explicó en el apartado 3.2.2. del presente documento, no resulta útil controlar el porcentaje de apertura del caballete de ventilación. Por este motivo, el sensor magnetopot no se ha utilizado finalmente en el desarrollo del presente trabajo de fin de grado, y se ha sustituido por dos finales de carrera (figura 7) situados en la posición de reposo y de máxima apertura del caballete, tal y como se puede ver en el documento Planos, en el plano número 7. Por tanto, la magnitud del enfriamiento se controla mediante el tiempo en el que el caballete de ventilación está abierto, no mediante el porcentaje de apertura de éste.

Las conexiones a realizar para medir el grado de apertura se muestran en la figura 8.



Figura 6. Sensor magnetopot.



Figura 7. Sensor final de carrera.

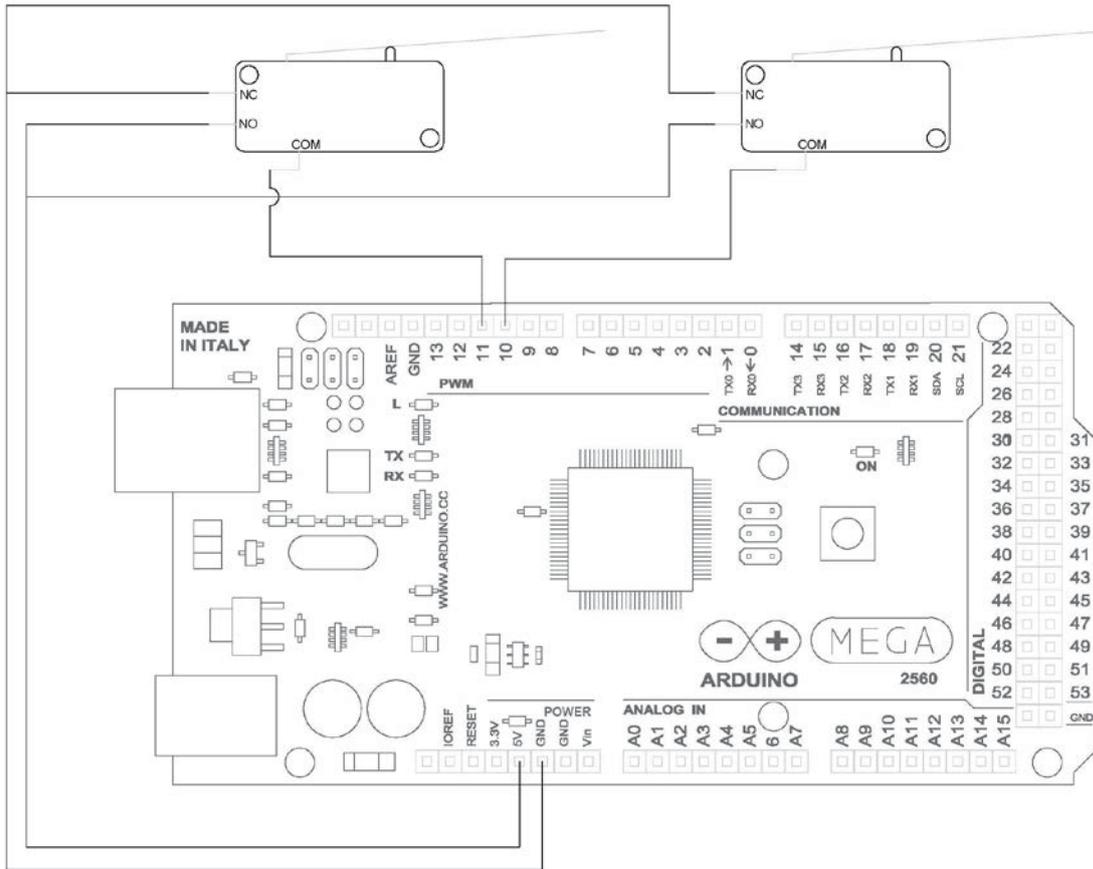


Figura 8. Conexión de los finales de carrera con la placa Arduino.

4.4. Memoria:

Todas estas variables registradas por el Arduino se almacenan en una tarjeta SD, construyendo así una base de datos que puede ser útil en el futuro. La implementación de esta memoria se puede realizar gracias al módulo lector de SD para Arduino (figura 9), a la propia tarjeta SD y a la librería que configura los parámetros de ésta. Las conexiones a realizar para su correcto funcionamiento se muestran en la figura 10.



Figura 9. Módulo Lector SD.

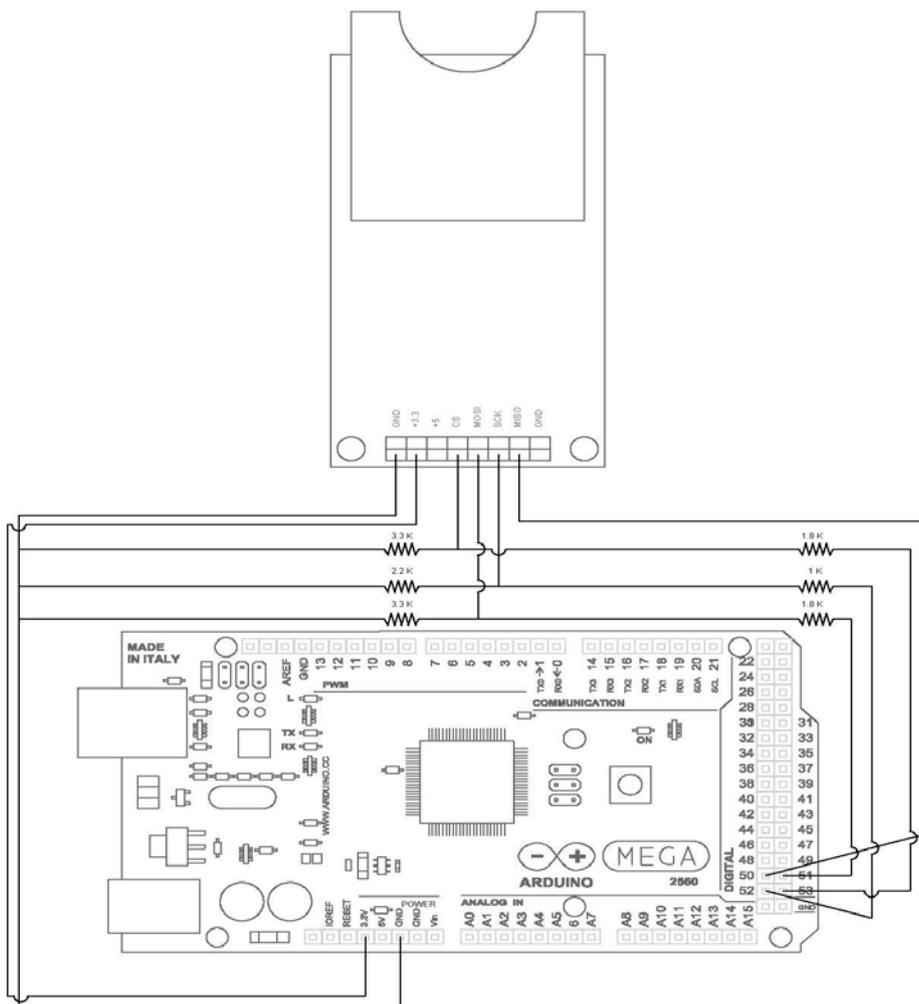


Figura 10. Conexión del módulo lector SD con la placa Arduino.

5. Sistema de actuación:

El sistema de actuación se ha diseñado e implementado para realizar las funciones de calefacción y refrigeración, según lo requieran las condiciones que impone el sistema de control, descritas en el capítulo 7 (Condiciones de control) del presente documento.

Debido a que tienen que realizar varias funciones independientes, el sistema de actuación se divide en varios subsistemas:

5.1. Función de calefacción:

Se lleva a cabo mediante una resistencia calefactora controlada mediante un PID implementado sobre un Arduino. Está ubicada debajo del suelo de la colmena, tal y como se muestra en el documento Planos, en los planos número 8 y 9.

La resistencia calefactora tiene las siguientes características técnicas:

- Tensión de funcionamiento: 115V
- Potencia máxima admisible: 350W

Debido a que la tensión de funcionamiento de la resistencia es inferior a la tensión de la red, se ha interpuesto un diodo de potencia entre la red y la resistencia, filtrando así la señal alterna para obtener una señal de media onda y, por tanto, mitad de tensión eficaz.

El diodo usado tiene una tensión máxima entre bornes de 250V, una intensidad máxima admisible de 10A y soporta temperaturas de hasta 240°C, por lo que es válido para el sistema diseñado.

La conexión entre el circuito de potencia (tensión de la red) y el circuito de control (Arduino) se realiza mediante un relé de estado sólido (figura 11). Se ha utilizado el relé de estado sólido debido a que es un dispositivo barato, que soporta una alta potencia y, aunque existen dispositivos con menor tiempo de conmutación, en este caso no se precisa.

Las características técnicas del relé de estado sólido son las siguientes:

- La tensión de funcionamiento debe estar en el rango 90-280V
- Máxima corriente de carga: 25 A
- La tensión de control debe estar en el rango 3-32VDC



Figura 11. Relé de estado sólido.

La conexión entre la resistencia calefactora, el relé de estado sólido y el circuito de control (Arduino) se muestra en la figura 12.

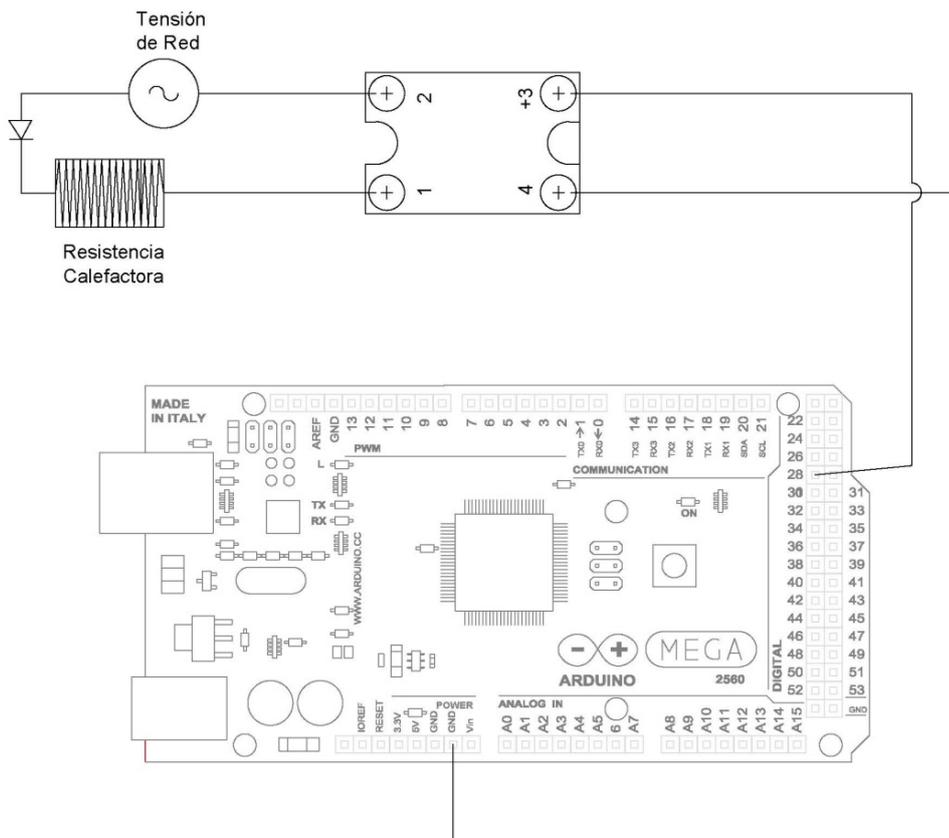


Figura 12. Conexión entre la resistencia calefactora, el relé de estado sólido y el circuito de control (Arduino)

5.2. Función de refrigeración:

Como ya se comentó en un principio, se pensó en un sistema dual de refrigeración compuesto por un caballete de ventilación (figuras 13 y 14) y un sistema de vaporización. En lo que se refiere al primero, se implementa mediante la apertura de una entrada de aire en el techo de la colmena para generar una corriente. El funcionamiento del caballete es el que se describe a continuación:

- Si está cerrado, no se produce corriente de aire alguna, por tanto, no hay refrigeración.
- Si está abierto, se produce una corriente de aire que circula por el interior de la colmena. El aire caliente es menos denso y tiende a subir, por lo que sale por la apertura del techo, mientras que por la biquera entra aire del exterior que estará a menor temperatura. De esta forma se reduce la temperatura del interior de la colmena, disminuyendo, una vez que ha transcurrido un cierto tiempo, hasta alcanzar la temperatura exterior.

Este sistema se utiliza en distintas aplicaciones que requieren el enfriamiento de un cierto espacio. En la figura 15 se utiliza para disminuir la temperatura en el interior de una granja, ilustrándose la corriente de aire que produce el enfriamiento.

La apertura del caballete se realiza mediante un servo (figura 16) controlado mediante la placa Arduino. Las características técnicas del servo son las siguientes:

- Modelo: Servo Motor SKY6290 9kg
- Voltaje de funcionamiento: 6V. En el presente trabajo de fin de grado se alimenta con una fuente externa.
- Velocidad: 0.2segundos/60°
- Torque: ≥ 9 kg/cm
- Tiene 3 pines, cuyas funciones son:
 - Tierra (Cable marrón)
 - Alimentación (Cable rojo)
 - Datos (Cable naranja)

Como se puede ver en el documento Planos, en los planos 1, 2, 3 y 4, es necesario disponer de una rejilla debajo de la apertura, para que cuando el caballete se abra las abejas no pasen por el orificio.

Las conexiones necesarias para desarrollar este sistema se muestran en la figura 17.

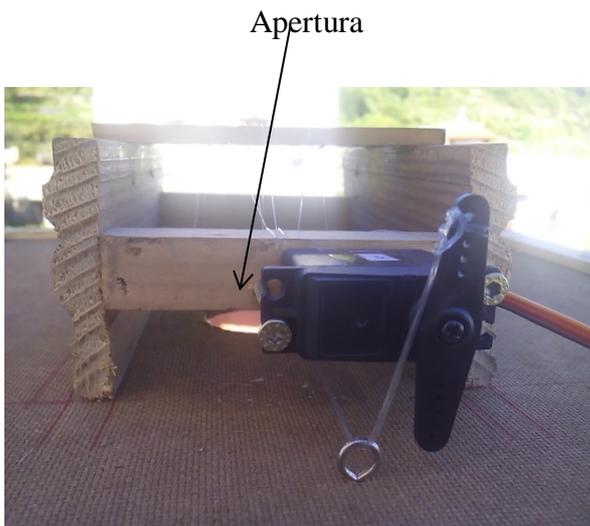


Figura 13. Caballete abierto.



Figura 14. Caballete cerrado.

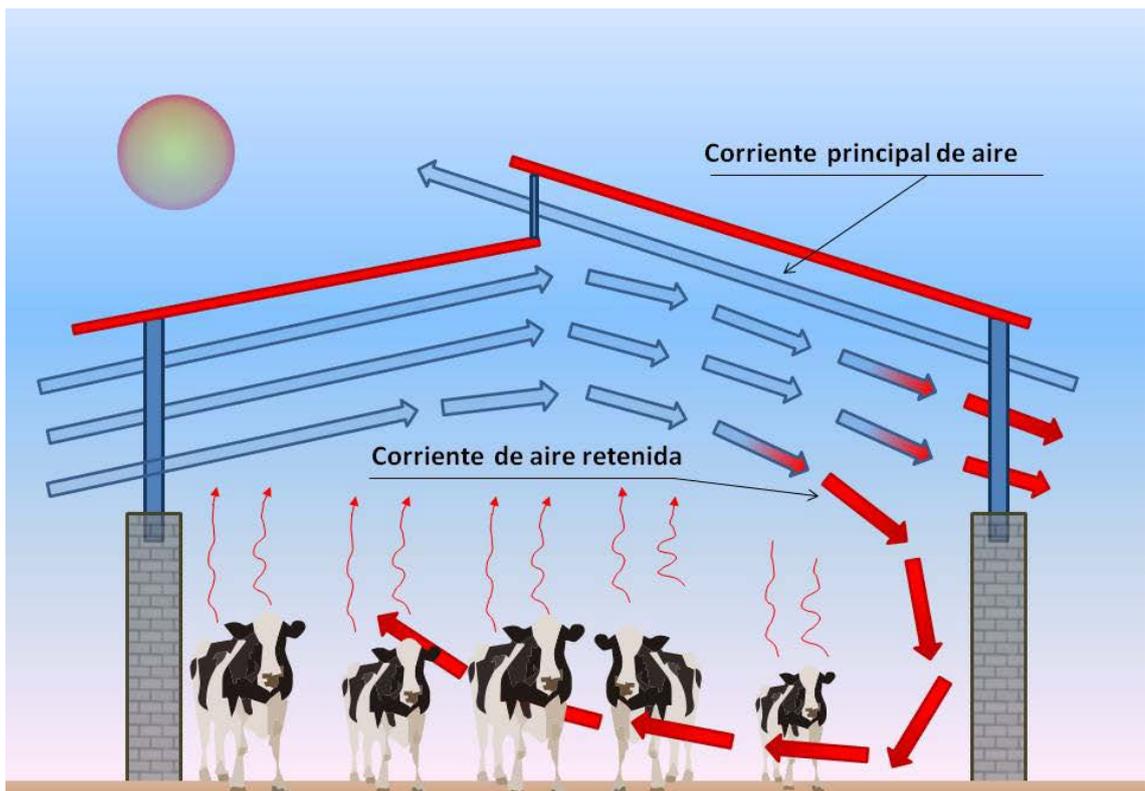


Figura 15. Ejemplo de un caballete de ventilación utilizado en una granja.



Figura 16. Servo Motor SKY6290 9g.

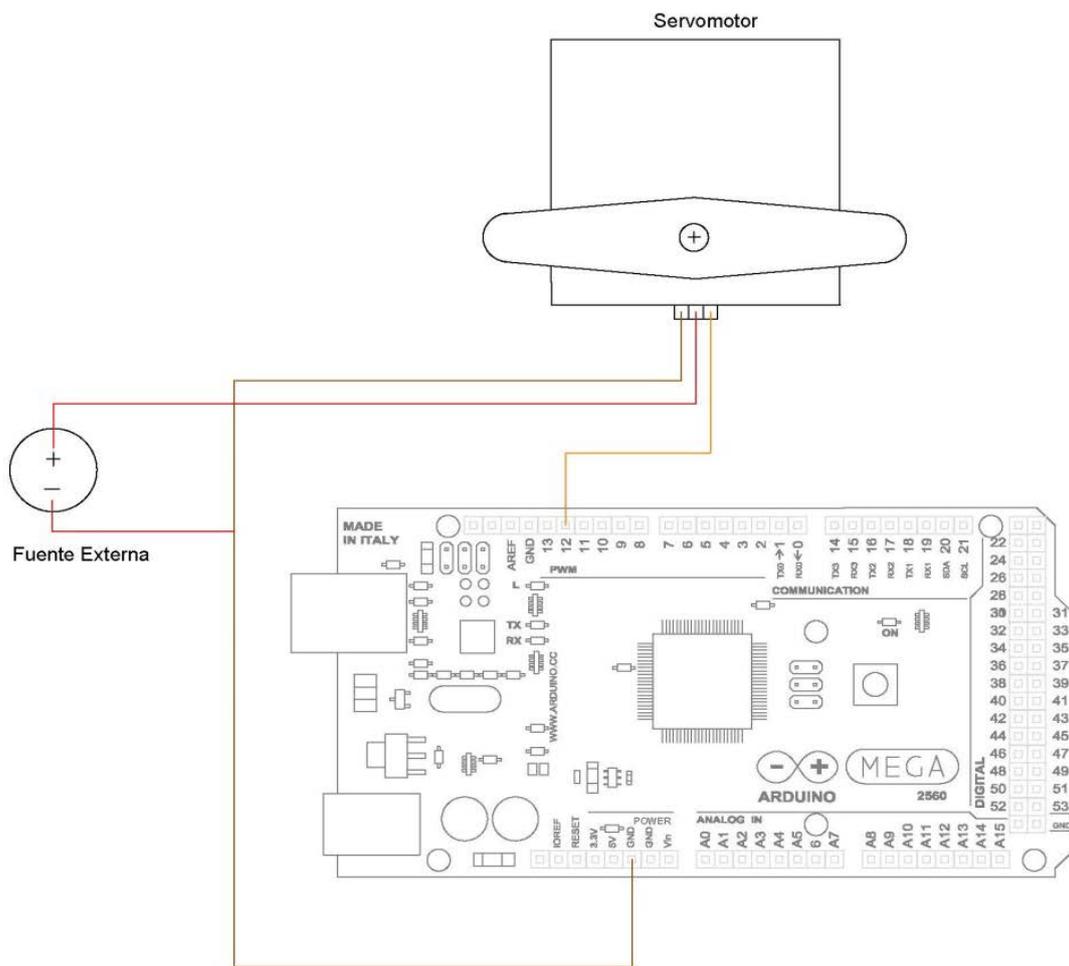


Figura 17. Conexiones necesarias para el funcionamiento del caballete.

En lo que se refiere al sistema de vaporización, hay que decir que sólo se implementó manualmente ya que a partir de los resultados experimentales obtenidos descartamos emplearlo para enfriar la colmena.

El sistema automático diseñado (aunque no implementado) consiste en un cilindro de simple efecto que, al extenderse, acciona el gatillo de una pistola (tipo limpiacristales) rellena de agua, dispuesta de tal forma que el disparo vaporiza directamente el interior de la biquera, reduciendo su temperatura. El Arduino sería el encargado de activar el cilindro a intervalos regulares de tiempo. Como se comentó anteriormente, se descartó la automatización de este mecanismo tal y como fue diseñado por las razones que se explican en el capítulo 3 (Justificación del trabajo de fin de grado), apartado 3.2.2. (solución a días muy calurosos) del presente documento. Un estudio más detallado de dicho sistema podría conducir a un diseño más optimizado y, por tanto, implementable.

6. Sistema de control:

6.1 Equipo de control:

El dispositivo en el que se ha implementado el sistema de control es un Arduino ATmega 2560 R3 (figura 18). Se ha escogido éste frente a otras alternativas debido a que es una plataforma de hardware libre con suficiente información en internet como para resolver prácticamente cualquier duda que surgiera durante el desarrollo de los algoritmos de control diseñados en el transcurso del presente trabajo de fin de grado, a que en el mercado hay una gran cantidad de sensores y actuadores disponibles compatibles con él y, finalmente, por su bajo coste y por su entorno simple de programación. Además, presenta suficientes entradas y salidas tanto digitales como analógicas para realizar todas las funciones previstas, y aun así tener un margen bastante grande para que en caso de que se vayan a ampliar las funciones a realizar por parte del sistema, no sea necesario cambiar el dispositivo de control.

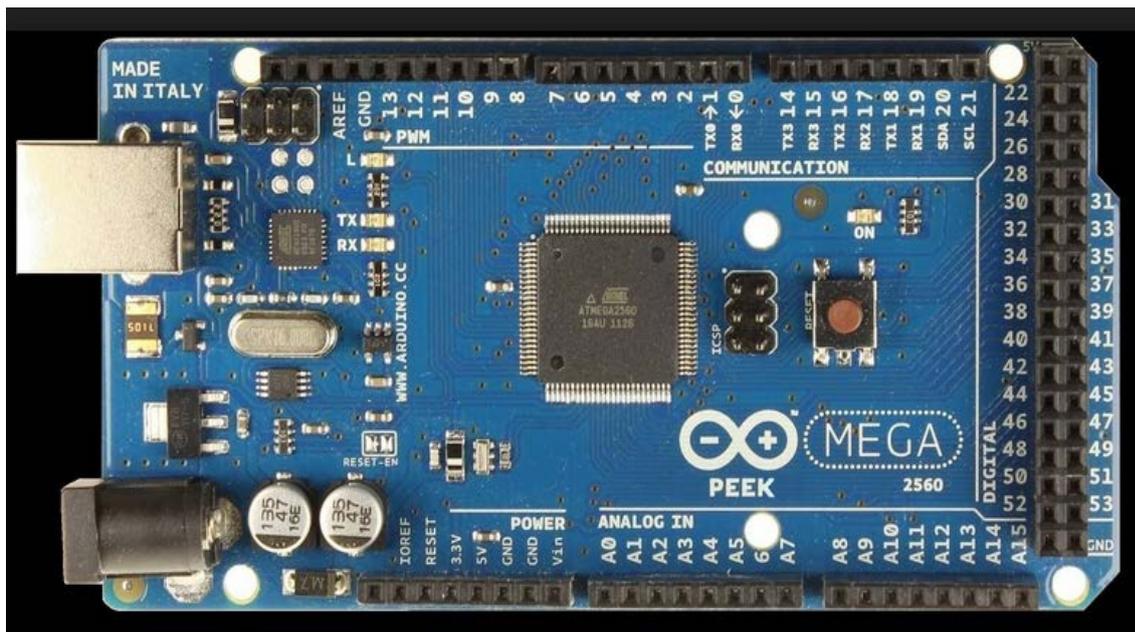


Figura 18.Arduino ATmega2560 R3.

Las características técnicas del Arduino ATmega2560 R3 se relacionan a continuación:

- El microcontrolador que usa es ATmega2560.
- Tensión de funcionamiento: 5V
- Voltaje de entrada: Se puede alimentar a través de una conexión USB o mediante una fuente de alimentación externa. Ésta debe suministrar una tensión que se encuentre en el rango de 6 a 20V, aunque lo recomendable es de 7 a 12 V.
- Pines de entrada/salida digitales: 54, de las cuales 15 proporcionan salida PWM.
- Pines de entrada analógica: 16
- Corriente continua máxima para los pines de entrada o salida: 40 mA
- Corriente continua máxima para el pin cuya salida es 3.3V : 50 mA
- Memoria flash: 256 KB, de los cuales 8 KB son utilizados por el gestor de arranque.
- SRAM: 8KB
- EEPROM: 4KB
- Velocidad del reloj: 16MHz
- Dispone de 4 puertos UARTs para comunicación serial TTL (5v).
- Se puede conectar con el ordenador a través de USB.
- Soporta comunicación TWI y SPI.
- Se programa en un lenguaje de programación propio, que es el Processing/Wiring, y es bastante similar al C y C++.

En la figura 19 se muestra el esquema interno del Arduino ATmega 2560 R3.

6.2. Procedimientos de control:

En este trabajo de fin de grado se han implementado dos políticas de control diferentes para gobernar los diferentes actuadores. Éstas son un control todo o nada, empleado en el caballete de ventilación, y un control PID, que es el encargado de regular la potencia disipada por la resistencia calefactora. A continuación se va a explicar y comparar el funcionamiento de ambas estrategias de control:

6.2.1. Control todo o nada:

Este modo de control se caracteriza por tener dos posiciones fijas: no entregar potencia o entregar la máxima potencia. Por tanto, el controlador no tiene la capacidad para producir un valor exacto en la variable controlada. Otro de los problemas que tiene este controlador tan básico es que aunque el valor de la variable controlada evolucione hasta el punto deseado, presentará fluctuaciones en torno al valor de consigna. Además, la acción del control todo-nada es de naturaleza no lineal.

En la figura 20 se puede ver la salida de control, $u(t)$, en función de la señal de error, $e(t)$:

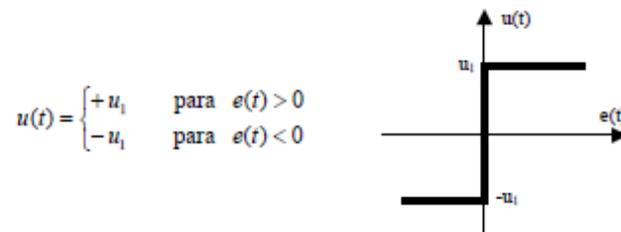


Figura 20. Ejemplo de una señal de control en función del error de un control todo o nada.

En la figura 21 se puede ver un ejemplo del funcionamiento de este procedimiento de control.

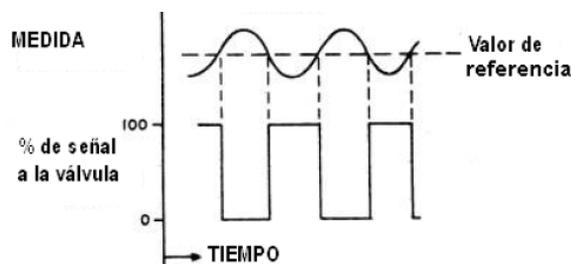


Figura 21. Ejemplo de un sistema de control todo o nada.

6.2.2. Control PID:

El control PID consiste en la aplicación conjunta de tres acciones de control que se denominan: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D).

La acción de control proporcional, como su propio nombre indica, consiste en un comando $u(t)$ proporcional a la señal de error $e(t)$, es decir:

$$u(t) = K_p e(t),$$

donde K_p se denomina ganancia proporcional.

Por tanto, la función de transferencia de este controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

La ganancia proporcional controla lo rápido que la variable controlada evoluciona para tratar de alcanzar el valor de consigna y, al mismo tiempo, permite reducir el error en el estado estacionario, pero no lo elimina a no ser que el sistema objeto de control presente polos en el origen. Por el contrario, valores altos de la ganancia proporcional pueden producir que la variable controlada presente sobrepasamientos importantes con respecto a la consigna, así como la saturación de algunos elementos, e incluso la inestabilidad del sistema.

La acción de control integral es proporcional a la integral del error. Por tanto, es una operación acumulativa del error a lo largo del tiempo.

El comando integral responde a la siguiente expresión:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt,$$

donde K_i se denomina ganancia integral, que es la inversa del llamado tiempo integral T_i ($K_i=1/T_i$).

La función de transferencia de la acción de control integral es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} = \frac{1}{T_i s}$$

La acción integral incrementa la exactitud del sistema, ya que permite eliminar el error estacionario ante algunos tipos de entrada, como por ejemplo la entrada escalón. Sin embargo, puede empeorar la estabilidad relativa del sistema, pudiendo llegar a hacer que se vuelva inestable.

La acción derivativa genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error, es decir:

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt},$$

donde T_d se denomina tiempo derivativo.

La acción derivativa permite corregir el error del sistema antes de que alcance un valor excesivo, ya que la derivada en el tiempo permite conocer la tendencia de éste. Sin embargo, genera más problemas que los que resuelve si en el sistema de adquisición de datos tenemos ruido en las altas frecuencias, ya que lo amplifica. Además, si la señal de error es constante, la derivada es cero, por lo que esta acción de control no tiene efecto en el estado estacionario.

Combinando estas tres acciones de control se aprovechan las ventajas que ofrecen cada una de ellas por separado. La expresión correspondiente al comando PID (proporcional, integral y derivativo) es la que se muestra a continuación:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + T_d * \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right]$$

Pasando al dominio de Laplace con condiciones iniciales nulas obtenemos la función de transferencia correspondiente a este controlador, que es la siguiente:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + sT_d + \frac{1}{sT_i} \right]$$

Si los parámetros K_p (ganancia proporcional), T_d (tiempo derivativo) y T_i (tiempo integral) se ajustan correctamente, la acción de control PID permite que la variable controlada se comporte de la forma deseada dentro de los límites que impone el sistema, eliminando el error en estado estacionario y logrando una buena estabilidad relativa del sistema en lazo cerrado.

Existen diferentes métodos para seleccionar los valores óptimos de los parámetros del controlador PID. Uno de los más aplicados es el método empírico de la pendiente Ziegler-Nichols.

En la figura 22 se muestra un ejemplo de cómo funciona un controlador PI (proporcional-integral) ante dos funciones de error diferentes. Se ha elegido este controlador, en el que se prescinde de la acción derivativa, porque es el que se implementa en el presente trabajo de fin de grado.

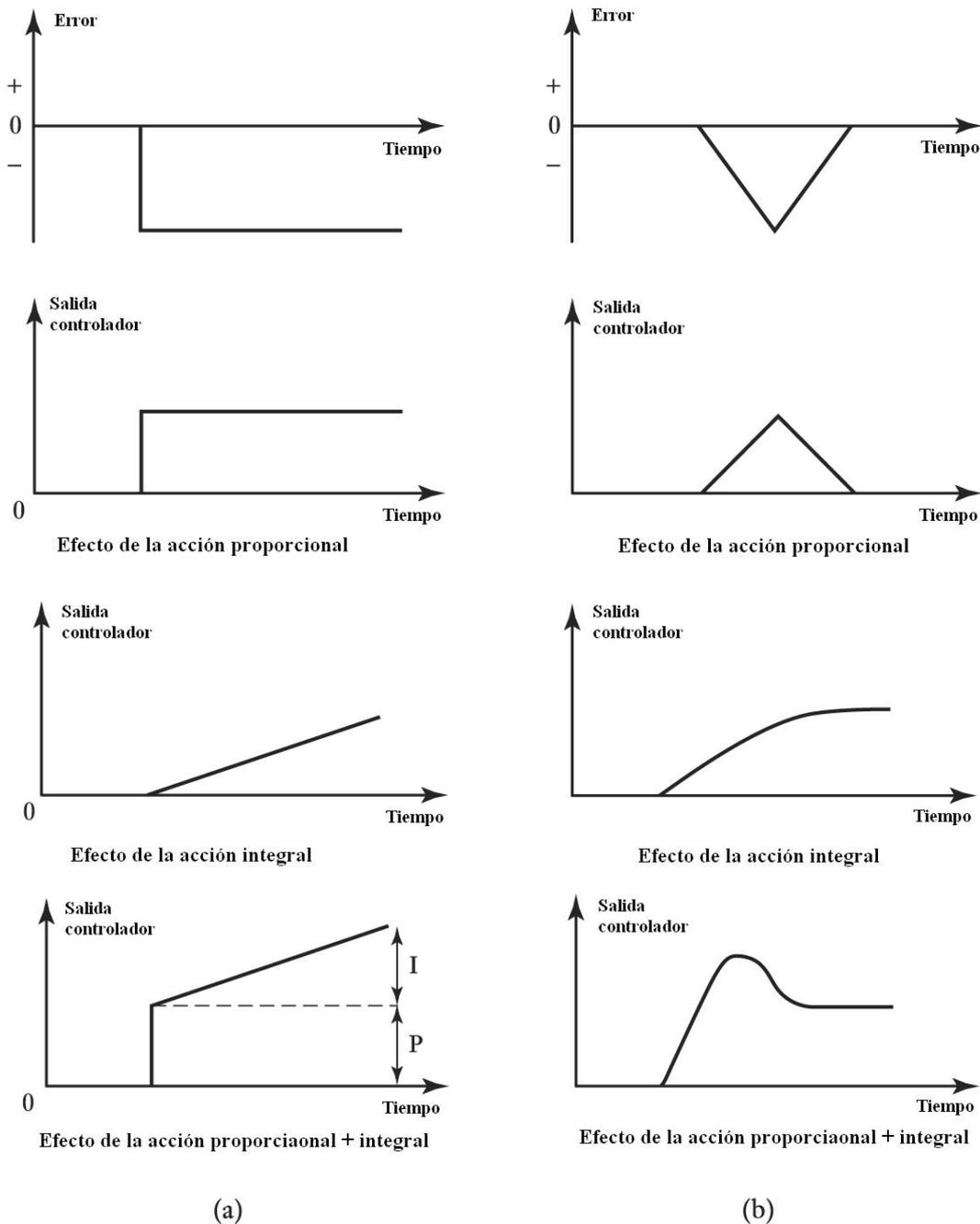


Figura 22. Ejemplo de la respuesta de diferentes sistemas de control ante dos funciones de error.

6.2.3. Comparación entre el control todo o nada y el control PID

El control todo o nada y el control PID son las dos políticas de control más utilizadas actualmente en la industria. Por un lado, los sistemas todo o nada resultan más económicos y más fáciles de implementar que los PID. Por otro lado, los PID garantizan una mayor eficiencia y precisión, pudiendo eliminar el error en el régimen estacionario. Además, favorece el mantenimiento de los actuadores, ya que la salida de éstos fluctúa de forma mucho más suave que con el control todo o nada.

6.2.4. PI implementado:

En el presente trabajo de fin de grado se ha implementado un controlador PI cuyo funcionamiento no es el convencional debido a las limitaciones físicas de los mecanismos empleados. Como se ha comentado en el capítulo 5 (Sistema de actuación) del presente documento, el dispositivo electrónico utilizado para enlazar el sistema de control (implementado en la placa Arduino) con el sistema de potencia (resistencia calefactora) es un relé de estado sólido. Un relé de estado sólido es un dispositivo compuesto por un optoacoplador que aísla la entrada, un circuito de disparo, que detecta el paso por cero de la corriente de línea y un triac que actúa de interruptor de potencia. Aunque éste puede conmutar a una alta frecuencia, no trabaja correctamente con señales PWM.

La razón por la que no se utiliza un controlador PI convencional es que la librería utilizada para la implementación en la placa de control Arduino produce una señal de salida PWM. Por este motivo, se ha añadido al software desarrollado unas condiciones de control, un temporizador y una señal de salida digital. El funcionamiento es el siguiente:

1º La librería lee la variable de entrada (en este caso la temperatura de la biquera) cada cinco segundos y produce una señal de salida PWM (Z).

2º El ciclo de trabajo que originalmente se iba a desarrollar con la señal PWM se pasa a realizar con una señal digital. Para ello, es necesario calcular el tiempo que debe estar la señal digital con valor 'alto' y con valor 'bajo'.

3º El periodo de tiempo que la señal digital está 'alta' (X1) se determina con la siguiente regla de tres:

Valor de la señal PWM	Periodo de tiempo de la señal digital en estado 'alto'
255 (100%)	5s = 5000ms
Z (Señal aportada por la librería)	X1

$$X_1 = \frac{5000 * Z}{255} \cong 20 * Z \quad (\text{milisegundos}).$$

4° El periodo de tiempo que la señal digital está 'baja' (X2) se determina con la siguiente relación:

$$X_2 = 5000 - X_1 \quad (\text{milisegundos}).$$

El tiempo de cada ciclo de control es de 5 segundos, ya que un periodo de tiempo muy pequeño contendrá un gran porcentaje de errores debido a los disparos del triac, y un periodo de tiempo elevado producirá grandes retardos, con las consecuencias negativas que ello conlleva desde el punto de vista del control del sistema.

El control de potencia del actuador se realiza variando el ciclo de trabajo, entendiéndose éste como la relación que existe entre el tiempo en que la señal se encuentra en estado activo y el periodo de la misma.

A pesar de lo expuesto, el efecto que produce el controlador PI que se ha implementado es muy similar al que tendría un PI convencional debido a que el sistema sobre el que actúa es un sistema de dinámica lenta (recordemos que se trata de un control de temperatura). Si estuviéramos ante un sistema más rápido, probablemente este diseño no sería aplicable y habría que estudiar otras soluciones más adecuadas para las características de la planta objeto de control.

7. Condiciones de control:

El problema de control que hemos pretendido resolver en este Trabajo de Fin de Grado tiene algunas particularidades que lo diferencian de forma sustancial del problema clásico, en el que la entrada del controlador es la señal de error, esto es, la diferencia entre la consigna y el valor real de la variable controlada. Dichas particularidades se deben fundamentalmente a que las abejas llevan a cabo la regulación de la temperatura en la cámara de cría de manera que, en los días fríos éstas aumentan su actividad para elevar la temperatura en la colmena, mientras que en los días calurosos se colocan en la biquera (entrada a la colmena) y baten alas para bajar la temperatura en la cámara de cría. Como ya hemos comentado, lo que pretendemos con este trabajo es llevar a cabo de forma automática el control de temperatura (manteniendo la humedad relativa tan baja como sea posible), aliviando así a las abejas de la mayor parte de esta tarea (ya que se les deja a ellas el ajuste fino de esta variable) y permitiendo que dediquen sus esfuerzos a la producción de miel, aumentando así la productividad de la colmena. Debido a esta particularidad, en este capítulo se explican las condiciones de control que se han implementado en el algoritmo diseñado con el objeto de regular los dos sistemas de actuación implementados: la resistencia calefactora y el caballete de ventilación (más vaporización).

7.1. Sistema de calefacción:

Uno de los mayores problemas que ha surgido en el diseño del sistema de calefacción propuesto ha sido determinar las condiciones de control, es decir, bajo qué condición o condiciones debe ponerse en marcha el calentamiento del interior de la colmena. El problema surge porque, tal y como acabamos de explicar, la variable a controlar (la temperatura de la cámara de cría) no se puede utilizar como entrada para el controlador PI explicado en el capítulo 1.6 (Sistema de control) del presente documento, debido a que dicha variable siempre permanece aproximadamente en el valor consigna, tal y como se puede ver reflejado en el capítulo 1 (Medidas realizadas en la colmena de estudio en la finca de Boquín) del documento Resultados obtenidos. Esto es así porque las abejas están obligadas a mantener la temperatura en la cámara de cría en un valor de $35 \pm 1^\circ\text{C}$ para que no se mueran las crías.

Una vez justificado el por qué no se debe utilizar la temperatura de la cámara de cría como entrada al controlador PI cuando es ésta la variable que se quiere controlar, es necesario

estudiar otras alternativas posibles como pueden ser la temperatura de la biquera, del techo de la colmena o la temperatura exterior. En este sentido, cabe destacar lo siguiente:

- La temperatura de la biquera no se ha escogido porque el sensor que la mide es el que está más próximo a la resistencia calefactora, lo que significa que es la variable que más condicionada está por el sistema de actuación.
- La temperatura exterior no ha sido la elegida debido a que no es una variable interna de la colmena y, aunque tiene cierta relación con la temperatura interior, no es una relación tan directa como puede ser la temperatura en la biquera o en el techo de ésta. Además, debido a que esta variable se obtiene con un sensor que está al aire libre, está desprotegido ante las situaciones que se puedan dar en el medio, pudiendo dejar de enviar datos y provocando el mal funcionamiento del sistema de control.

Teniendo esto en cuenta, se ha seleccionado la temperatura en el techo de la colmena como la variable a utilizar para cerrar el lazo de control que actúa sobre la resistencia calefactora debido a que es una variable fuertemente ligada con la temperatura de la cámara de cría (recordemos que se encuentra a pocos centímetros de dicha posición). Además, es la variable medida por el sensor que está más alejado de la resistencia calefactora, por lo que es la última en ser influenciada por éste, dando tiempo a que toda la colmena alcance la temperatura deseada. Por otro lado, también está influenciada por el ambiente exterior, puesto que está en contacto con éste a través de la tapa. Otra de las ventajas de usar esta variable como entrada del controlador PI es que el sensor va a ser más accesible para el apicultor que el de la biquera, lo que significa que lo podrá mantener en un mejor estado (el mantenimiento necesario a realizar está explicado en el capítulo 8 del presente documento), traduciéndose esto en una correcta lectura de la variable medida.

Por lo que acabamos de comentar, se justifica que la variable en función de la cual se obtiene la acción de control PI que actúa sobre la resistencia calefactora sea la temperatura en el techo de la colmena. Sin embargo, no debemos comparar directamente el valor de esta variable con los 35 °C de consigna, puesto que entre la cámara de cría y el techo siempre se suele mantener una diferencia de temperatura de entre 5 y 10°C, tal y como se puede observar en el capítulo 1 (Medidas realizadas en la colmena de estudio en la finca de Boquín) del documento Resultados obtenidos. De hacerlo así, la resistencia dejaría de calentar cuando la temperatura del techo de la colmena alcanzara dicha consigna, pero entonces en la cámara de cría la temperatura estaría entre 5 y 10°C por encima. Esto obligaría a las abejas a realizar un

trabajo extra para reducir dicha temperatura e incluso, si no fueran capaces de reducirla, se podría producir la muerte de la colmena. Nótese que las gráficas de las que hemos sacado los datos a los que hacemos referencia corresponden a un día de invierno, candidato para llevar a cabo el calentamiento deseado.

Teniendo en cuenta esta diferencia de temperaturas entre el techo de la colmena y la cámara de cría, la variable que se compara con la consigna para generar la señal de error que entra al controlador PI es el valor de la temperatura en el techo más un parámetro (P_1) cuyo valor se ha establecido en 8°C , es decir:

$$\text{error}(t) = \text{consigna} - (T^{\text{a}}_{\text{techo}} + P_1) = \text{consigna} - (T^{\text{a}}_{\text{techo}} + 8^{\circ}\text{C})$$

El parámetro P_1 se ha estimado tomando un valor ligeramente superior a la media del intervalo de temperaturas previamente mencionado.

Una vez determinada la forma en que vamos a calcular el error, hay que definir el valor de la consigna. Sería lógico pensar que como las abejas necesitan una temperatura de 35°C en la cámara de cría, éste debe ser el valor de consigna. Sin embargo, el que hemos considerado es en realidad 35°C menos un cierto parámetro (P_2) a ajustar, es decir:

$$\text{consigna} = 35^{\circ}\text{C} - P_2$$

De este modo, y tal y como se comentó al comienzo del capítulo, el sistema de calefacción hace la mayor parte del trabajo que, de otro modo, deberían asumir íntegramente las abejas, pero no las sustituye por completo. Con este funcionamiento, las abejas realizarán el ajuste fino de la temperatura, evitando así posibles sobrepasamientos de los 35°C y las consecuencias nocivas que ello tendría. Por tanto, en el presente trabajo de fin de grado hemos definido una consigna igual a 30°C (lo que significa que el parámetro P_2 se ha fijado en 5°C), de forma que se minimiza el riesgo de que la temperatura supere los 35°C en la cámara de cría debido al funcionamiento del sistema de calefacción.

Los parámetros P_1 y P_2 se deberán determinar con mayor precisión en el futuro mediante medidas reales en varias épocas del año de la temperatura en el interior de la colmena y mediante ensayos de prueba y error, analizando posteriormente los diferentes rendimientos de la colmena en función del valor de P_1 y P_2 . Lógicamente estas mediciones deberán realizarse con la colmena habitada.

7.2. Sistema de refrigeración:

El sistema de refrigeración de la cámara de cría puede ser necesario que actúe en dos situaciones distintas que se van a explicar a continuación:

7.2.1. Exceso de temperatura generado de forma natural:

Un día caluroso en el que sea necesario disminuir la temperatura interior, puesto que en estas condiciones de forma natural la temperatura dentro de la colmena es superior a la deseada. En este caso, la variable que determina la entrada en funcionamiento del sistema de refrigeración es la temperatura exterior. Así, la refrigeración se habilita si dicha temperatura es superior a 35°C (que coincide con la temperatura deseada en el interior de la colmena) menos un parámetro (P_3). Este parámetro no se ha podido estimar de forma experimental debido a que para ello deberíamos disponer de mediciones realizadas en un día caluroso, típicamente en verano, que es cuando se darán estas condiciones. Nótese que el presente trabajo de fin de grado se ha desarrollado en otra época del año. Al no disponer de datos reales, hemos asignado al parámetro P_3 un valor de 5°C, lo que significa que para que el caballete de ventilación actúe (se abre), la temperatura exterior debe ser superior a 30°C. Nótese que es una estimación basada únicamente en la experiencia adquirida a lo largo de este trabajo de fin de grado, y que sin duda deberá ser corregida

7.2.2. Exceso de temperatura generado por la actuación del sistema:

El sistema de refrigeración de la cámara de cría también podría tener que entrar en funcionamiento en un día frío en el que al activarse el sistema de calefacción la temperatura de la colmena supere los 35°C debido a un sobrecalentamiento. Aunque, como ya se explicó anteriormente, el parámetro P_2 tiene como misión que esto no ocurra, nos ha parecido adecuado dejar abierta la posibilidad de que en algún momento se pueda dar esta circunstancia debido a algún problema en el funcionamiento del sistema calefactor. En este caso, las acciones a realizar son la desconexión inmediata de la resistencia calefactora y la apertura total del caballete de ventilación. Las condiciones que se deben dar para entrar en este estado son una temperatura en el techo superior a 35°C y una temperatura exterior inferior a 35°C.

7.3. Resumen del capítulo:

Con objeto de clarificar las condiciones de actuación de los sistemas de calefacción y refrigeración que se acaban de explicar, éstas se resumen en la siguiente tabla:

Sistema de actuación	Acción de control	Variable de control que se resta a la consigna	Condición de actuación
Calefacción	PI	Temperatura del techo + 8°C	$T_{\text{techo}} < 22^{\circ}\text{C}$
Refrigeración	Todo o nada	(Temperatura exterior) o (Temperatura del techo y Temperatura exterior)	$(T_{\text{exterior}} > 30^{\circ}\text{C})$ o $(T_{\text{techo}} > 35^{\circ}\text{C}$ y $T_{\text{exterior}} < 35^{\circ}\text{C})$

Tabla 1.

8. Mantenimiento:

El sistema que se ha diseñado e implementado se va a desarrollar sobre un ecosistema que tiene una serie de peculiaridades que hacen altamente aconsejable la redacción de este capítulo. En él se recogen todas las medidas relativas al mantenimiento y las precauciones a tomar.

Una de las precauciones más importantes a tomar es disponer de una rejilla de protección en la parte inferior del caballete de ventilación, tal y como se puede comprobar en el documento Planos, en los planos 1, 2, 3 y 4, que permita salir al aire del interior de la colmena hacia el exterior cuando el caballete esté abierto, pero que no dé la misma posibilidad a las abejas. Esto es importante fundamentalmente por dos motivos:

- Las abejas pueden salir de la colmena por la biquera, pero ésta es una abertura pequeña, por lo que no pueden salir en desbandada, evitando así los cambios bruscos en los parámetros interiores de la colmena. Con el uso de la rejilla de protección, se asegura que este comportamiento no se modifica.
- El caballete de ventilación conecta el techo con una cámara donde se encuentra la placa de control Arduino con algunos dispositivos de control, tal y como se puede comprobar en el documento Planos, en los planos 8 y 9. Si las abejas accedieran a esta cámara probablemente supondría la ruptura del sistema de control.

Otro aspecto a tomar en cuenta son los sensores de temperatura y humedad utilizados. Las abejas son unos insectos que suelen tapar con propóleo pequeños huecos, grietas y cualquier elemento o dispositivo que esté en el interior de la colmena y no reconozcan, tal y como se puede comprobar en la figura 23. Por este motivo, hay que utilizar sensores que dispongan de una protección que no permita a las abejas acceder a ellos y, al mismo tiempo, habilite el paso de aire para la correcta lectura de las variables medidas. En la figura 24, se puede ver como los sensores utilizados tienen dicha protección.



Figura 23. Rejilla parcialmente tapada con propóleo debido a la acción de las abejas.



Figura 24. Sensor DHT21/AM2301.

Por el mismo motivo por el que se debe utilizar protecciones para los sensores de temperatura y humedad interiores, si se quiere garantizar una lectura correcta de dichas variables y un buen funcionamiento del caballete de ventilación, tanto los sensores de temperatura y humedad como la rejilla de protección del caballete de ventilación necesitarán ser cambiados o limpiados cada 3 meses como máximo.

Finalmente, el algoritmo de control debe ser diseñado de forma que los actuadores varíen lentamente los parámetros controlados (temperatura y humedad en la cámara de cría), garantizando así que el ecosistema se adapta progresivamente a los cambios que experimenta. Esto implica unas ganancias pequeñas para el controlador PI que gobierna la resistencia calefactora.

Resultados obtenidos

César Pérez Méndez

23-06-2014

Índice:

1. Medidas realizadas en la colmena de estudio en la finca de Boquín (Icod de los vinos): ..	2
1.1 Conclusiones extraídas de las mediciones realizadas:	21
2. Pruebas experimentales:	23
2.1. Prueba 1: Diferentes porcentajes de apertura del caballete de ventilación:	23
2.2. Prueba 2: Justificación del caballete de ventilación:	27
2.3 Prueba 3: Pulverización:	32
2.4 Prueba 4: Sistema de calefacción:	37
2.5 Conclusiones extraídas de las pruebas realizadas:	49

1. Medidas realizadas en la colmena de estudio en la finca de Boquín (Icod de los vinos):

Con el fin de conocer las condiciones atmosféricas reales en las que se desarrolla el trabajo de las abejas en una colmena, se han realizado medidas de temperatura y humedad en tres posiciones diferentes (cámara de cría, techo y exterior de la colmena) durante el mes de enero de 2014. Con los datos obtenidos que se presentan a continuación, se justifican tanto la necesidad de diseñar e implementar el sistema desarrollado en el presente trabajo de fin de grado como algunos de los parámetros que se han utilizado en el programa de control de éste.

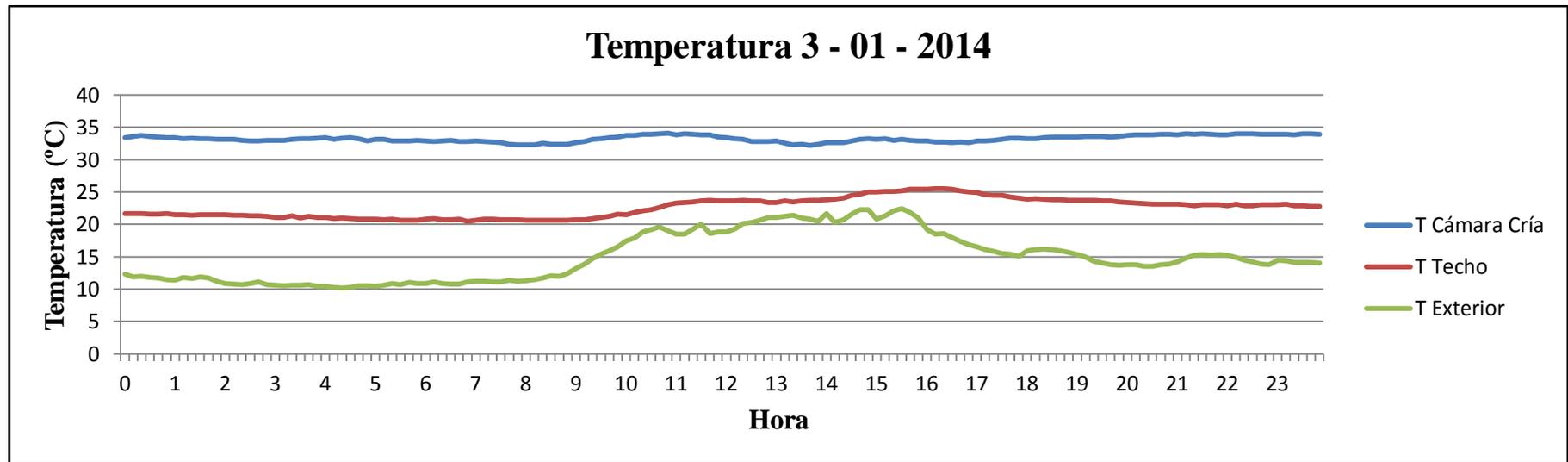


Figura 1.

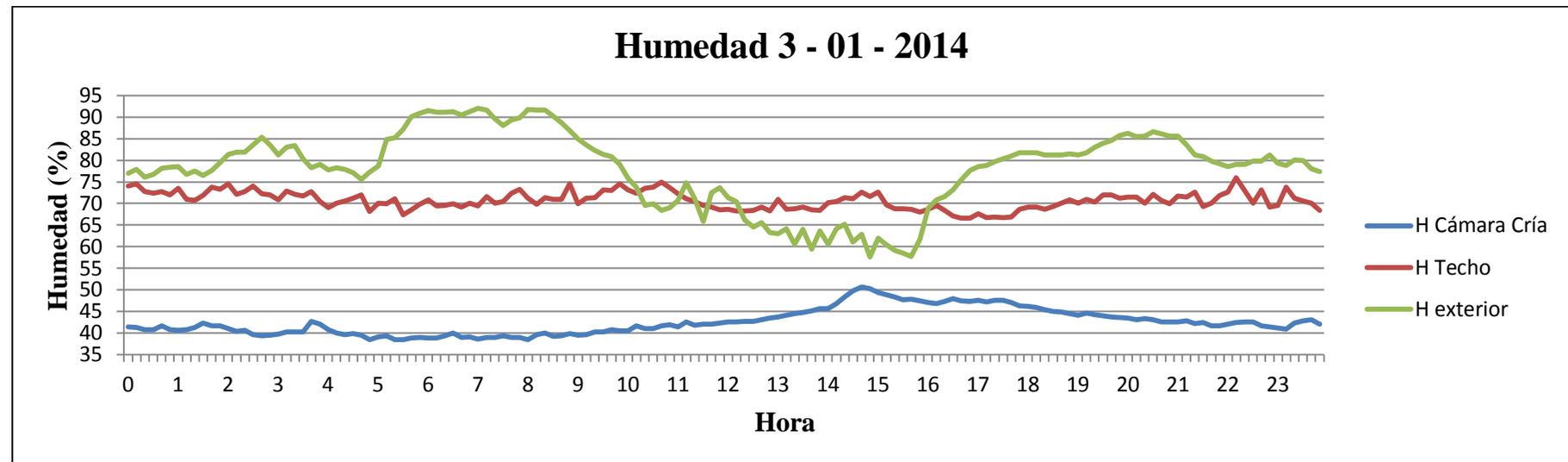


Figura 2.

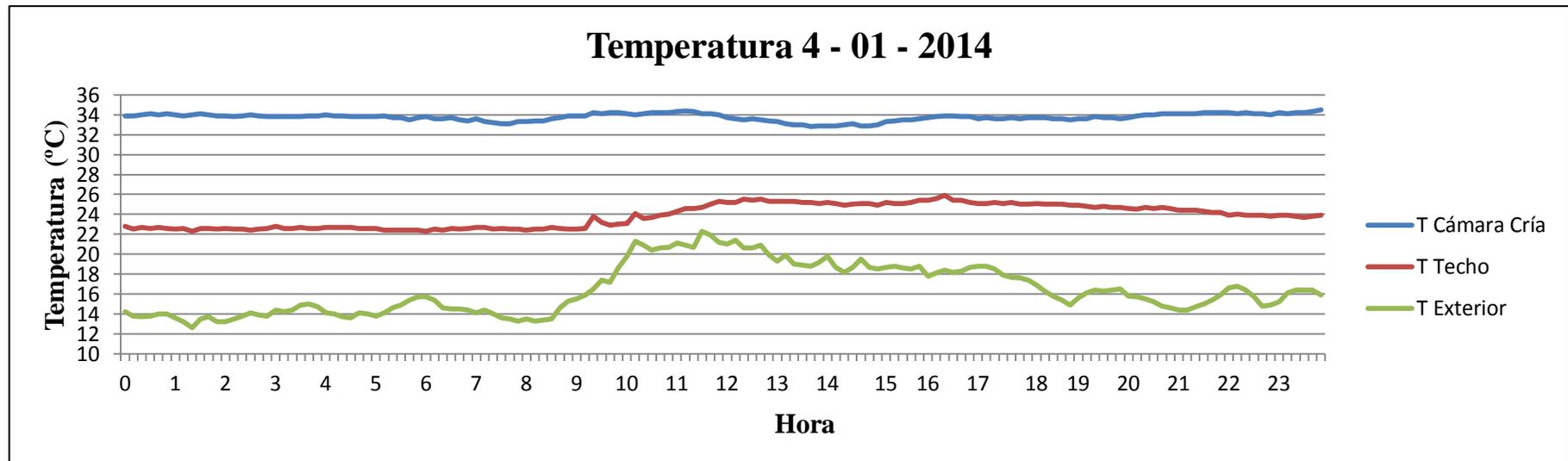


Figura 3.

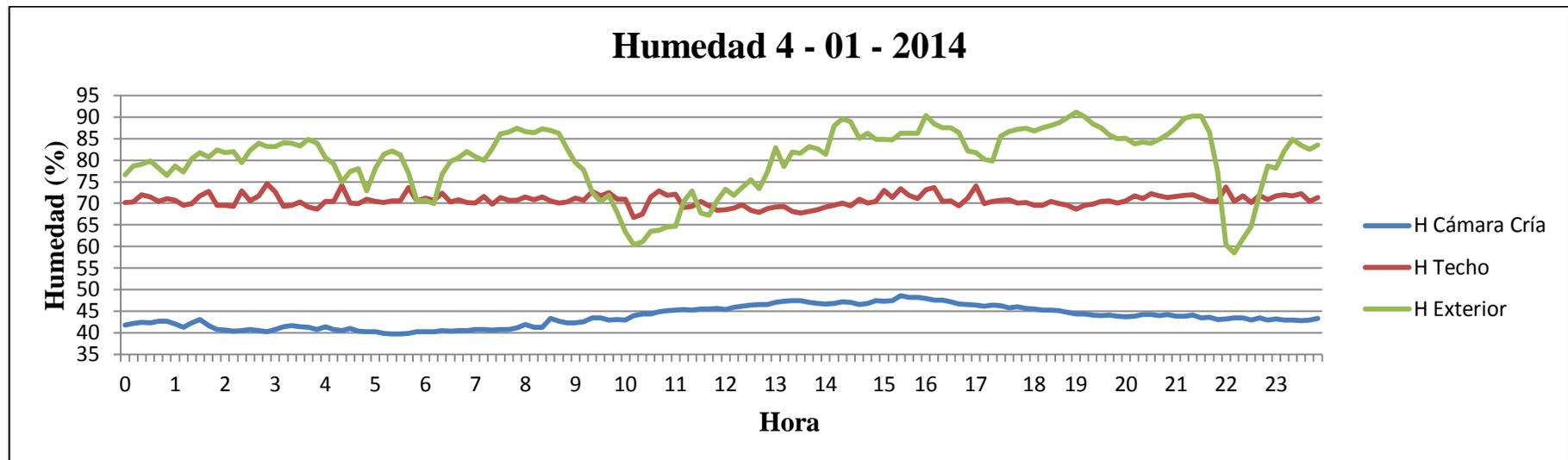


Figura 4.

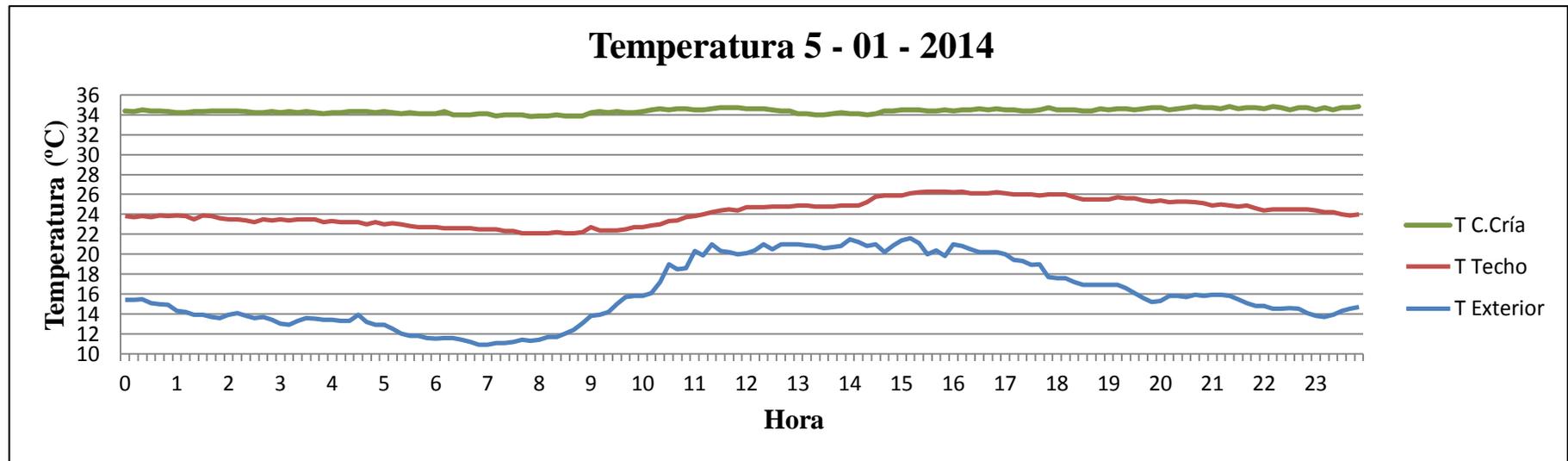


Figura 5.

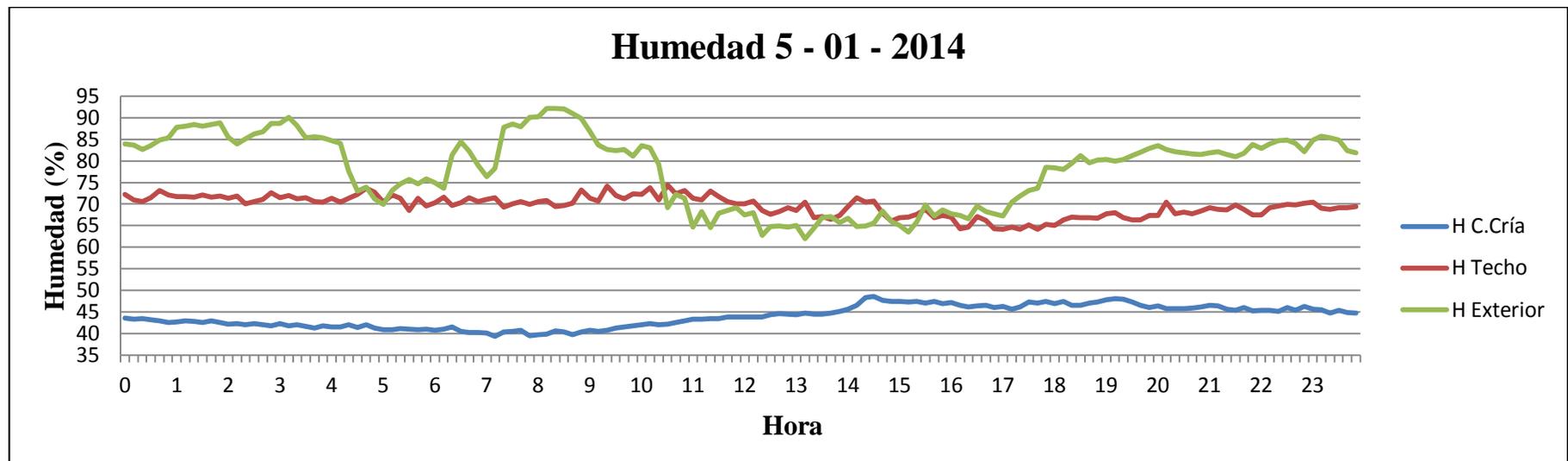


Figura 6.

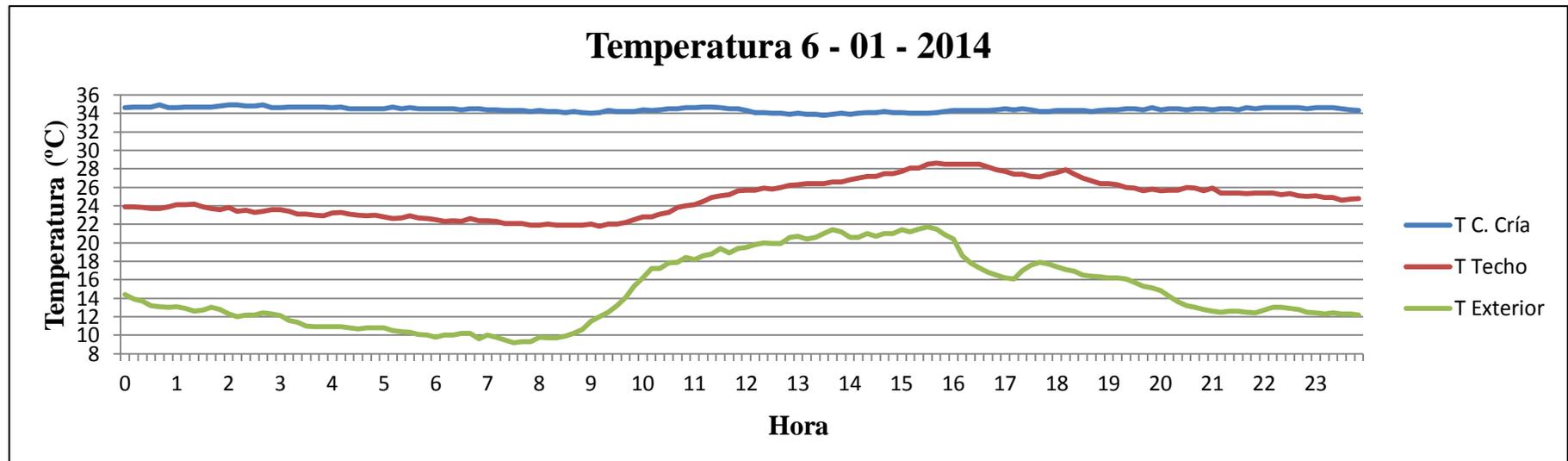


Figura 7.

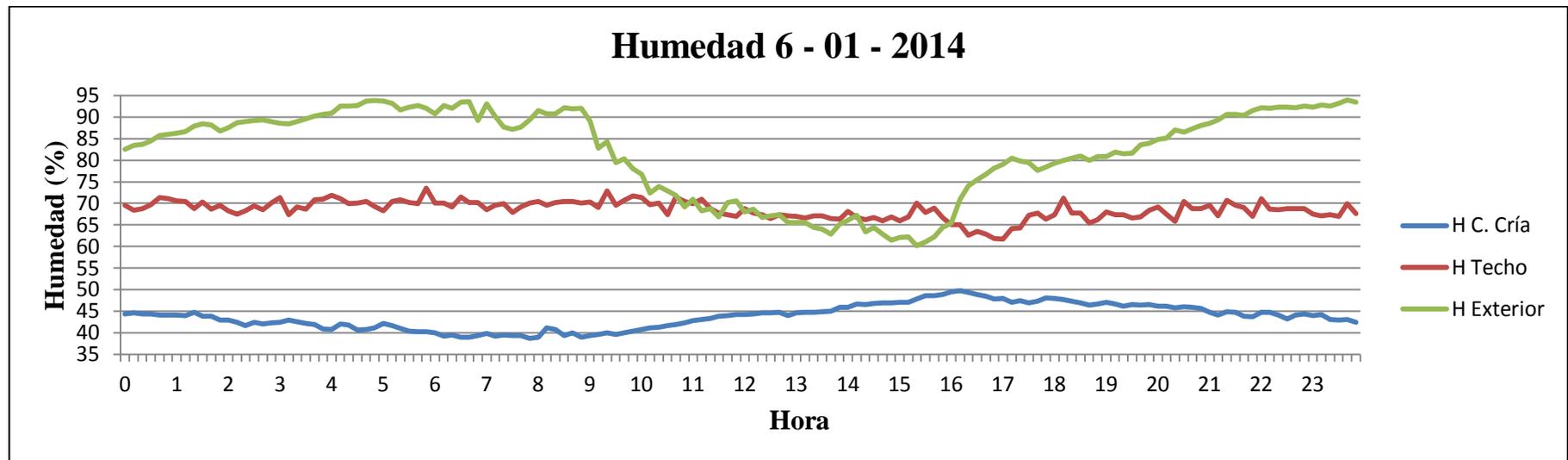


Figura 8.

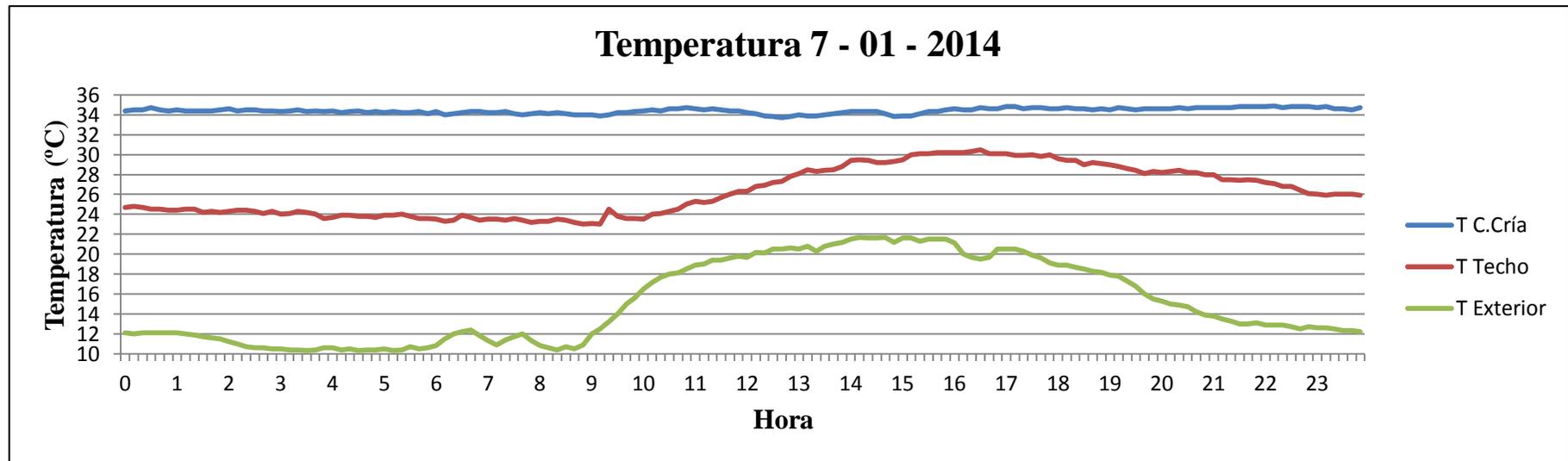


Figura 9.

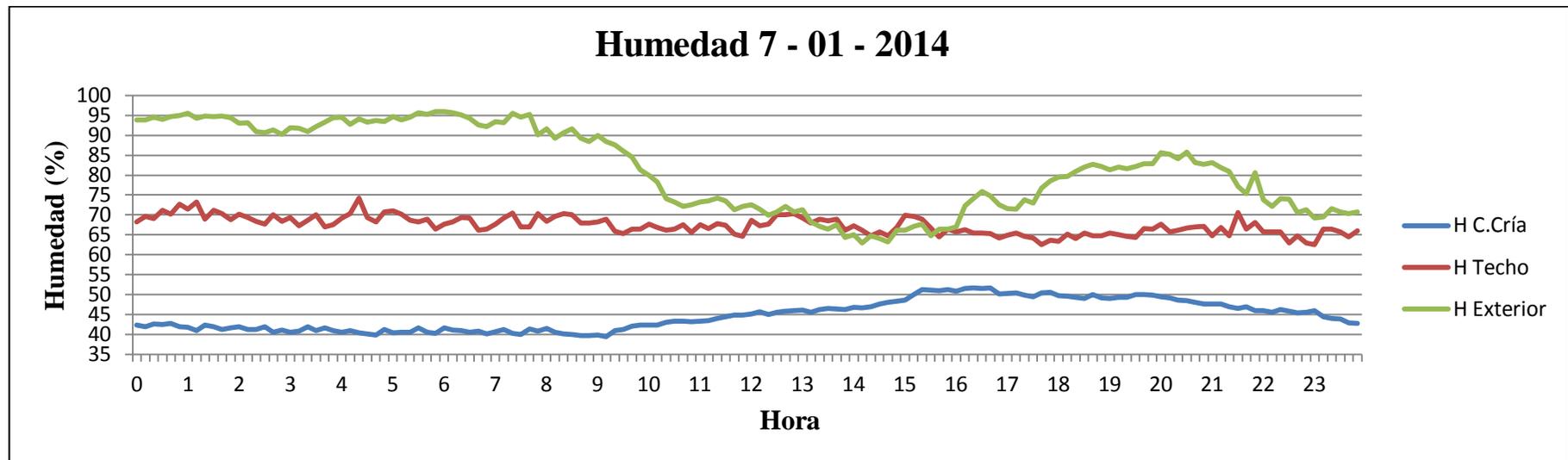


Figura 10.

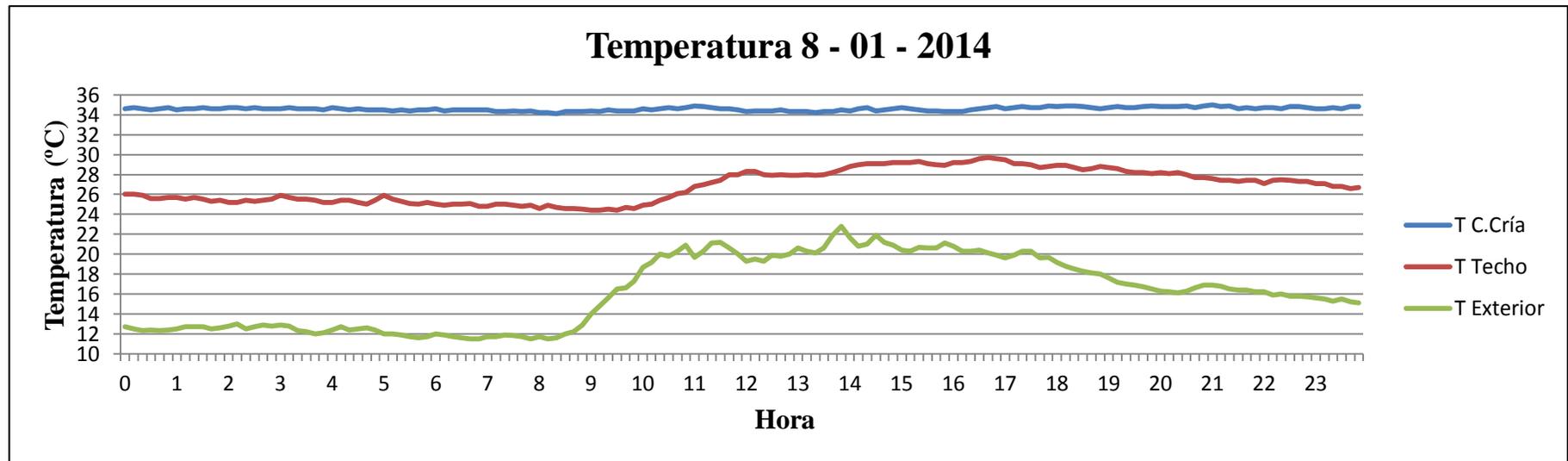


Figura 11.

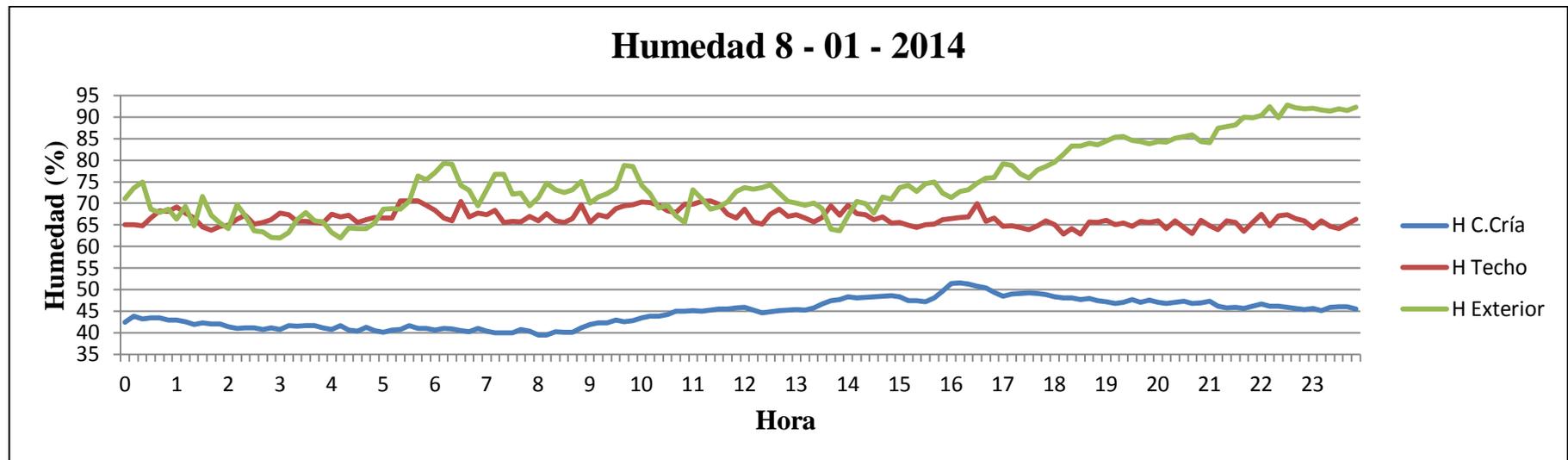


Figura 12.

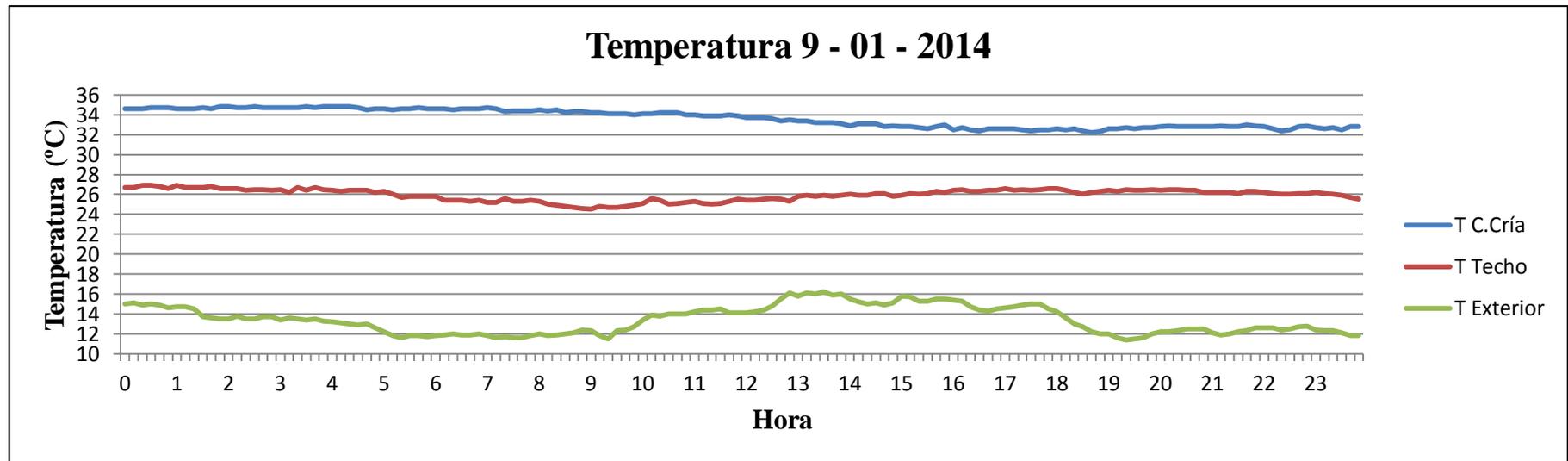


Figura 13.

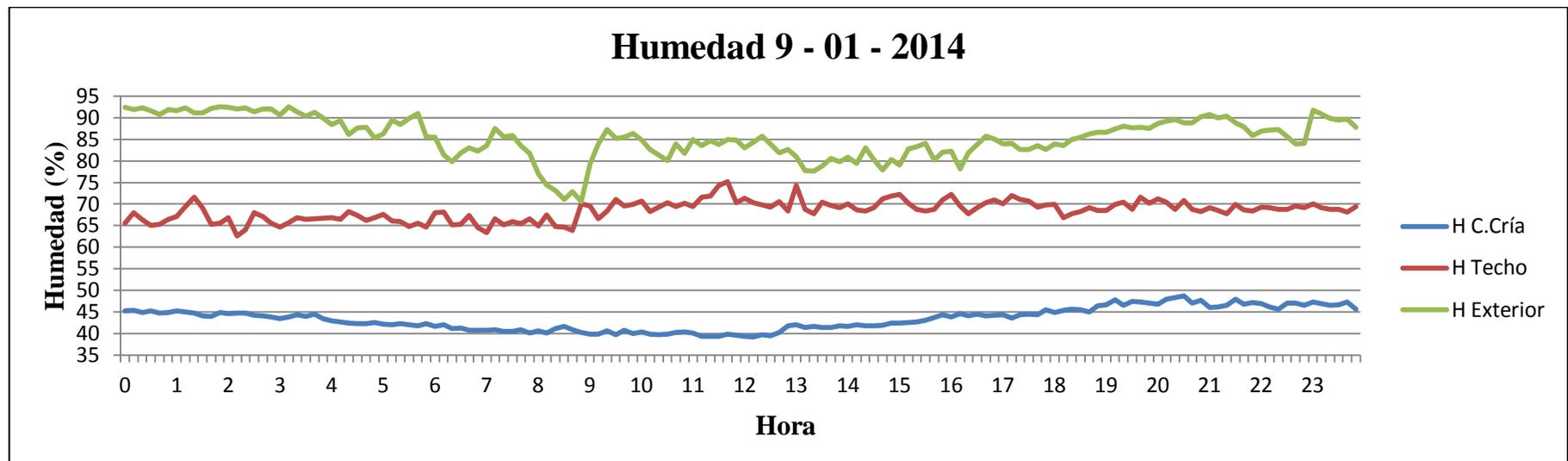


Figura 14.

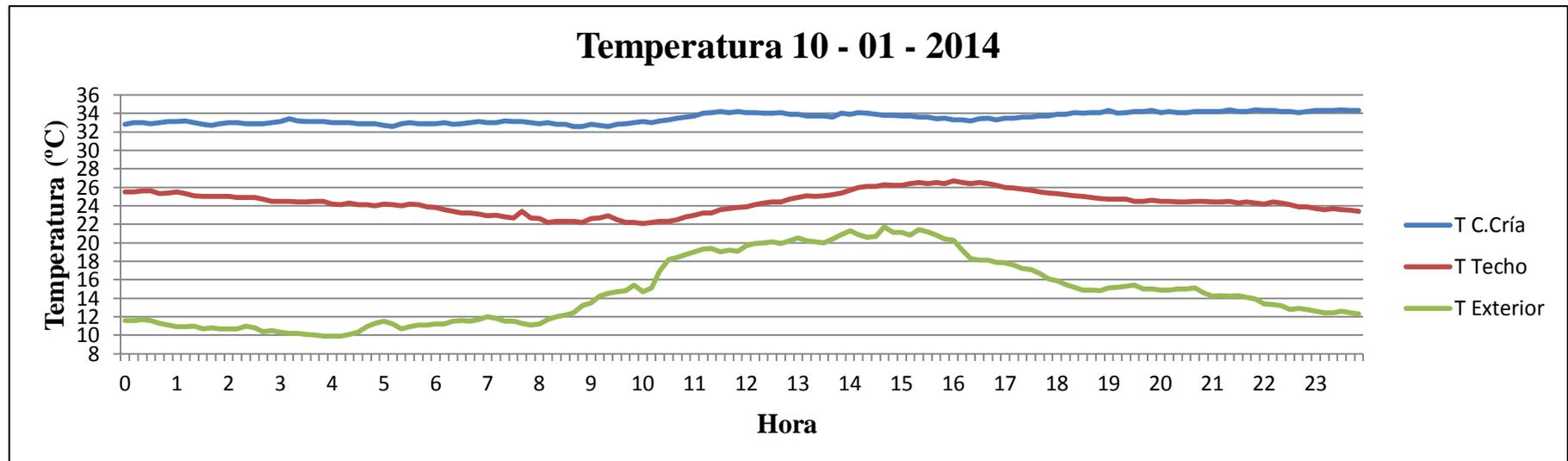


Figura 15.

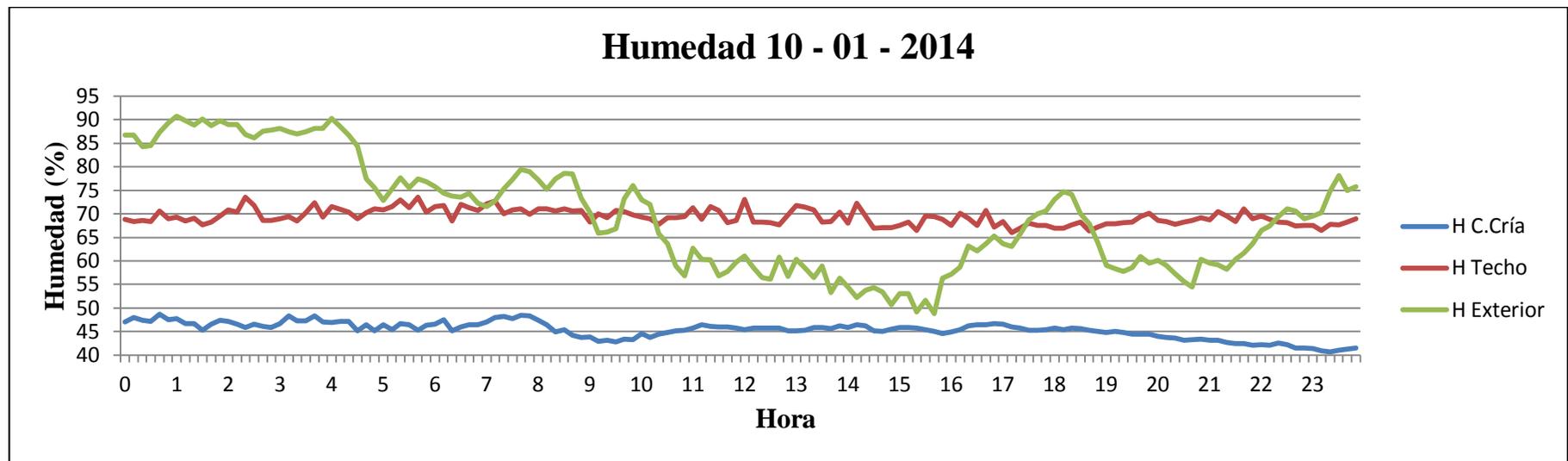


Figura 16.

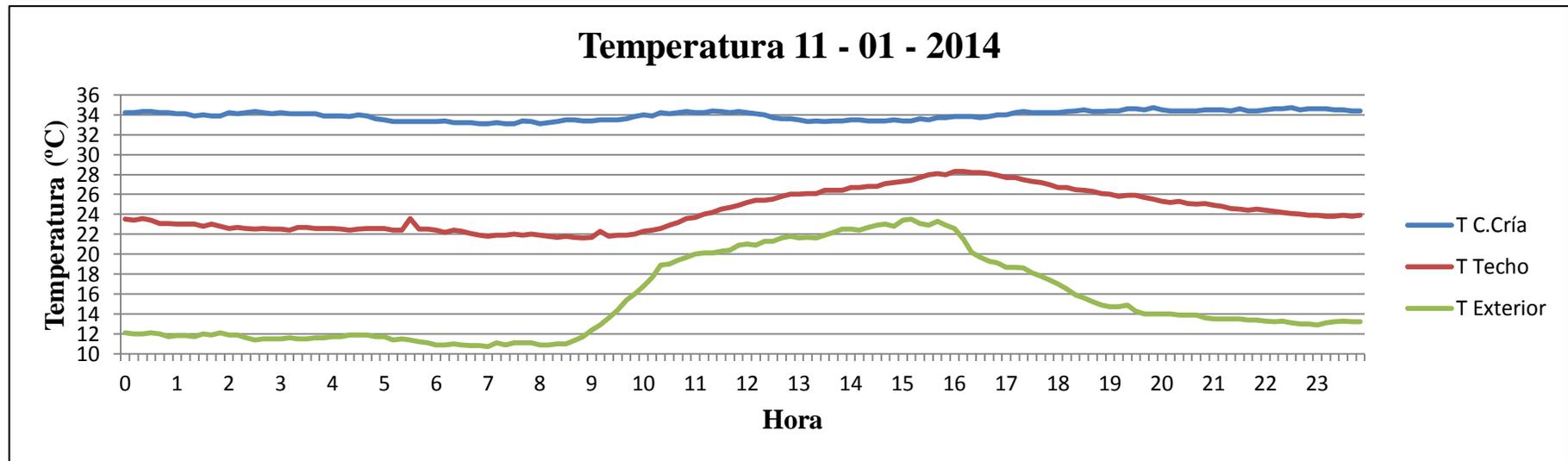


Figura 17.

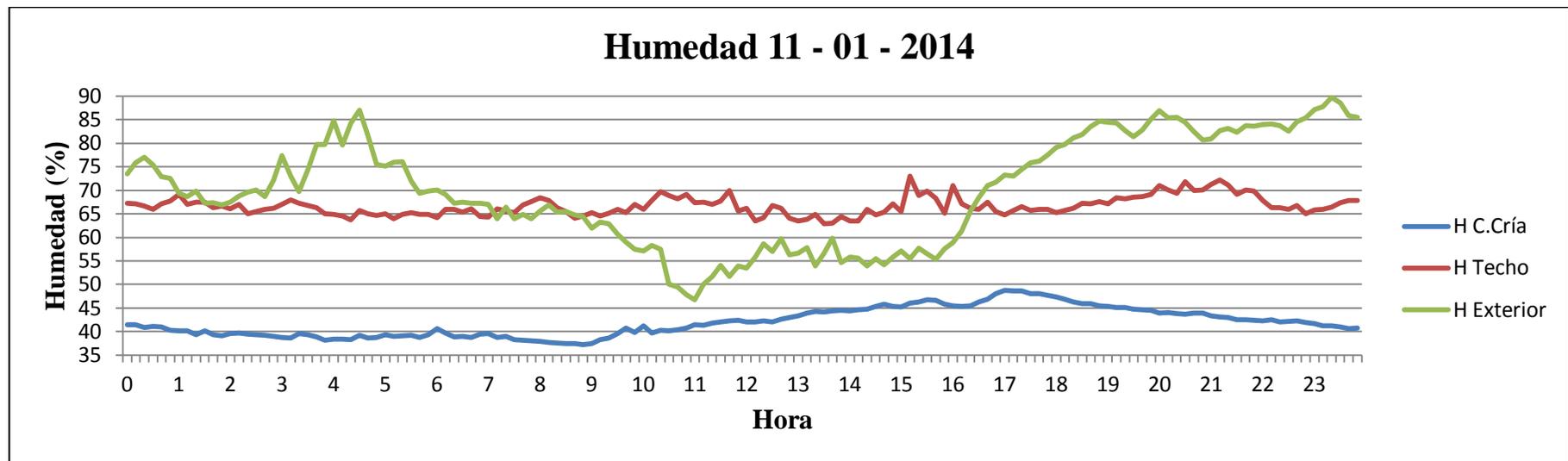


Figura 18.

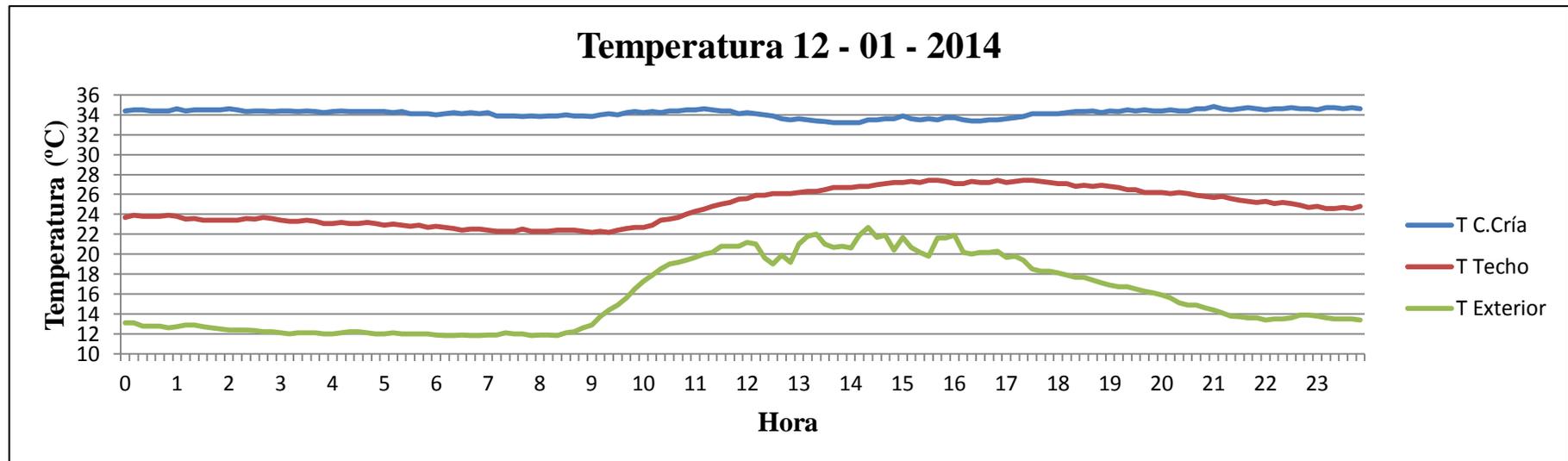


Figura 19.

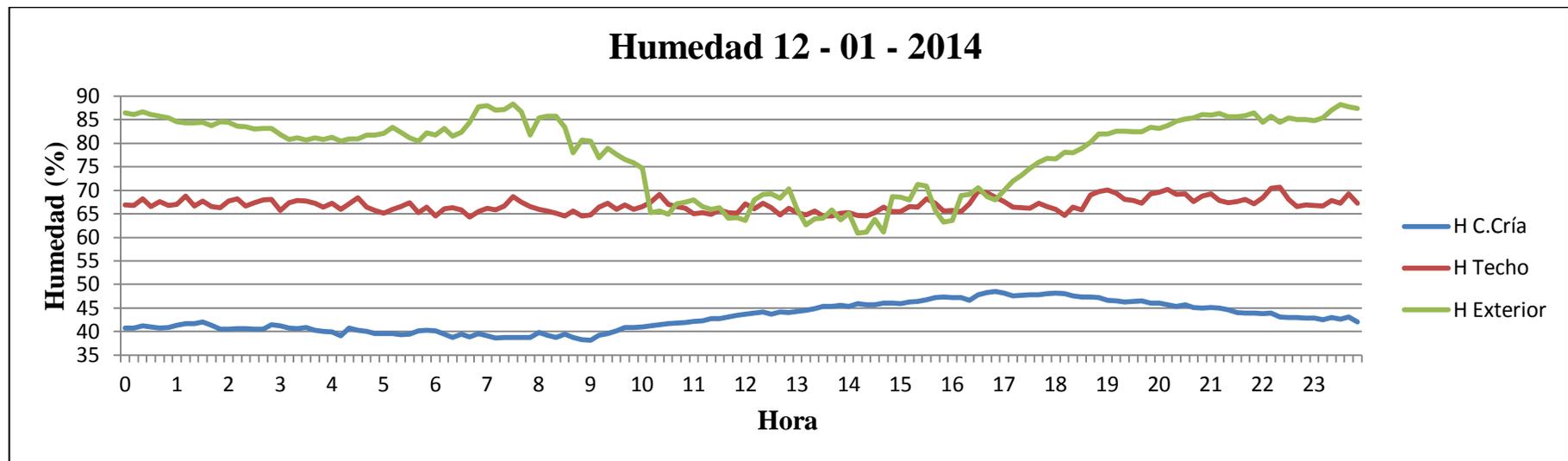


Figura 20.

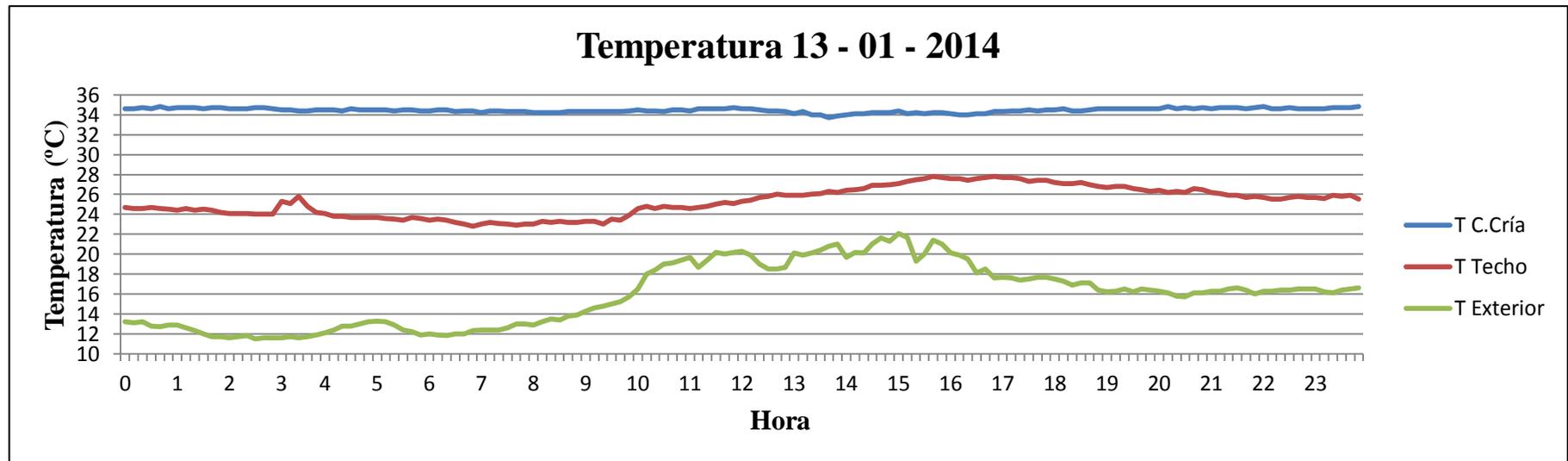


Figura 21.

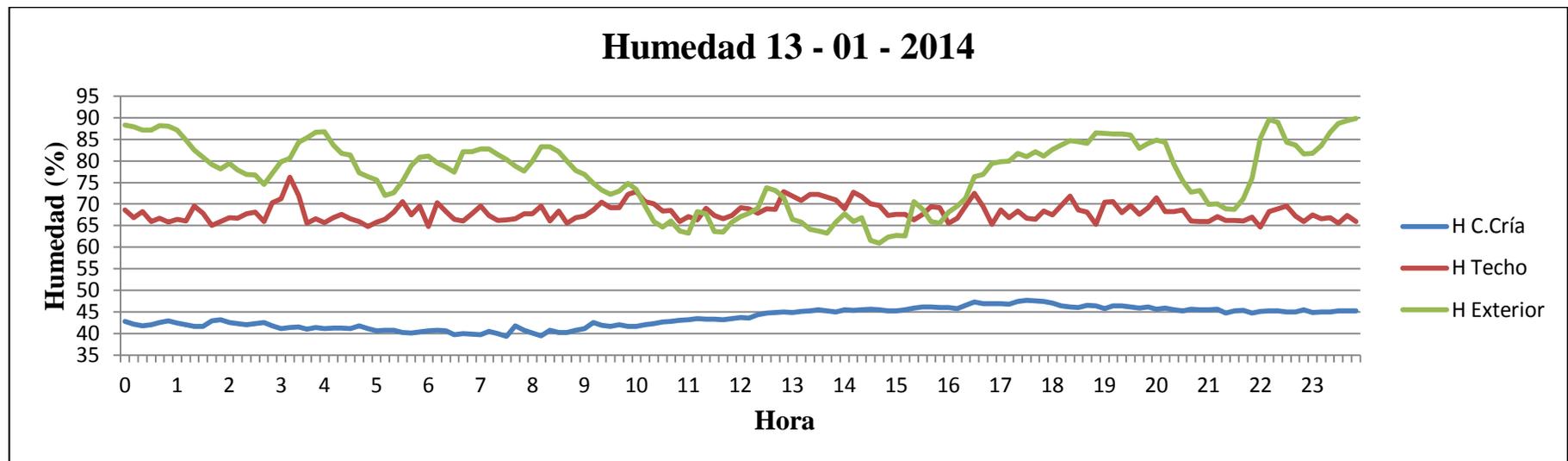


Figura 22.

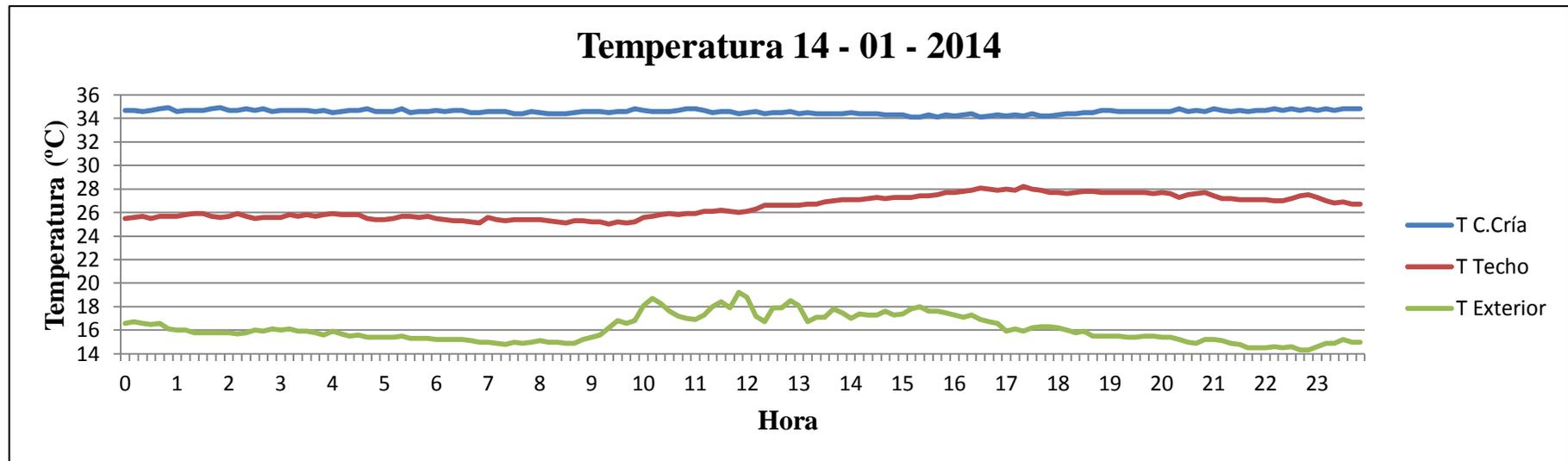


Figura 23.

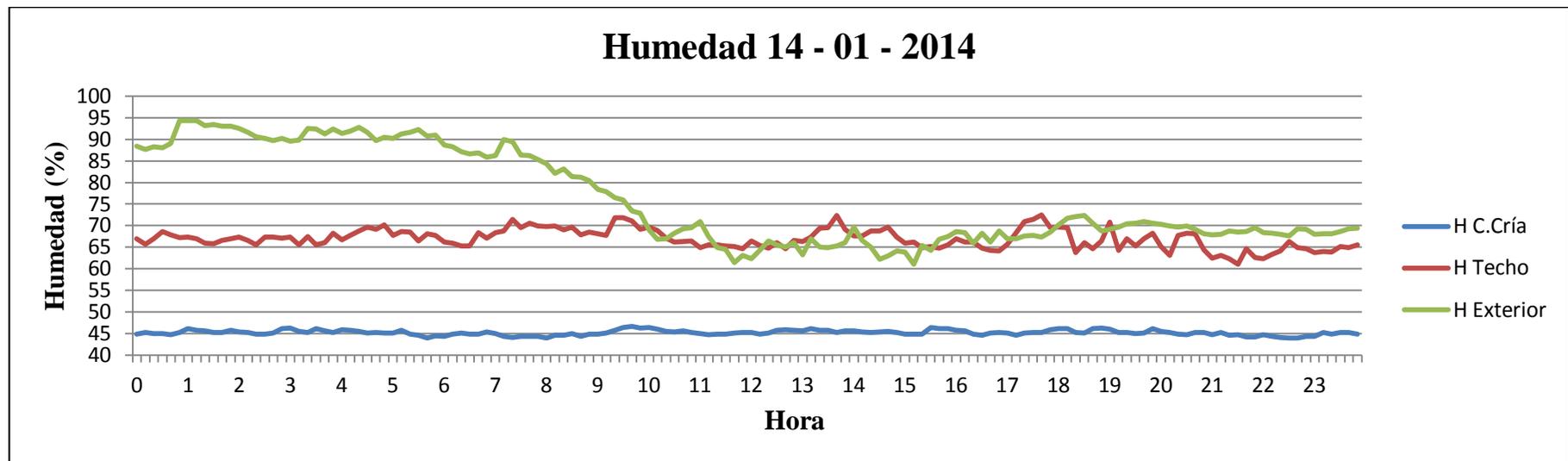


Figura 24.

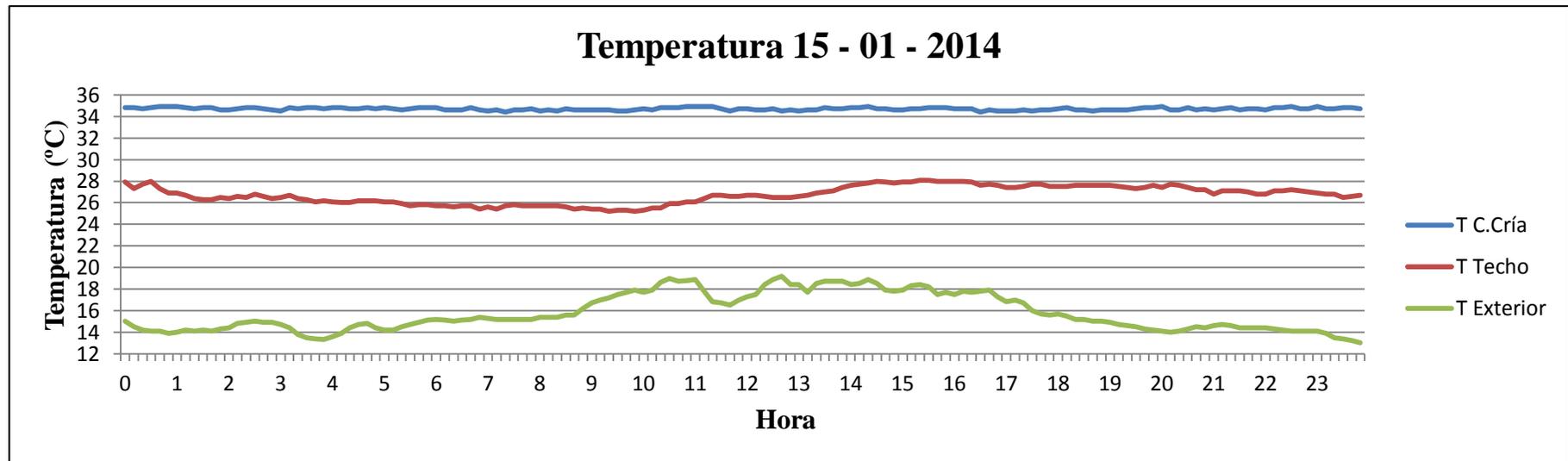


Figura 25.

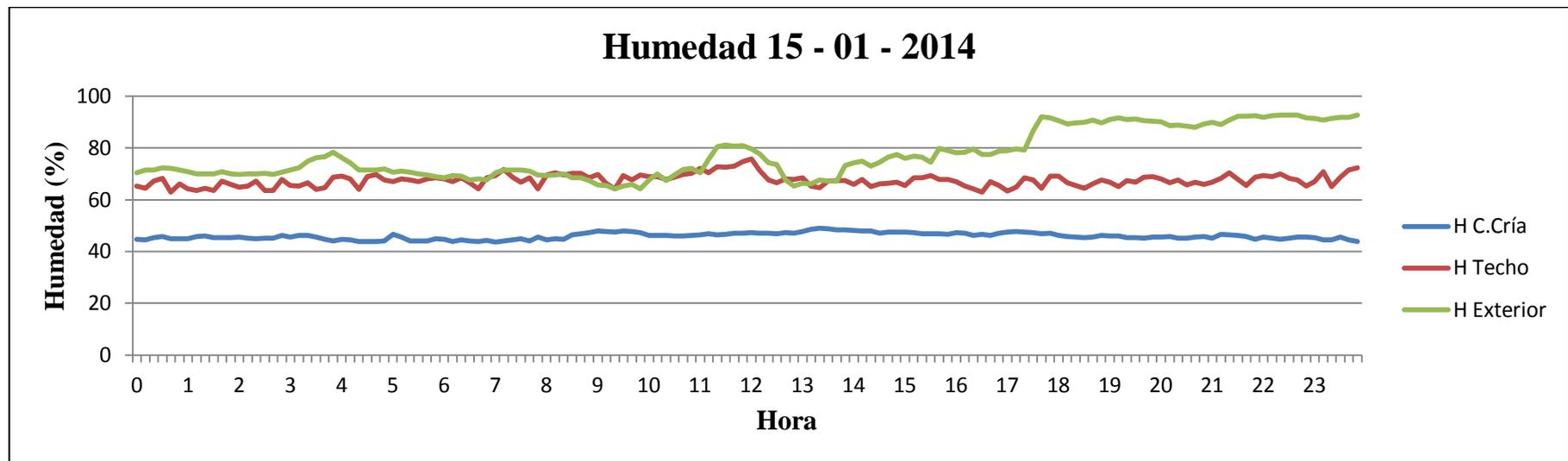


Figura 26.

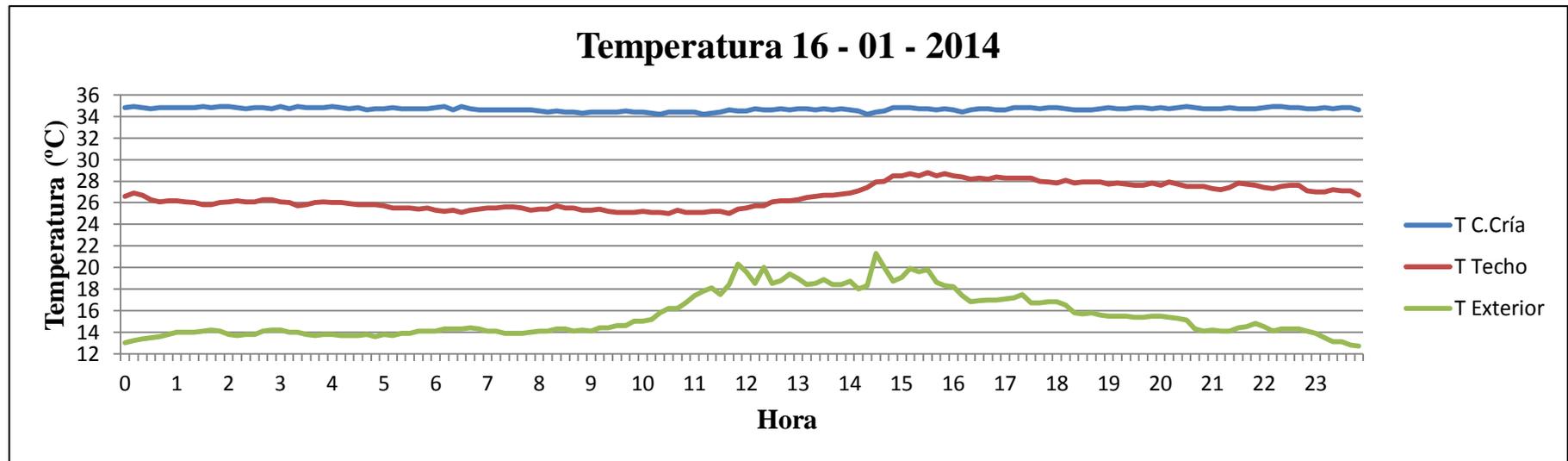


Figura 27.

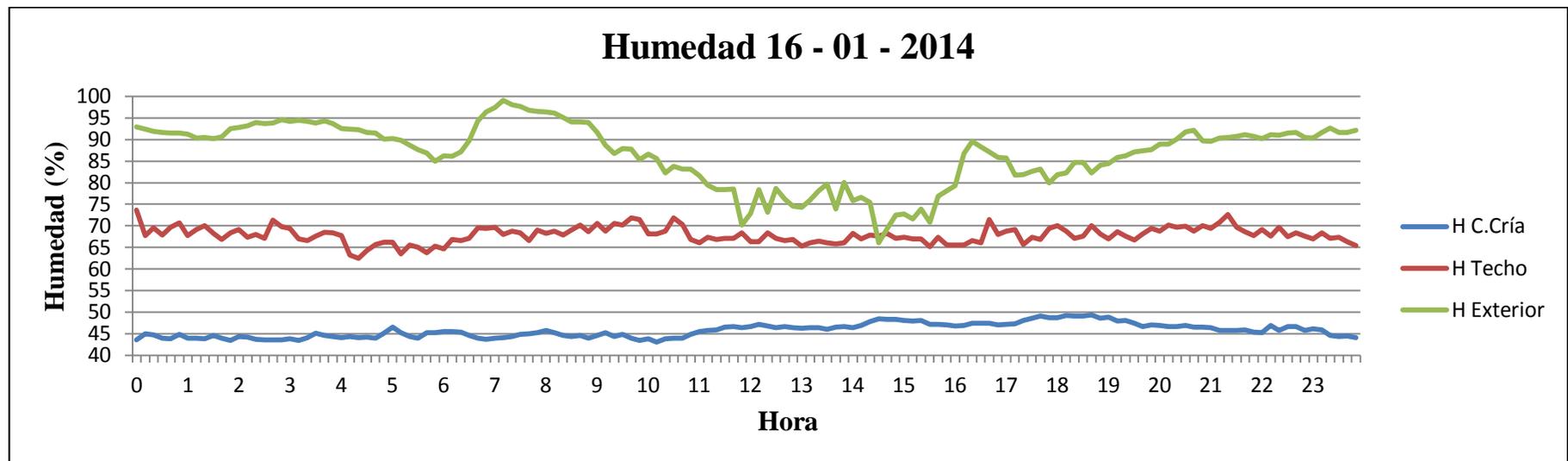


Figura 28.

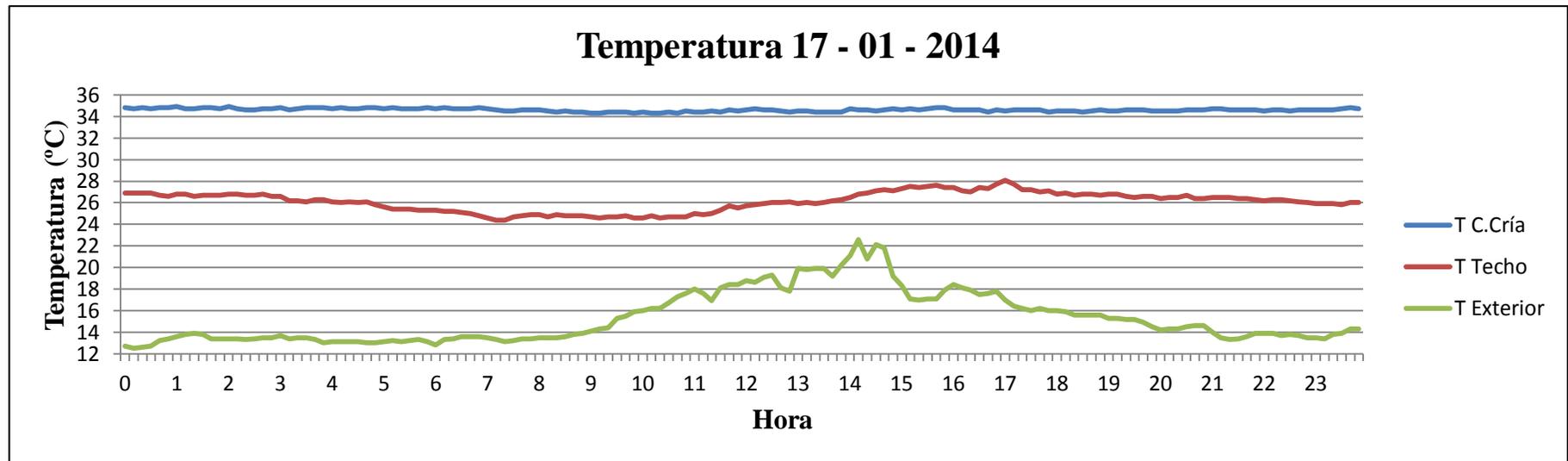


Figura 29.

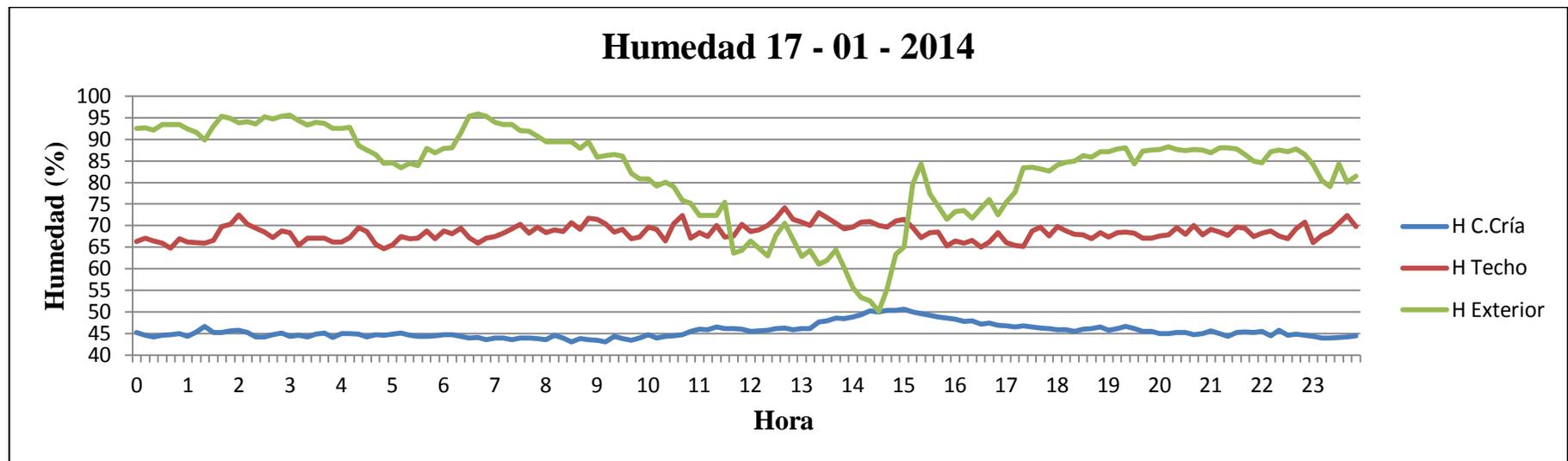


Figura 30.

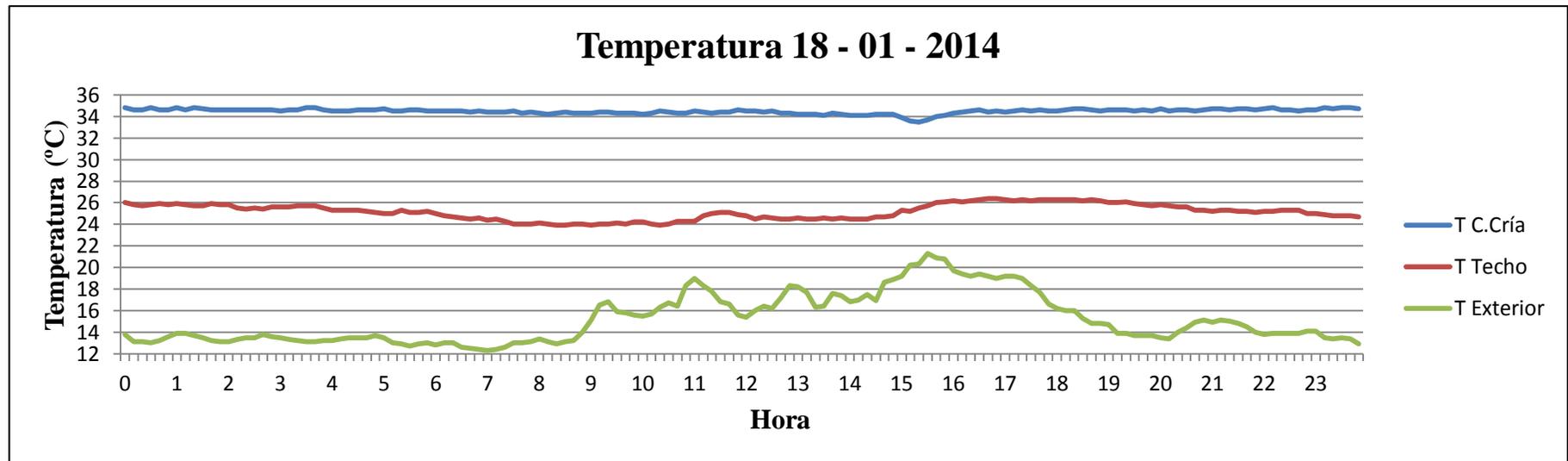


Figura 31.

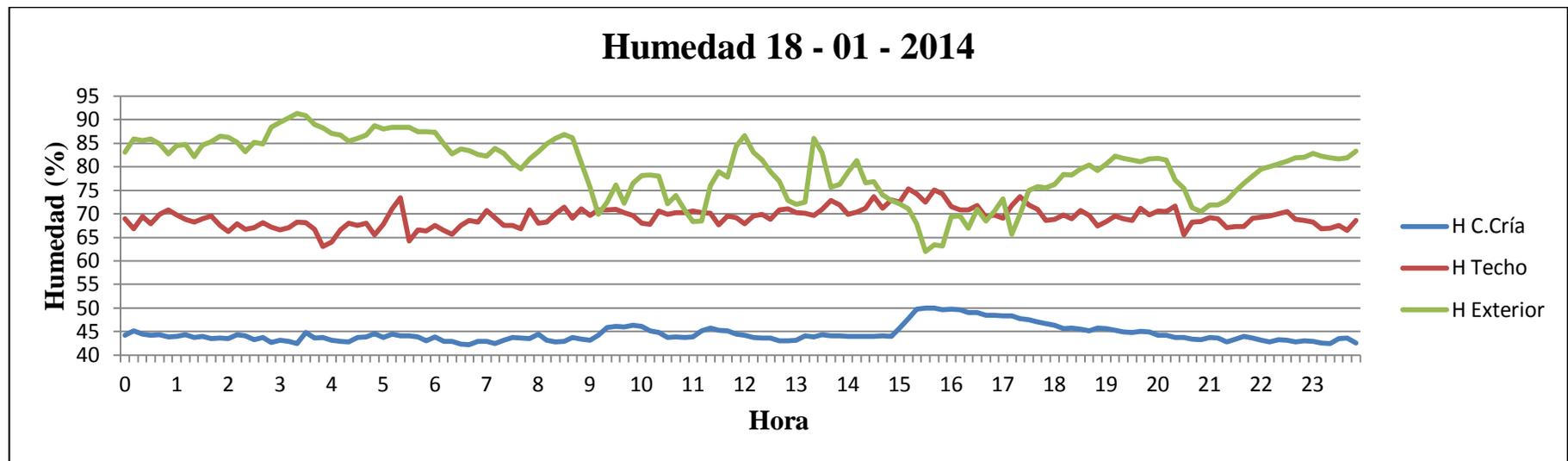


Figura 32.

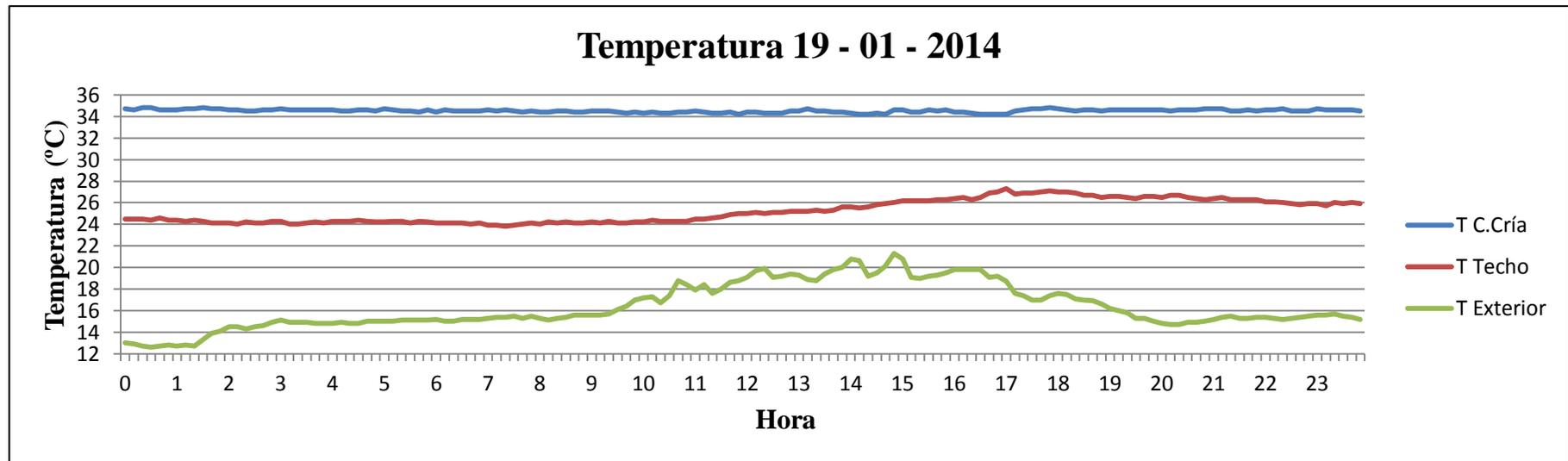


Figura 33.

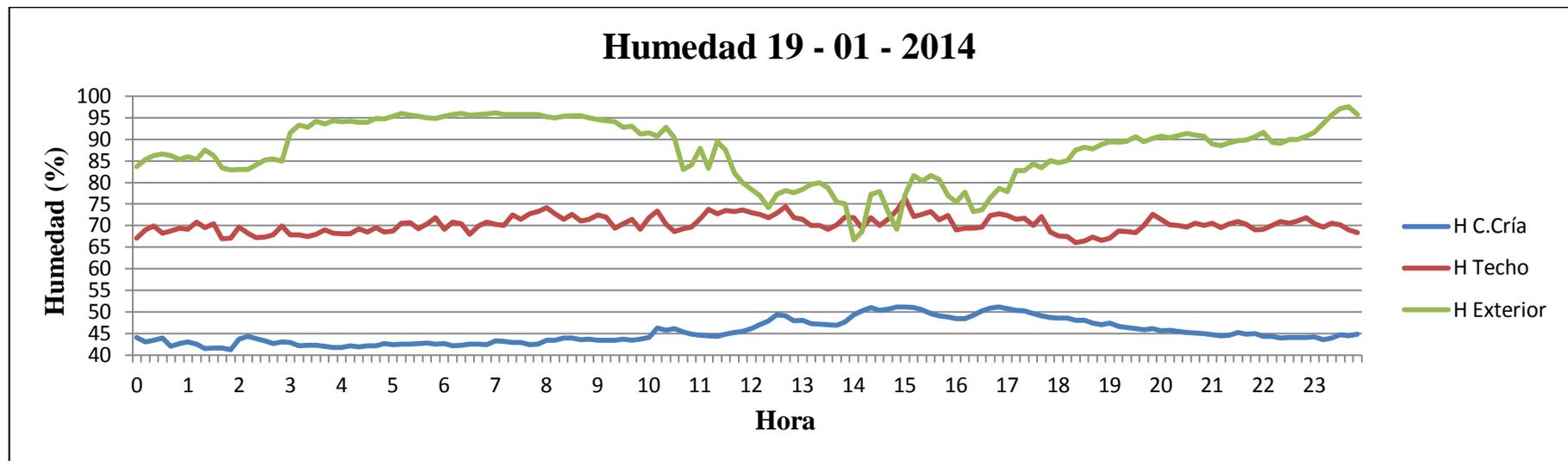


Figura 34.

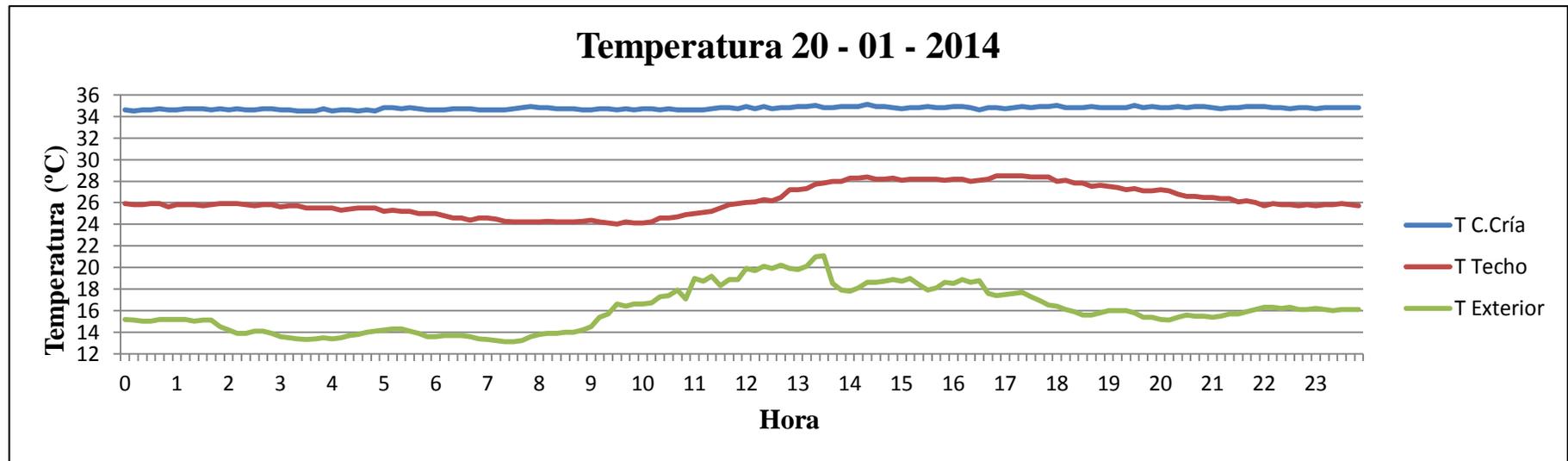


Figura 35.

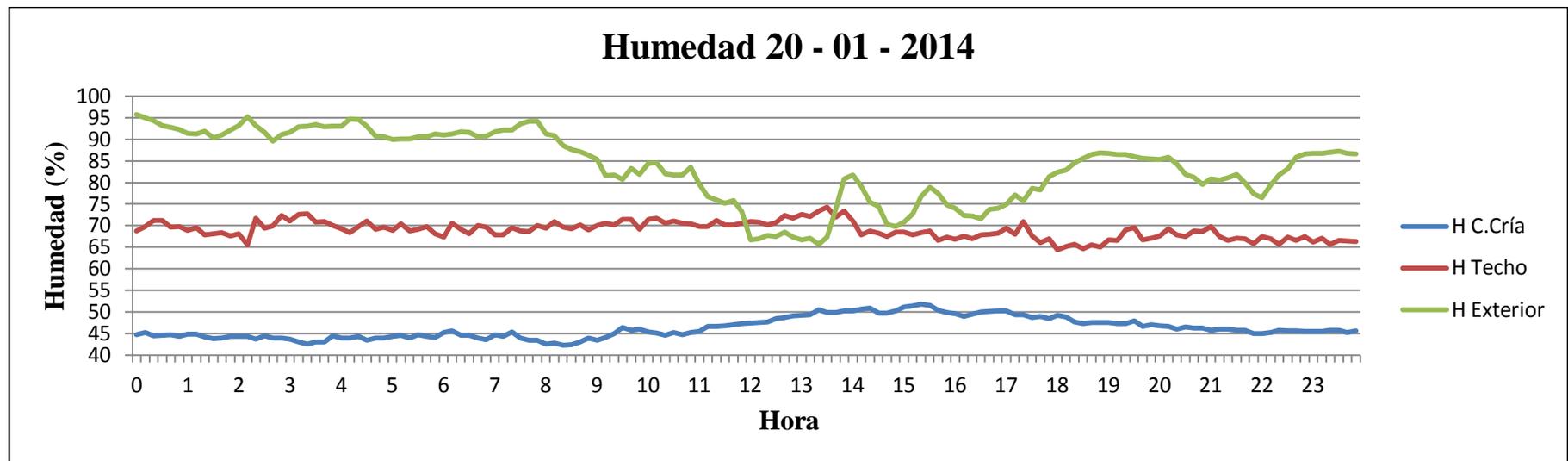


Figura 36.

1.1 Conclusiones extraídas de las mediciones realizadas:

Las medidas han sido realizadas en el mes de enero de 2014, lo cual significa que los resultados obtenidos se corresponden con uno de los periodos más fríos del año. Por ello, aunque estos resultados se utilizan en el diseño del sistema desarrollado, son de mayor relevancia para el diseño y justificación del sistema de calefacción implementado, pues es el actuador al que corresponde entrar en funcionamiento en estas condiciones.

La información más relevante de las gráficas mostradas en el capítulo 1 de este documento es la siguiente:

1.1.1 La diferencia de temperatura máxima entre la cámara de cría y el exterior es de 25.1°C, como se aprecia en la siguiente tabla:

Día	Hora	Minuto	T _{C.CRÍA}	T _{C.CRÍA}	T _{TECHO}	H _{TECHO}	T _{EXTERIOR}	H _{EXTERIOR}
6	7	28	34.3	39.6	22	70.6	9.2	88.3

Tabla 1.

Esto significa que entre el aislamiento de la colmena con el exterior, la masa que hay dentro de la colmena y la actividad de las abejas, hay que sumar la temperatura necesaria para mantener los 35°C en la cámara de cría. Esto justifica el por qué se puede optimizar el rendimiento y salud de una colmena introduciendo un sistema de calefacción que facilite mantener la temperatura constante. De este modo, las abejas tendrán que producir menos calor, reduciendo el consumo de miel y favoreciendo que la actividad que desarrollen se enfoque a la obtención de miel y no de calor.

1.1.2 La diferencia de humedad relativa máxima entre el techo de la colmena y el exterior es de 21.7%, como se aprecia en la siguiente tabla:

Día	Hora	Minuto	T _{C.CRÍA}	T _{C.CRÍA}	T _{TECHO}	H _{TECHO}	T _{EXTERIOR}	H _{EXTERIOR}
11	10	44	34.1	40.6	23.4	69.1	19.7	47.4

Tabla 2.

Si en este instante se abriera el caballete de ventilación, se disminuiría la humedad relativa en el interior de la colmena. Pero antes de realizar dicha acción, hay que estudiar la temperatura exterior, ya que entre ambas variables de estudio (temperatura y humedad), la más restrictiva es la temperatura en el interior de la colmena.

En este caso, la baja temperatura exterior desaconseja la apertura del caballete de ventilación, ya que, si bien reduciría la humedad relativa dentro de la colmena, provocaría también un indeseado descenso de la temperatura. Sin embargo, en meses más cálidos en los que la temperatura exterior no produzca un enfriamiento excesivo en el interior de la colmena, se justifica el uso del caballete como sistema de reducción de humedad relativa en el interior de la colmena, e incluso se puede llegar a utilizar para reducir la temperatura en el interior de ésta si llega a ser más elevada que la del exterior.

1.1.3 El valor de la temperatura en la cámara de cría es bastante aproximado a la consigna (35°C). Como se observa, no llega a alcanzarla exactamente debido a que el sensor no está situado exactamente en el centro de la cámara de cría (centro del cuadro central de la primera planta de la colmena), sino justo encima de dicho cuadro. Se dispuso en dicho lugar por dos motivos:

- Por la dificultad de situar y manipular el sensor en el centro del cuadro.
- Porque se pretendía alterar al sistema lo menos posible.

El hecho de que la temperatura en la cámara de cría esté siempre en 35°C gracias a la acción regulatoria de las abejas justifica por qué no se puede utilizar como variable de entrada del sistema de control (la variable con la que se compara la consigna), a pesar de ser la variable que se quiere controlar.

1.1.4 La diferencia de temperatura entre el techo de la colmena y el exterior se mantiene en un intervalo donde:

- Diferencia mínima: 3.9°C.
- Diferencia máxima: 12.6°C.
- Diferencia media: 9.32°C.

Para mantener estas diferencias de temperatura cuando el sistema diseñado e implementado entre en funcionamiento, se define el parámetro P_1 . Tanto la definición, la explicación como el uso de dicho parámetro se encuentran en el apartado 7.1 (Sistema de calefacción) del capítulo 7 (Condiciones de control) del documento Memoria.

2. Pruebas experimentales:

El sistema implementado ha requerido realizar una serie de pruebas experimentales para obtener el comportamiento de los subsistemas y así poder diseñarlos y coordinarlos de forma que cumplan con los objetivos marcados. Se han tenido que realizar pruebas experimentales debido a que el sistema diseñado se va a implantar en un ecosistema, lo que significa que no se pueden realizar experimentos sobre éste ya que se podrían alterar las condiciones de forma irreparable.

Todas las pruebas se han realizado en una colmena con las mismas características que la colmena real, siendo las únicas diferencias que no está habitada y la ubicación, pues aunque las pruebas también se realizan al aire libre, se realizan a una altitud menor.

A continuación, se van a describir las pruebas experimentales realizadas, los objetivos que se pretendía alcanzar y los resultados obtenidos.

2.1. Prueba 1: Diferentes porcentajes de apertura del caballete de ventilación:

El objetivo de la prueba realizada consiste en determinar la velocidad tras la cual la temperatura en el interior de la colmena desciende con diferentes grados de apertura del caballete de ventilación.

Lo ideal para realizar esta prueba hubiera sido que tanto la temperatura en el interior de la colmena como la del exterior fueran las mismas al iniciar las pruebas, ya que éstas influyen en la velocidad mencionada anteriormente. Como este hecho es imposible que se produzca de forma natural, se ha intentado ajustar con la resistencia calefactora, acercando la temperatura en la biquera a 30°C.

El procedimiento que se ha desarrollado ha sido el siguiente:

- 1) Se dispone la colmena sobre la cual se va a realizar la prueba en su posición correspondiente a las 14:00h.
- 2) La resistencia calefactora comienza a calentar a las 14:12h con el caballete de ventilación totalmente cerrado, y a las 15:25h se desconecta la resistencia.
- 3) El caballete de ventilación se abrirá al 50% a las 15:30h.

- 4) A las 16:30 h se extraen los datos registrados (temperatura en la biquera, cámara de cría, techo y exterior) referentes a la posición 1 (50% de apertura).
- 5) A las 16:35h, se conecta la resistencia calefactora, y comienza a calentar con el caballete de ventilación totalmente cerrado, y a las 17:55h se desconecta la resistencia.
- 6) A las 18:00, el caballete de ventilación se abre al 100% (posición 2).
- 7) A las 19:00, se extraen los datos registrados referentes a la posición 2 y se da por finalizada la prueba.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

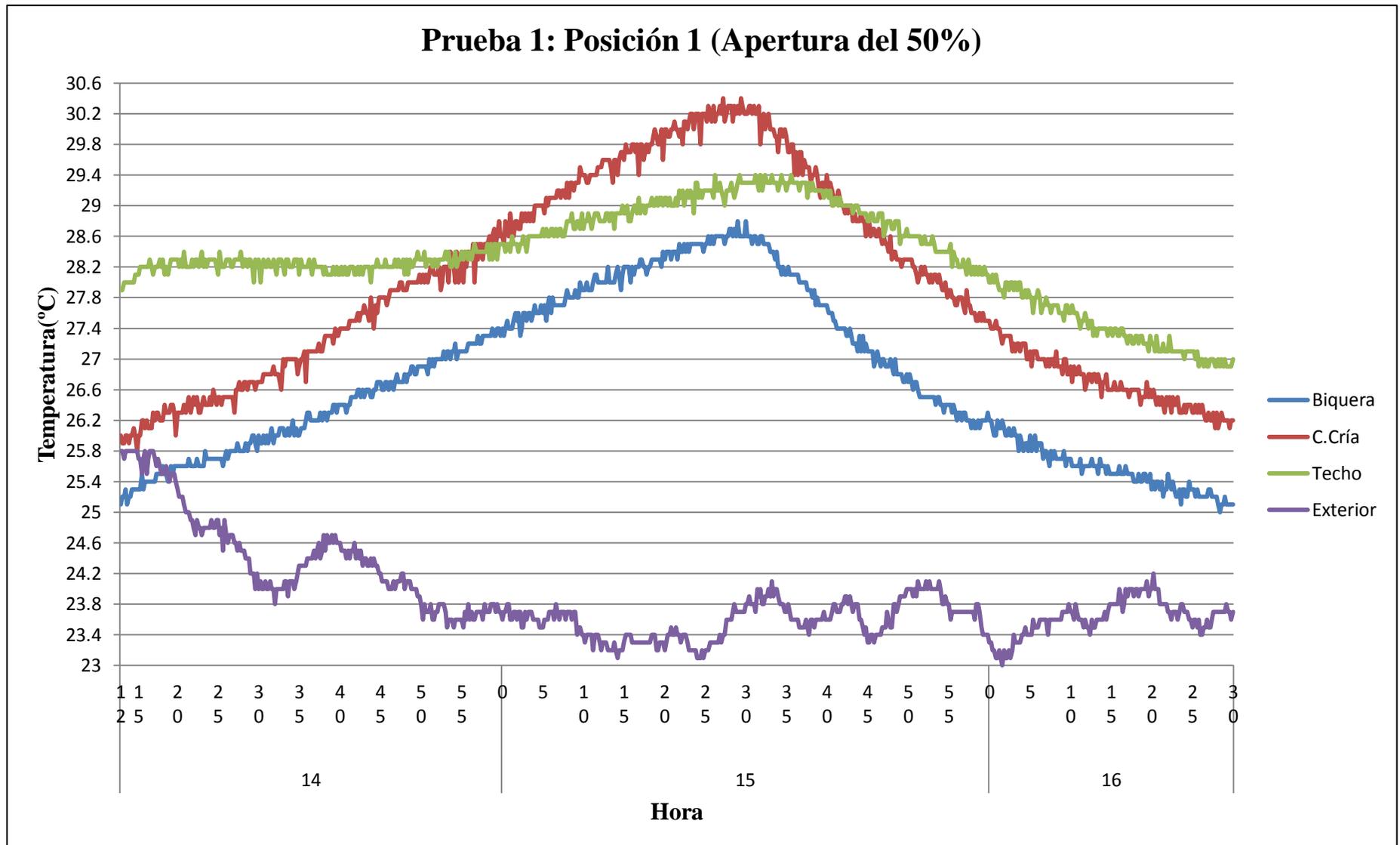
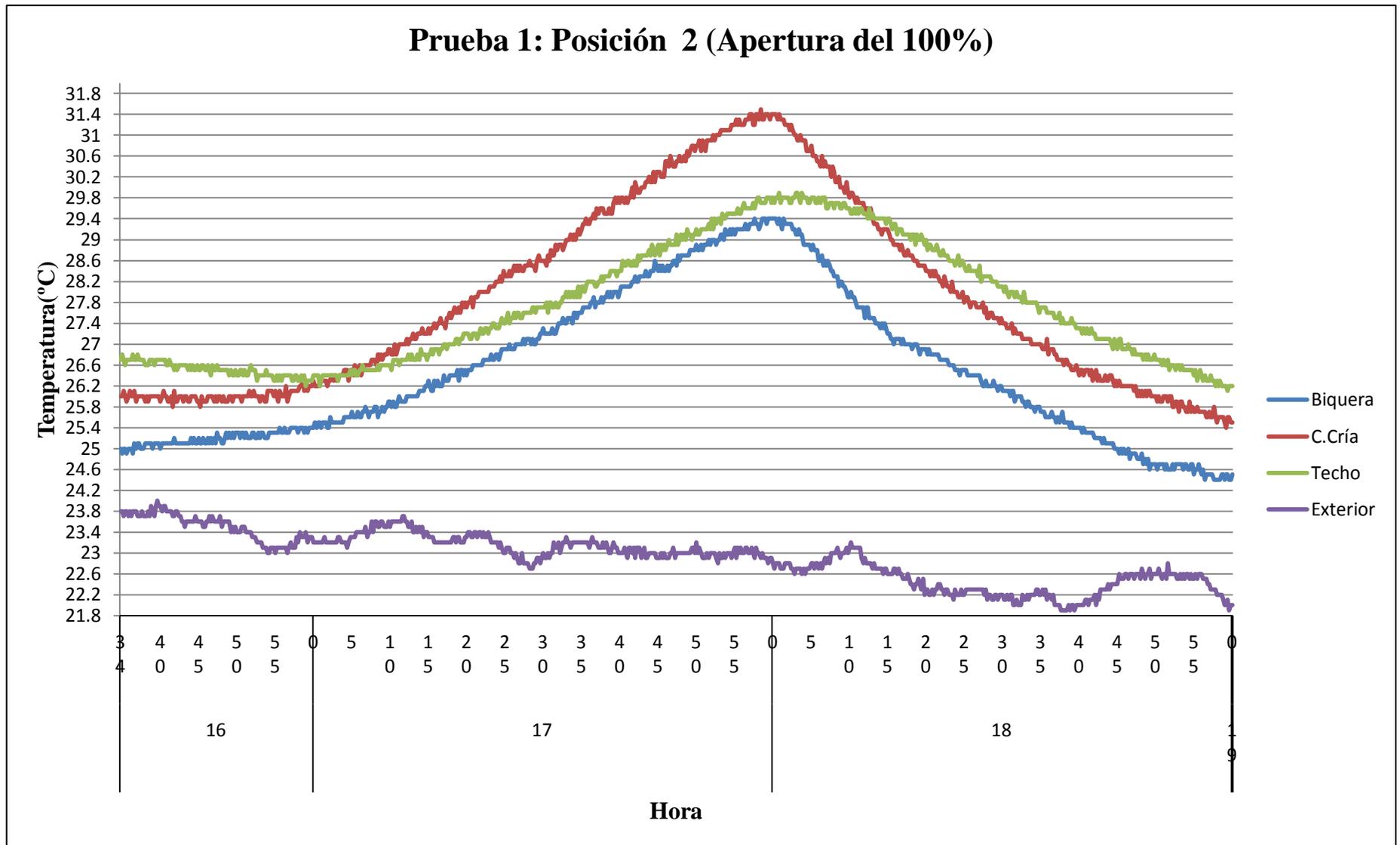


Figura 37.



El intervalo de temperatura que desciende durante 1 hora cuando la apertura es del 50% es 3.6°C, tal y como se puede observar en la figura 37, mientras que cuando la apertura es del 100% es 4.9°C (figura 38). La diferencia de velocidades entre una posición y otra es de 1.3°C/hora. Es normal que cuanto mayor sea la apertura, más rápido descienda la temperatura. Sin embargo, la diferencia no es tan grande como para escoger este método, debido a que la implementación de éste requiere de sensores más caros y un software más complejo. Además, cuando se den las condiciones de control para activar la apertura del caballete de ventilación, se quiere que el exceso de temperatura se elimine lo antes posible, lo que significa que siempre se va a requerir una apertura máxima. Por ambos motivos, el método de control implementado para el caballete de ventilación es un control todo o nada.

2.2. Prueba 2: Justificación del caballete de ventilación:

El objetivo de la prueba realizada consiste en justificar el funcionamiento del caballete de ventilación, verificando que con la apertura de éste y con una temperatura mayor en el interior de la colmena que en el exterior, la temperatura en el interior desciende. La misma explicación es válida para el caso de la humedad relativa interior.

Lo ideal para realizar esta prueba hubiera sido hacerla en verano, de forma que la temperatura en el interior de la colmena alcanzara una temperatura y humedad relativa superiores a la deseada de forma natural. Sin embargo, debido a que el presente trabajo de fin de grado no se ha desarrollado en los meses de verano, este comportamiento se ha tenido que forzar de forma artificial mediante la actuación de una resistencia calefactora durante cierto tiempo.

En concreto, el procedimiento desarrollado durante la prueba ha sido el siguiente:

- 1) Se dispone la colmena sobre la cual se va a realizar la prueba en su posición correspondiente a las 11:36h.
- 2) A las 11:45h, se conecta la resistencia calefactora.
- 3) A las 13:30h, se desconecta la resistencia calefactora, debido a que en el interior de la colmena ya se ha alcanzado una temperatura suficiente para realizar la prueba (superior a la temperatura exterior).
- 4) A las 13:57h, el caballete de ventilación se abre completamente.
- 5) Se toman datos de temperatura y humedad en la biquera, cámara de cría, techo y exterior desde que se inicia el experimento hasta las 19:30h.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas:

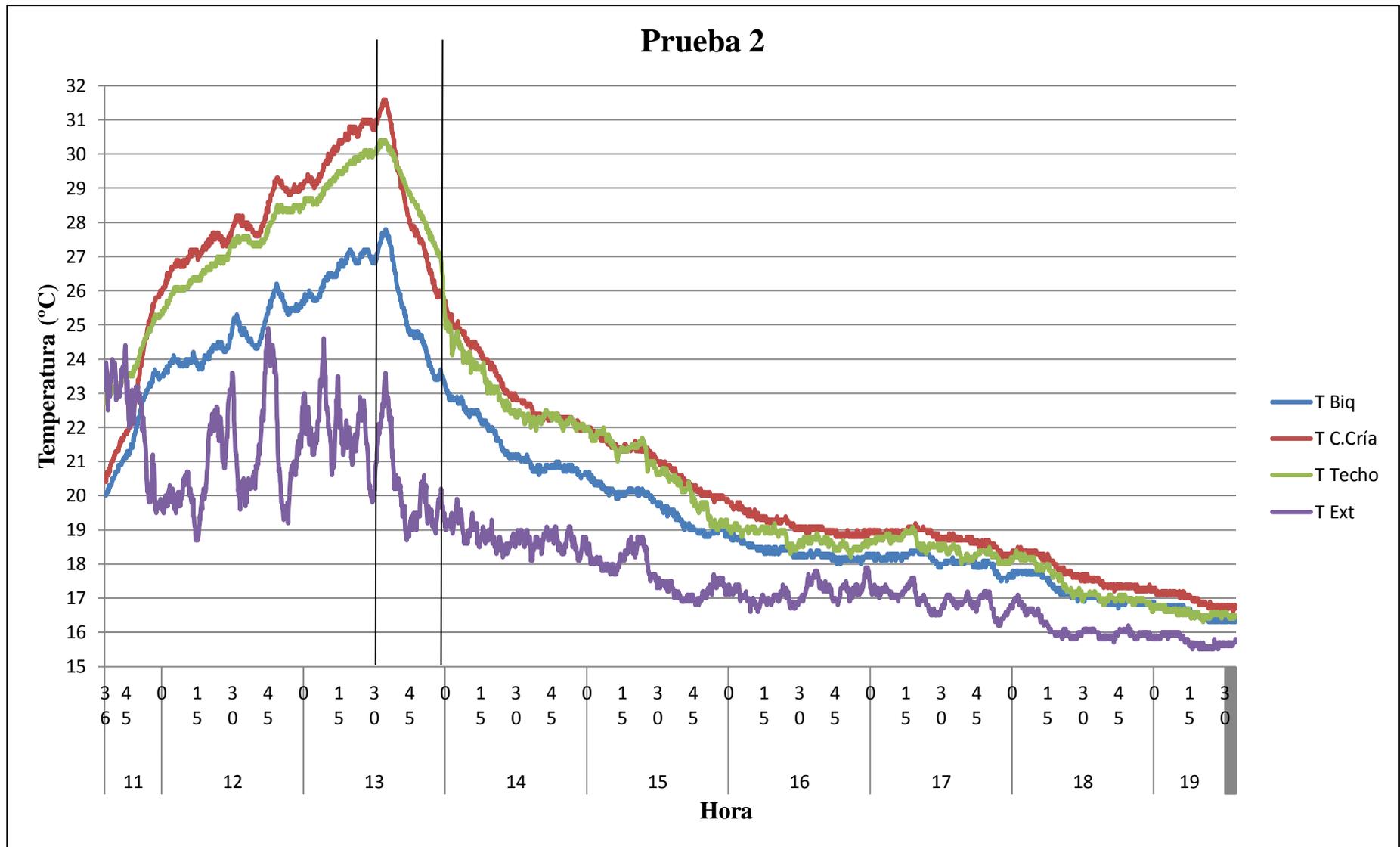


Figura 39.

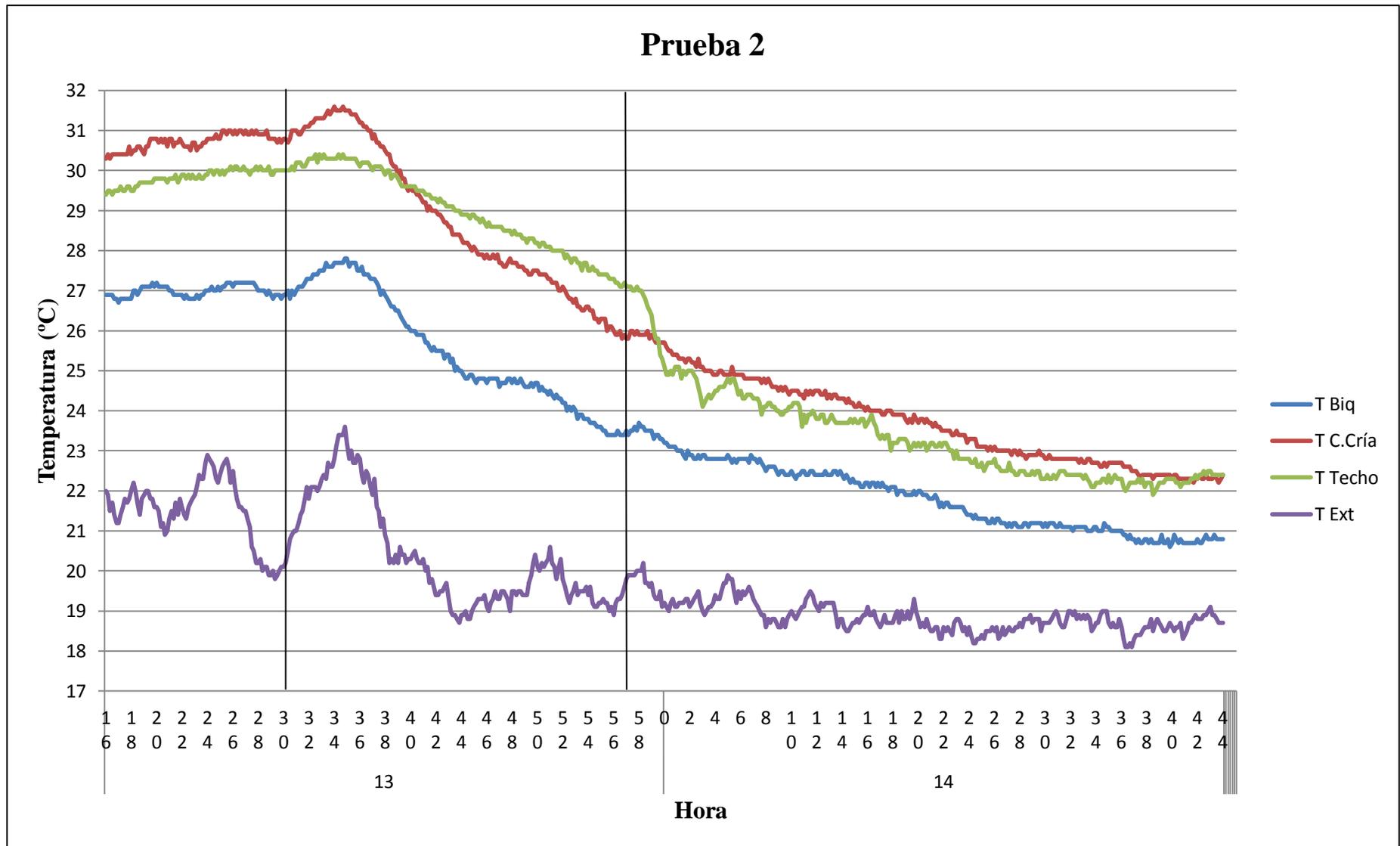


Figura 40.

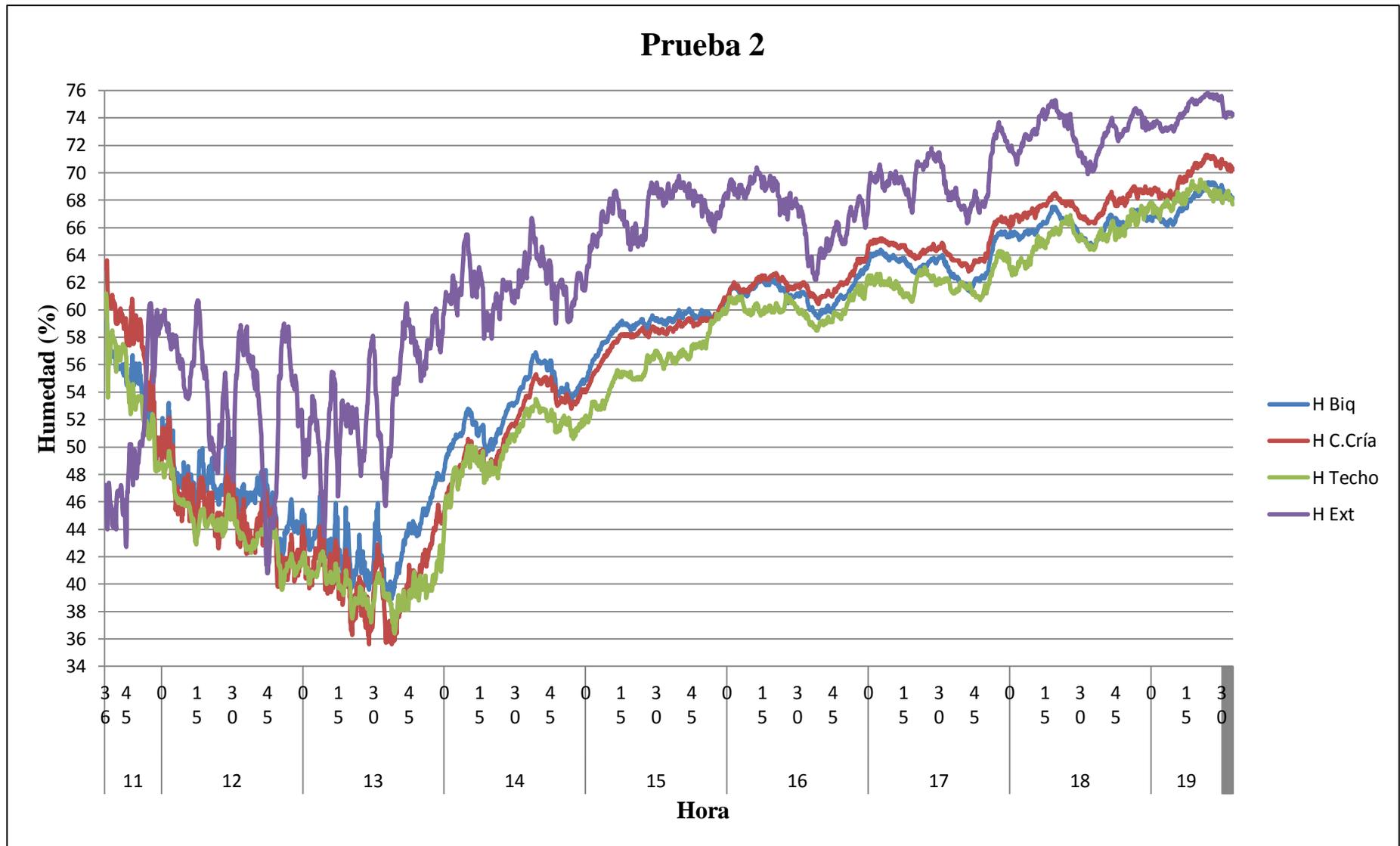


Figura 41.

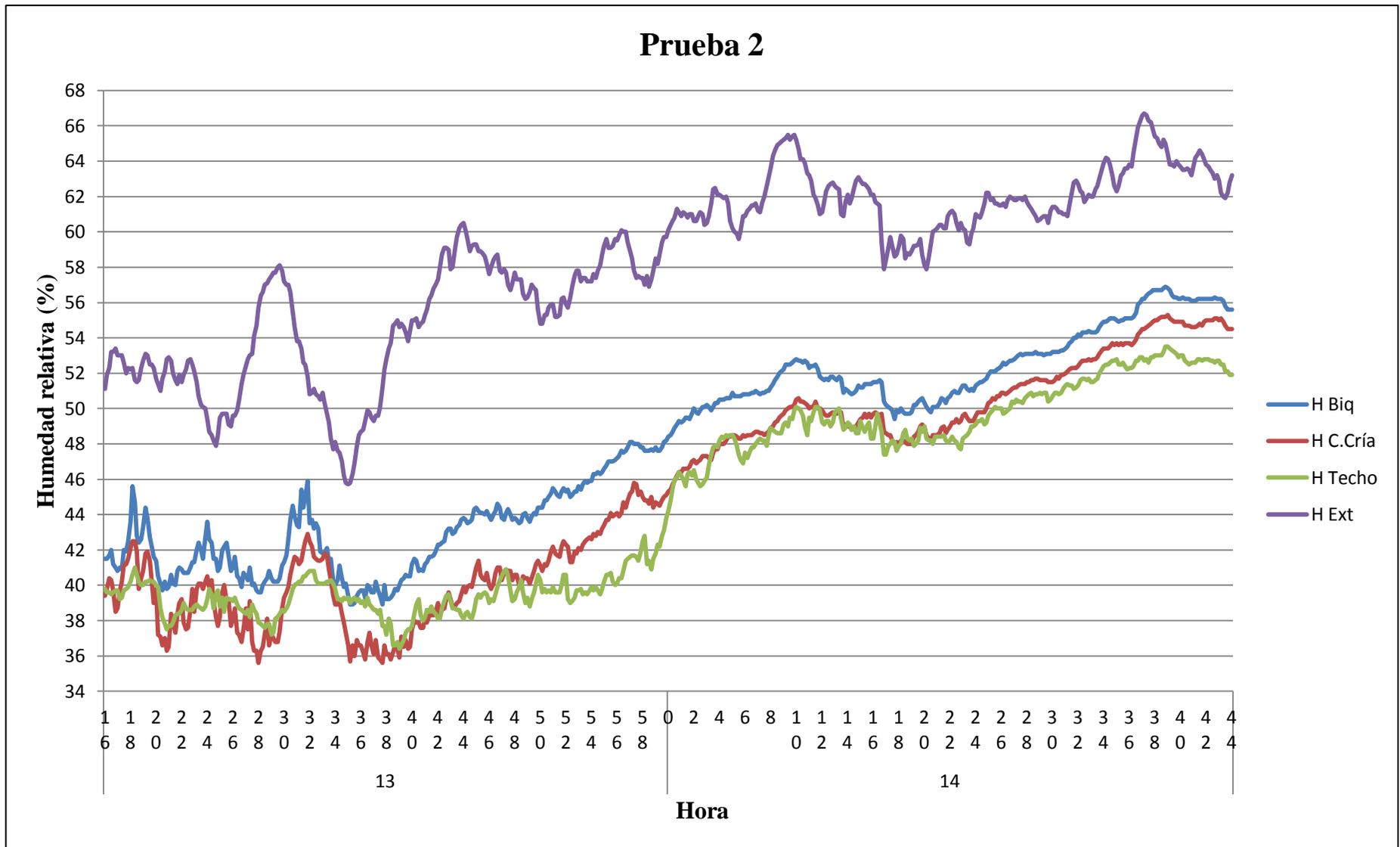


Figura 42.

Como se puede comprobar en la figura 40, la temperatura en la biquera, cámara de cría y principalmente el techo descienden más rápido a la 13:57h, momento en el que se produce la apertura del caballete de ventilación. Esto es lógico, puesto que es el instante de tiempo en el que el gradiente de temperatura entre el interior y el exterior de la colmena es mayor.

En cuanto a la humedad relativa, éste no es el caso en el que la humedad relativa interior es superior a la exterior, por lo cual no se puede justificar el uso del caballete de ventilación para reducir la humedad relativa interior con esta prueba.

Se ha preferido enfocar la prueba a la justificación del descenso de temperatura debido a que es la variable más importante de cara a maximizar el rendimiento de la colmena.

2.3 Prueba 3: Pulverización:

El objetivo de la prueba realizada consiste en justificar la pulverización como método de enfriamiento del interior de la colmena, verificando que con la acción de ésta, la temperatura en el interior desciende.

Aunque lo ideal para realizar esta prueba hubiera sido hacerla en verano, se consiguió realizar en un día cuya temperatura en el interior de la colmena alcanzó una temperatura superior a la deseada de forma natural.

En concreto, el procedimiento desarrollado durante la prueba ha sido el siguiente:

- 1) Se dispone la colmena sobre la cual se va a realizar la prueba en su posición correspondiente a las 11:00h, con el caballete de ventilación totalmente abierto.
- 2) A las 15:45h, se comienza a tomar medidas en la biquera, cámara de cría, techo y exterior de la colmena.
- 3) Desde las 16:00h hasta las 17:00h, se realiza una pulverización con agua a través de la biquera cada 5 minutos.
- 4) Se siguen tomando datos hasta las 18:00.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas:

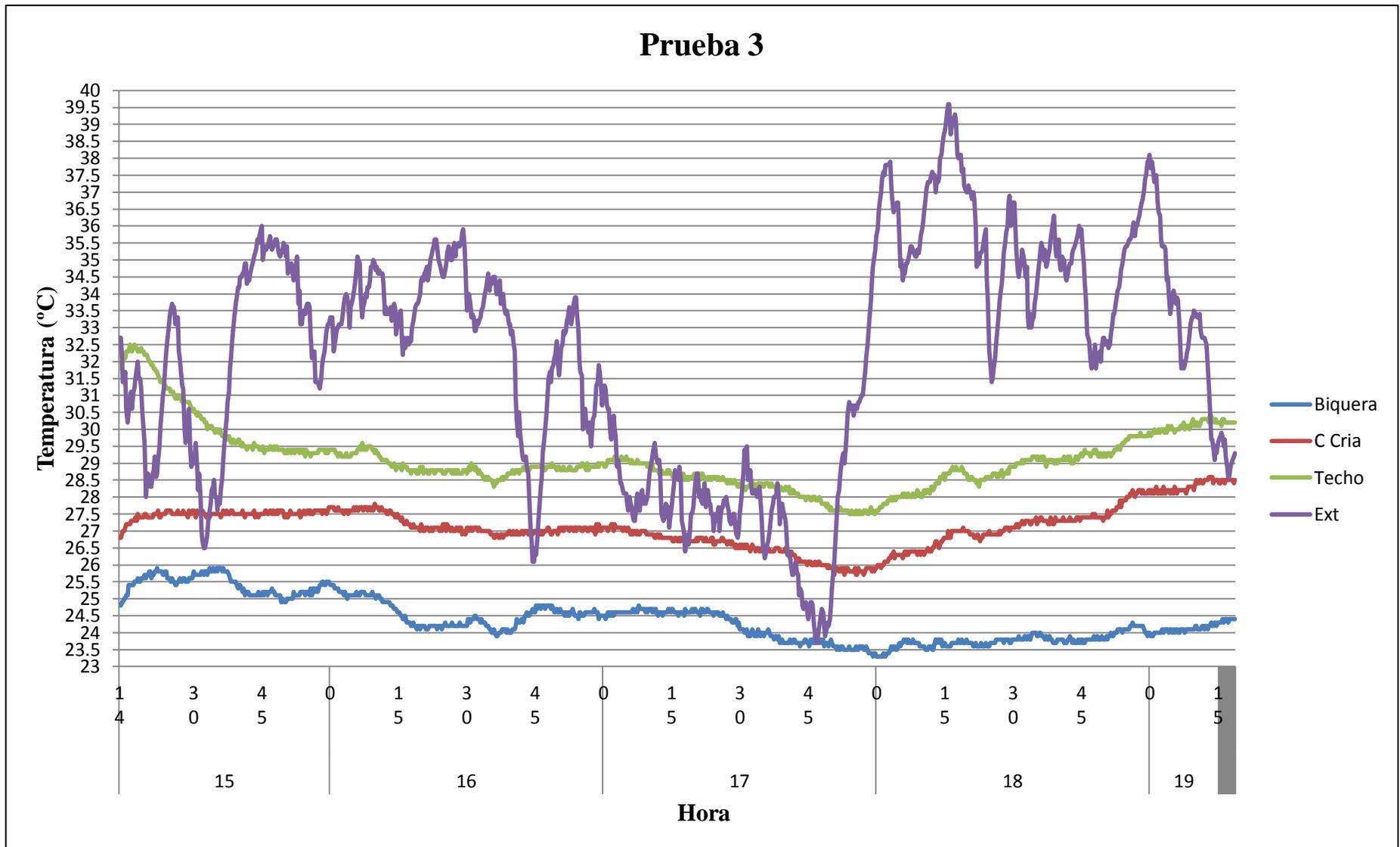


Figura 43.

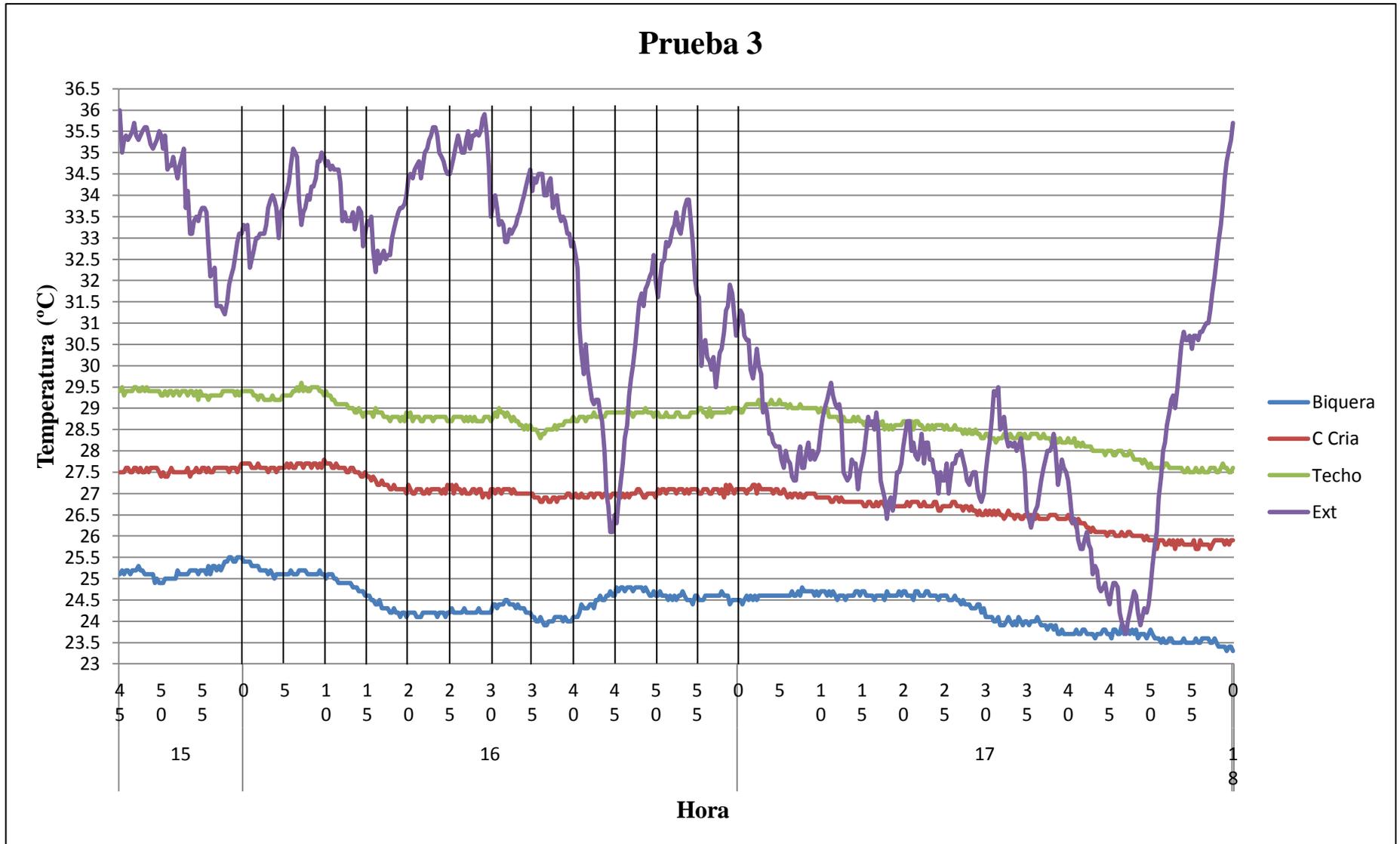


Figura 44.

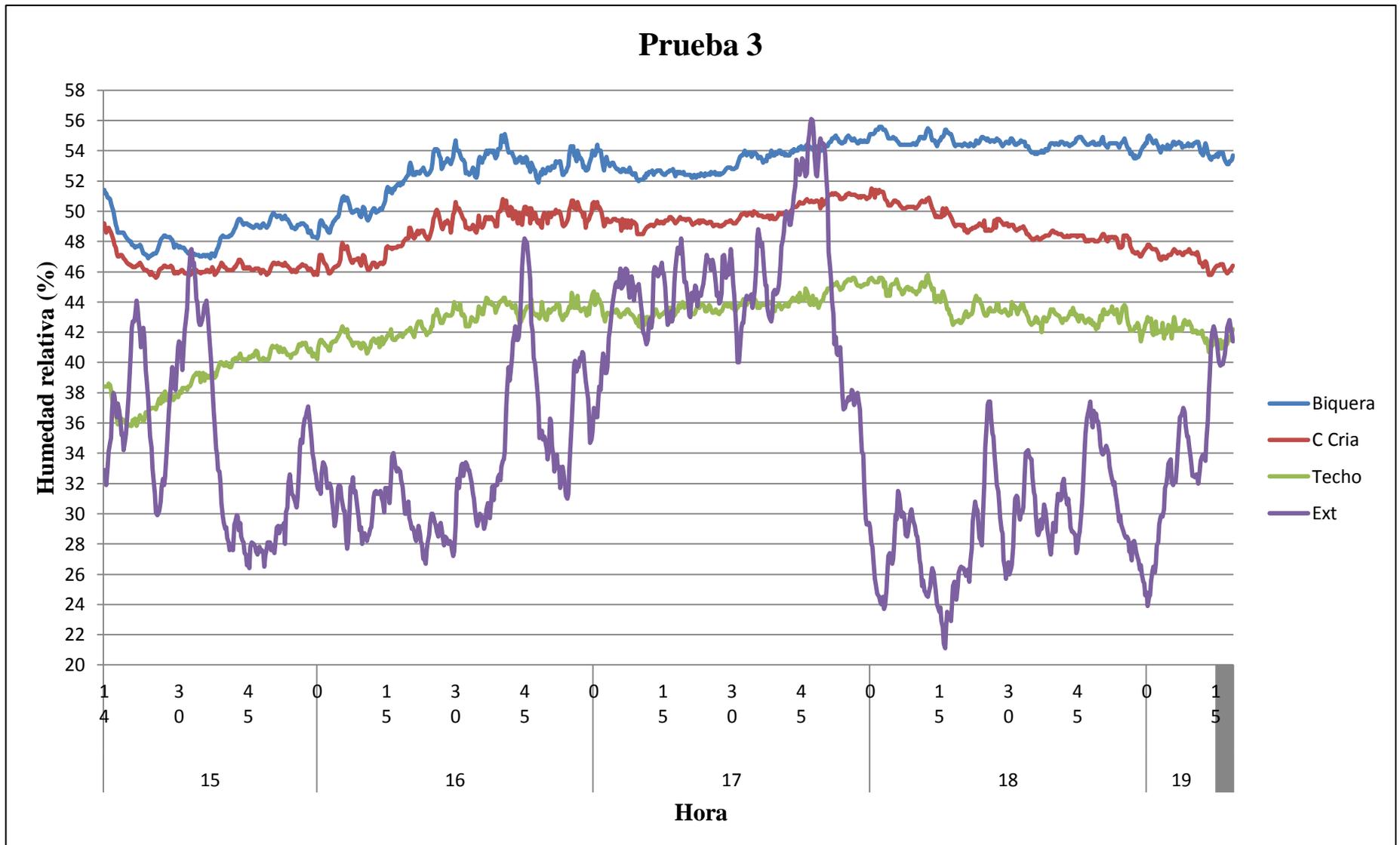


Figura 45.

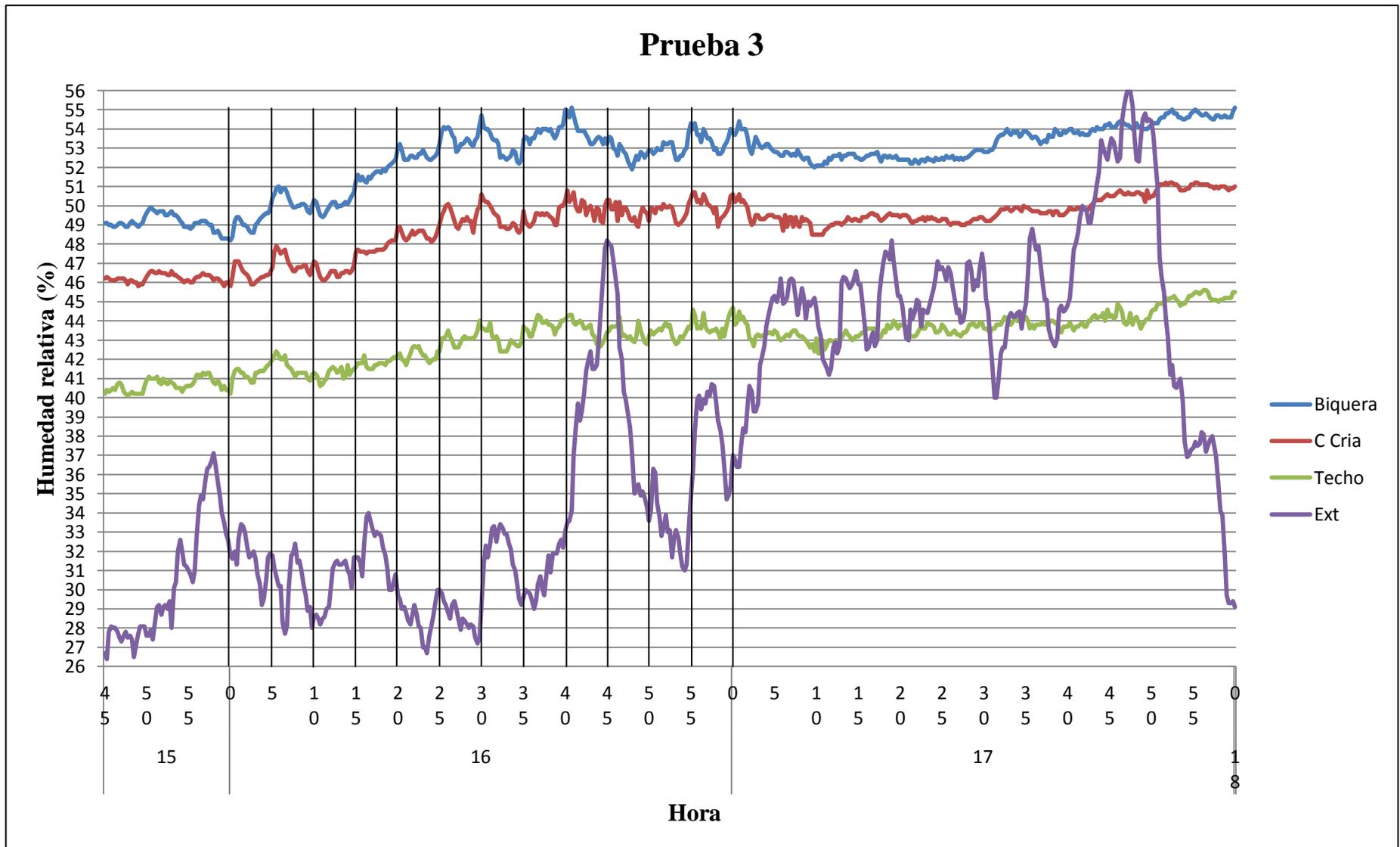


Figura 46.

Como se puede comprobar en las figuras 43 y 44, la temperatura en el interior de la colmena (biquera, cámara de cría y techo) descienden desde el momento en el que se inicia la pulverización. El problema de este método de enfriamiento, y por el cual finalmente no se implementó es que la humedad relativa aumenta considerablemente en el interior de la colmena. Esto se aprecia claramente en las figuras 45 y 46, siendo los altos valores de humedad alcanzados bastante perjudiciales para la salud de la colmena hasta el punto de que es preferible sacrificar el enfriamiento que produce la vaporización.

2.4 Prueba 4: Sistema de calefacción:

El objetivo fundamental de las pruebas realizadas es determinar los parámetros del controlador PI que regula el calentamiento de la colmena para lograr un funcionamiento óptimo de este sistema. Dicho funcionamiento está caracterizado por un transitorio no demasiado largo, y una temperatura que, en régimen permanente, permanezca lo más próximo y estable en torno al valor consigna. En el caso de las pruebas realizadas, el valor de consigna se fijó en 25°C en la biquera, y aunque no es el mismo que se aplica en el sistema real (30°C en el techo), los resultados son válidos para configurar el controlador PI.

Se han realizado numerosas pruebas. El procedimiento seguido es siempre el mismo, cambiando únicamente el valor de los parámetros del controlador PI. Dicho procedimiento ha sido el siguiente:

- 1) Se dispone la colmena sobre la cual se va a realizar la prueba en su posición correspondiente, con el caballete de ventilación totalmente cerrado.
- 2) Se modifican los parámetros del controlador PI, y se pone en funcionamiento. Generalmente, estas pruebas se iniciaron cuando empezaba a atardecer y se finalizaban aproximadamente a las 8:30h de la mañana. De esta forma, se simulaba el periodo del día en el que en condiciones normales sería más necesario el sistema de calefacción.
- 3) Se analizan los datos obtenidos y en función de ellos se modifican los parámetros del controlador hasta alcanzar el funcionamiento óptimo. Los datos obtenidos son la temperatura y humedad en la biquera, cámara de cría, techo y exterior de la colmena.

Los resultados obtenidos más relevantes se muestran en las siguientes gráficas, indicándose en el título de cada gráfica los parámetros proporcional (kp) e integral (ki) escogidos para cada prueba:

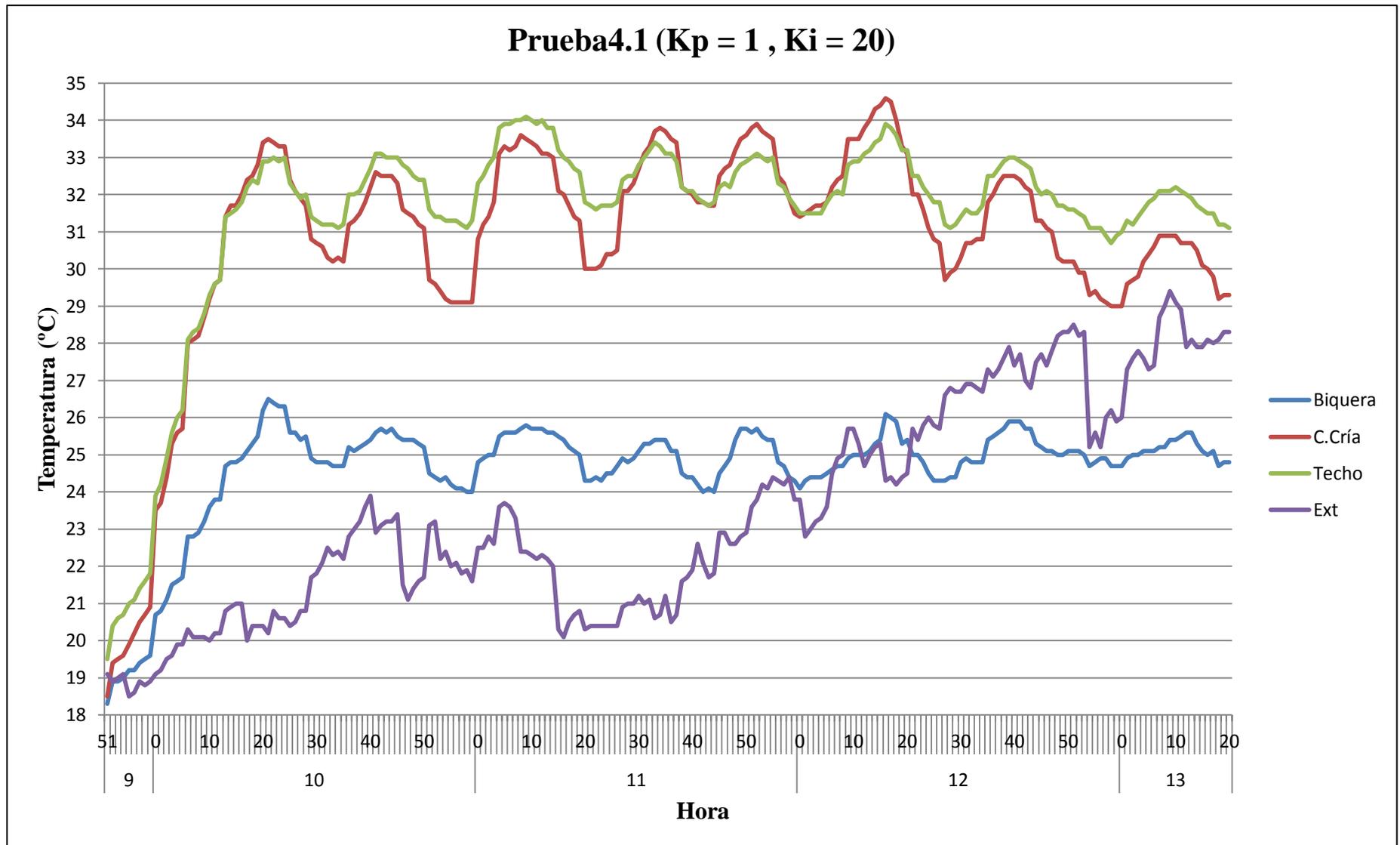


Figura 47.

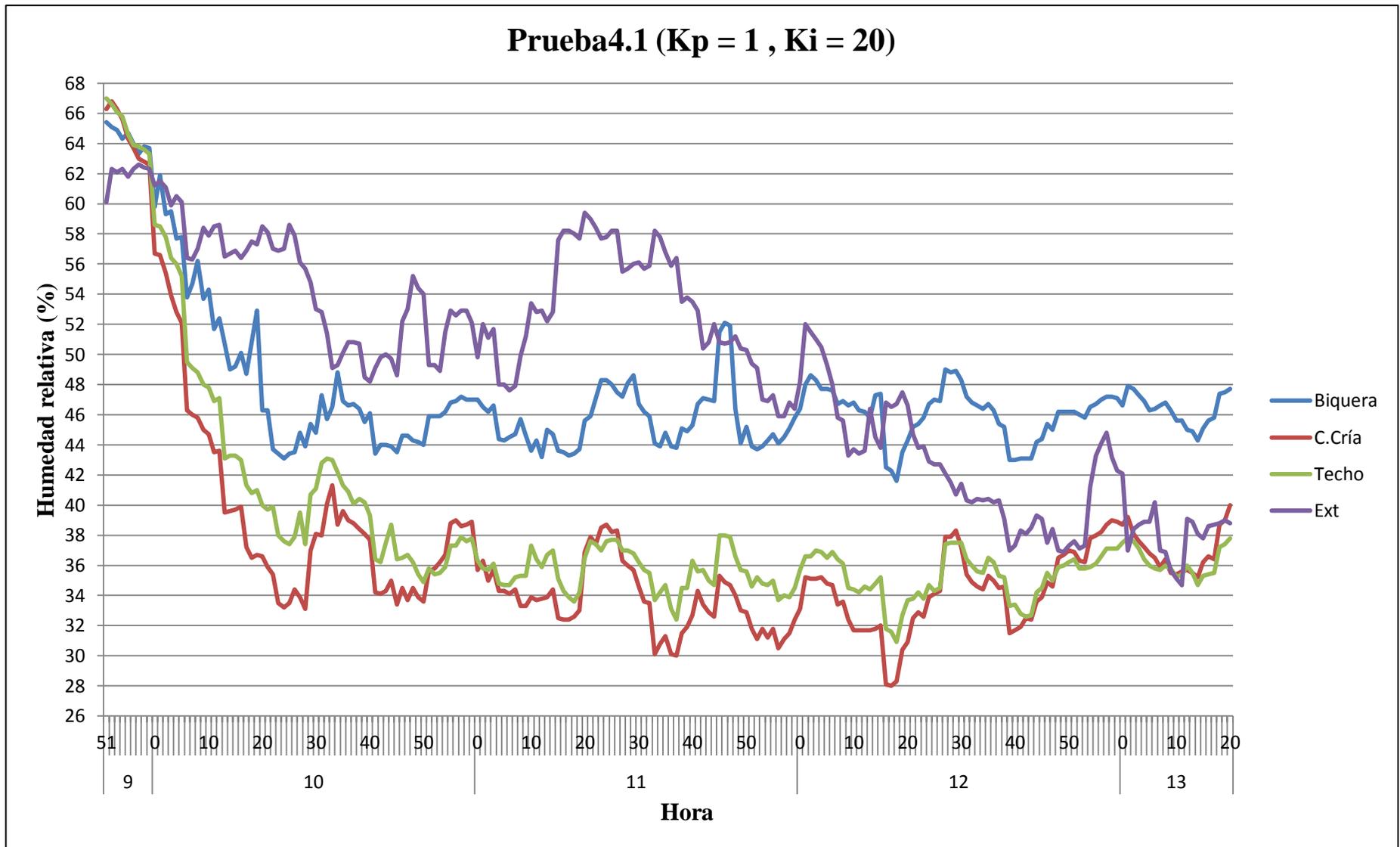


Figura 48.

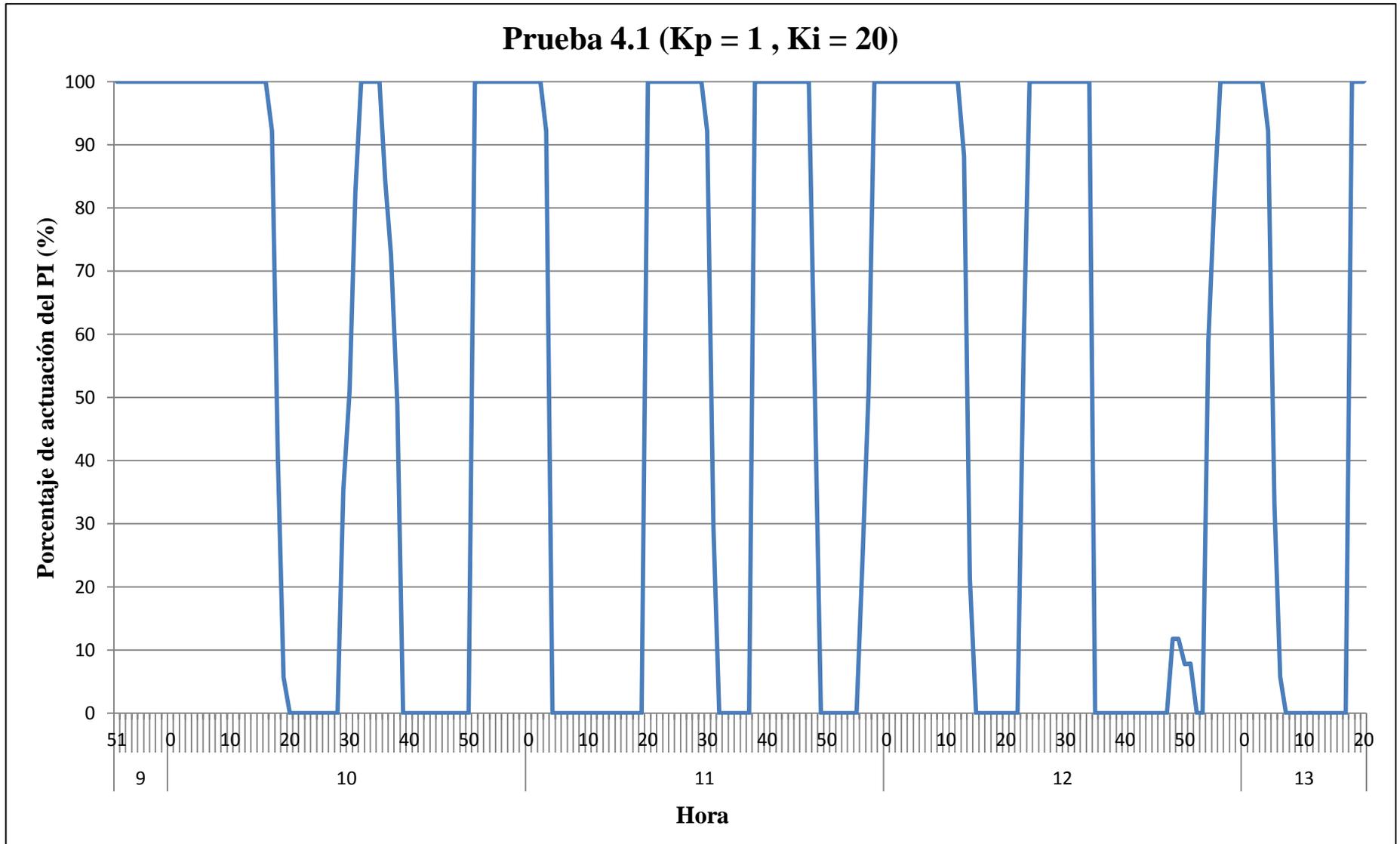


Figura 49.

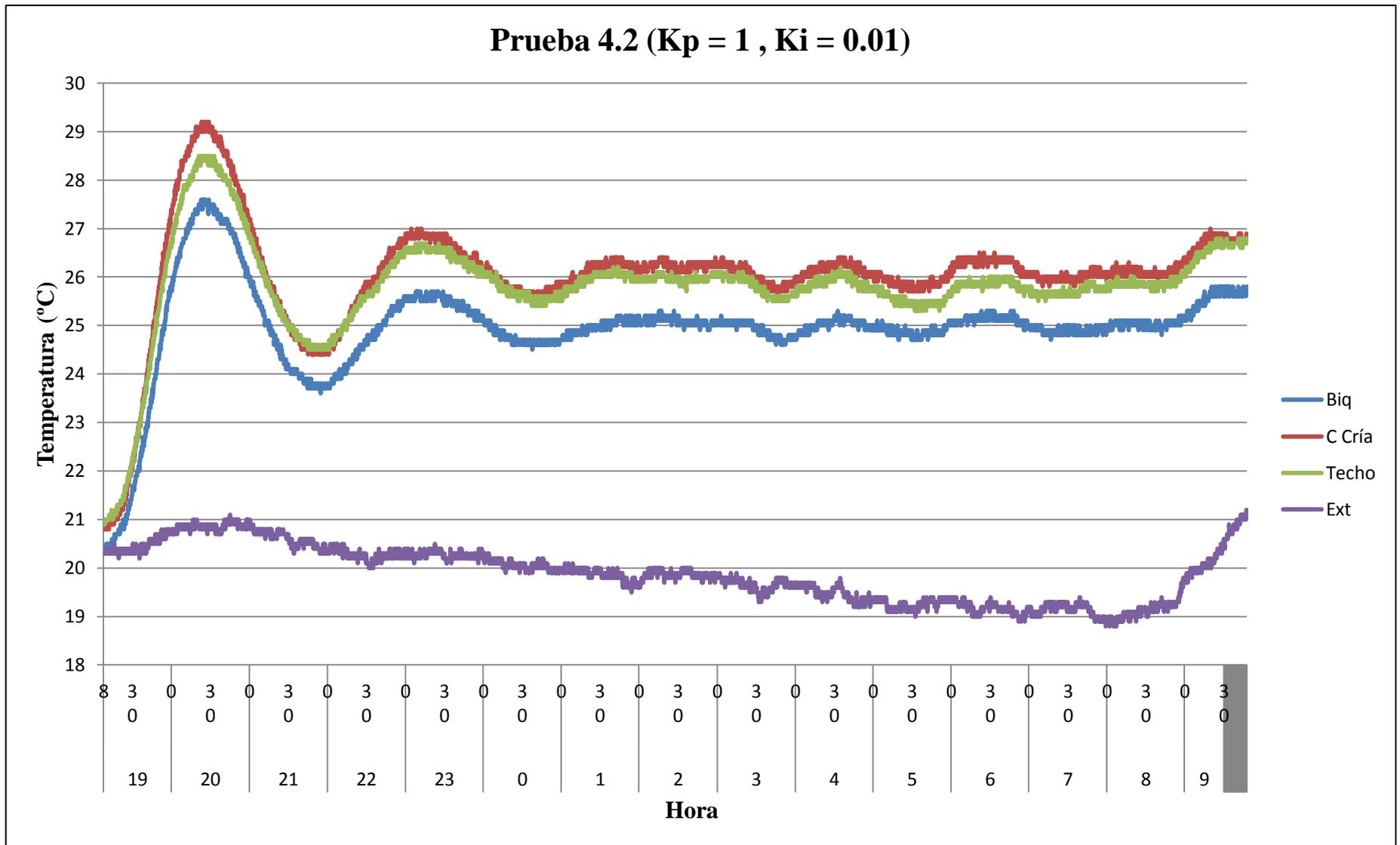


Figura 50.

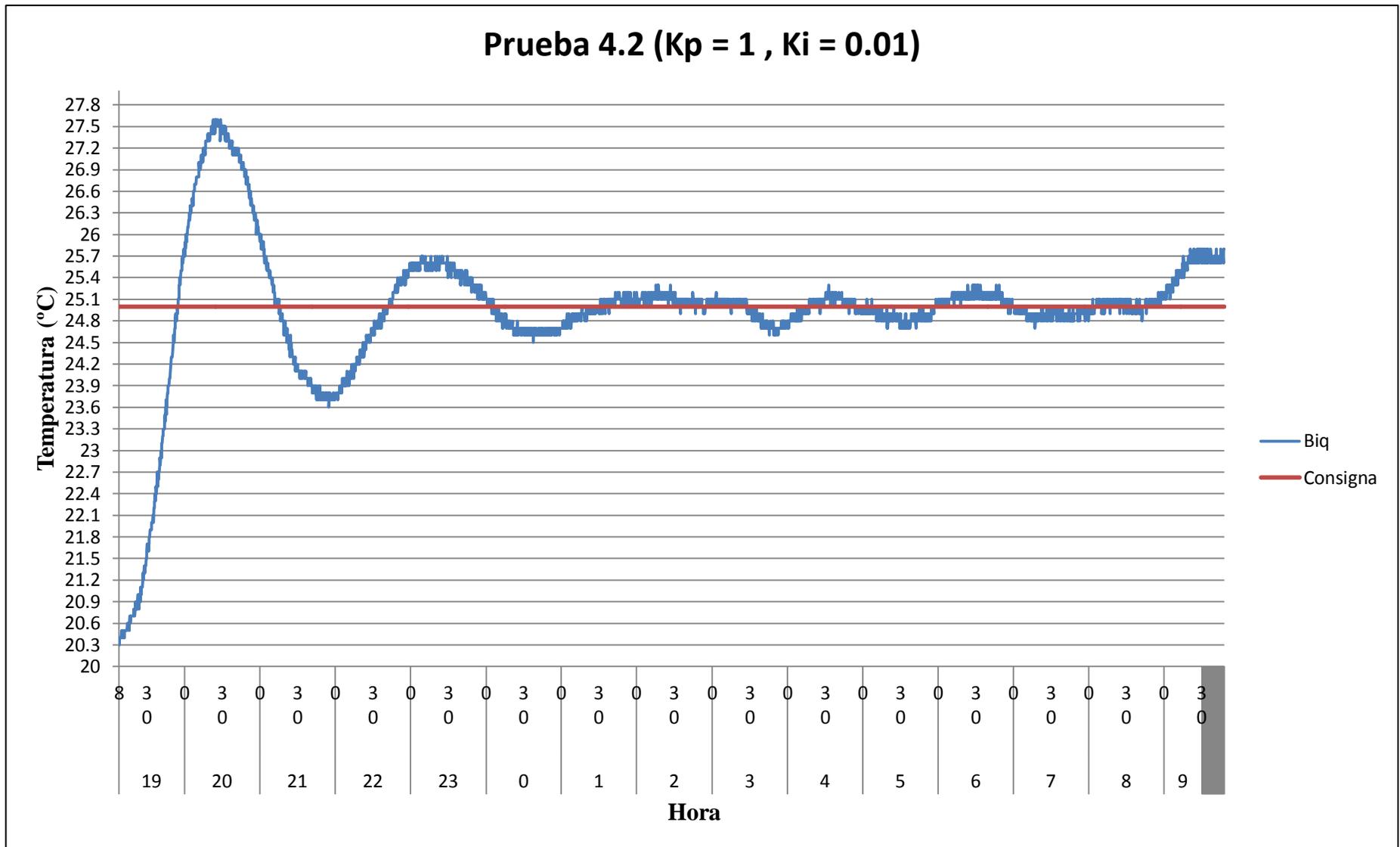


Figura 51.

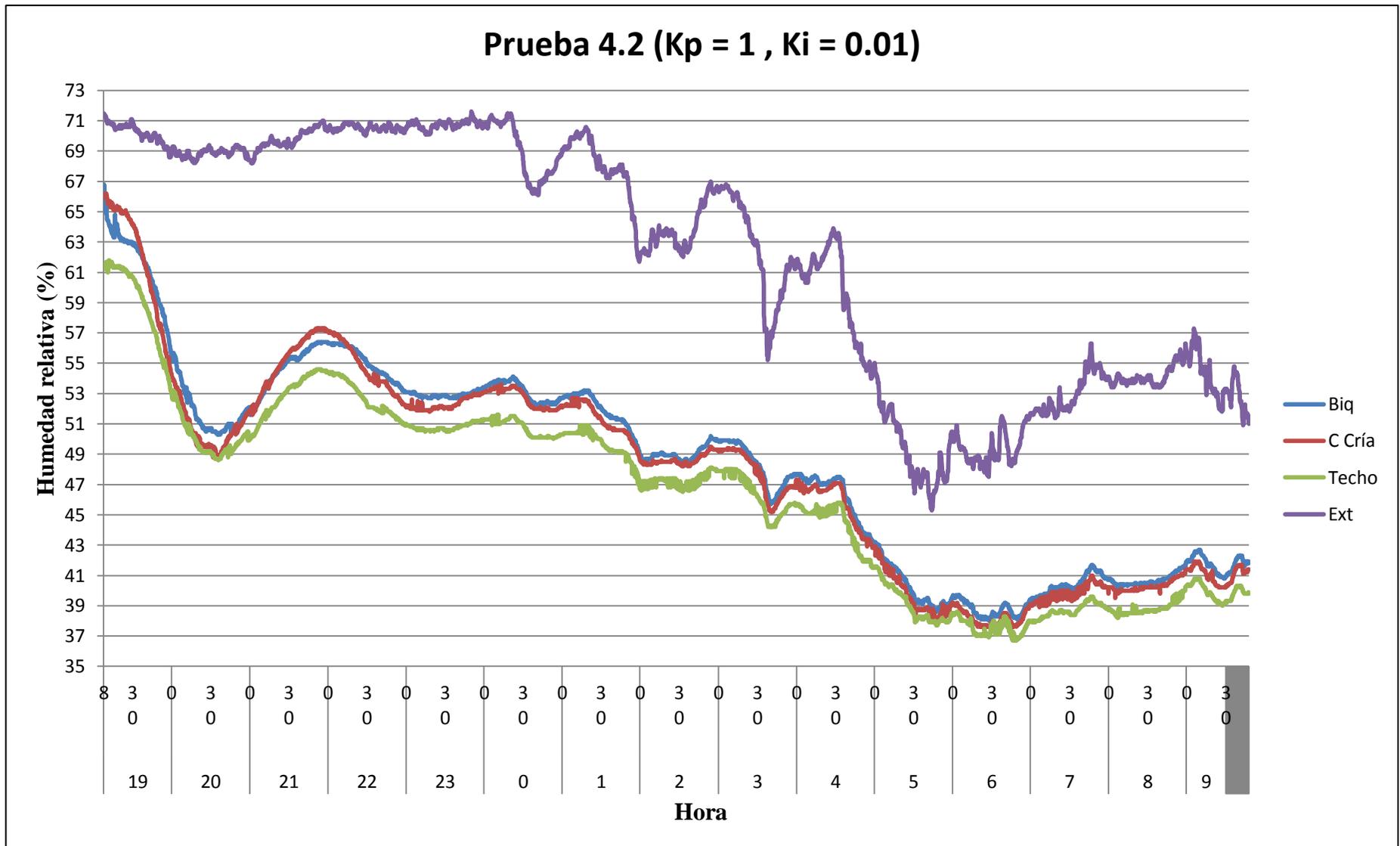


Figura 52.

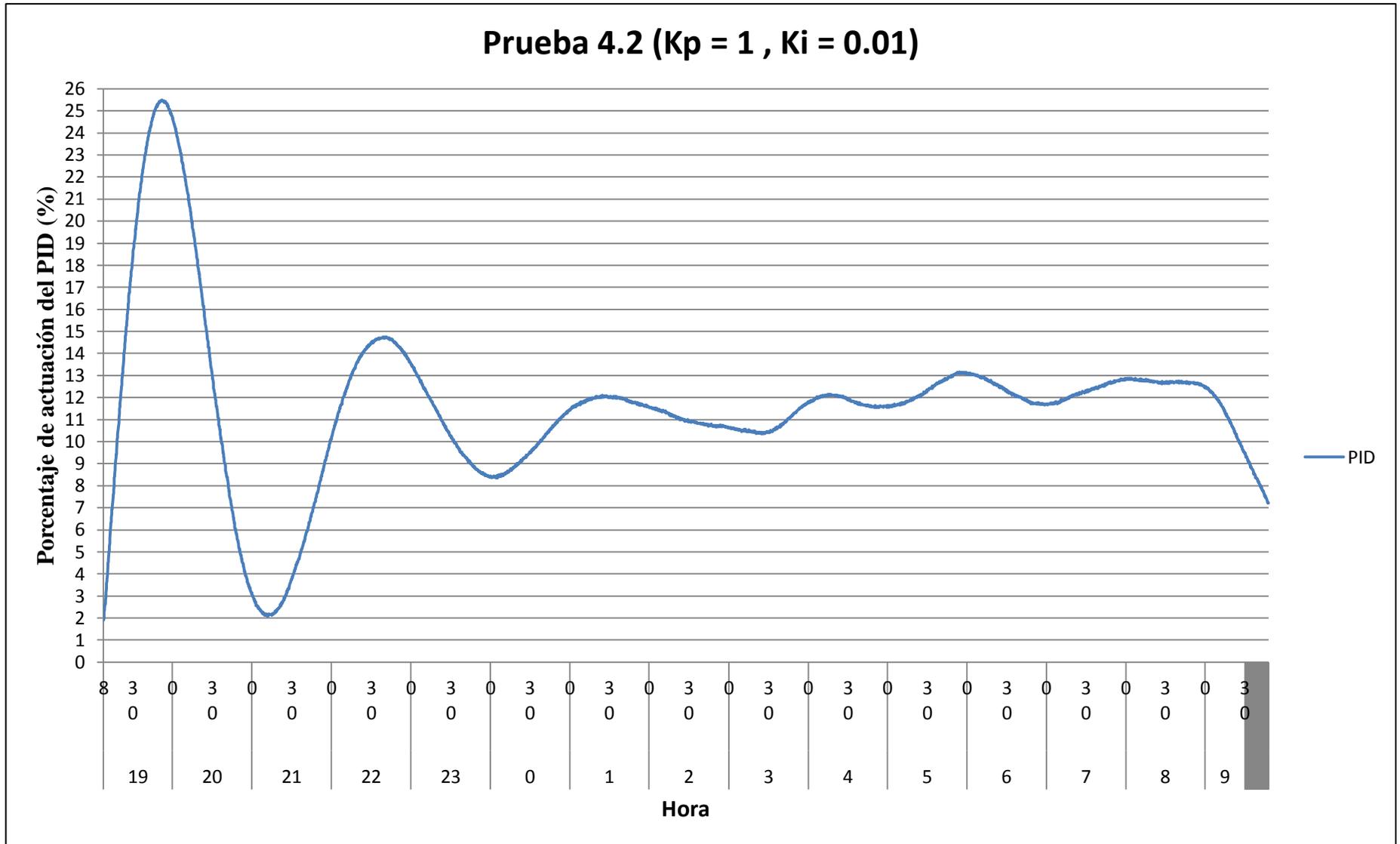


Figura 53.

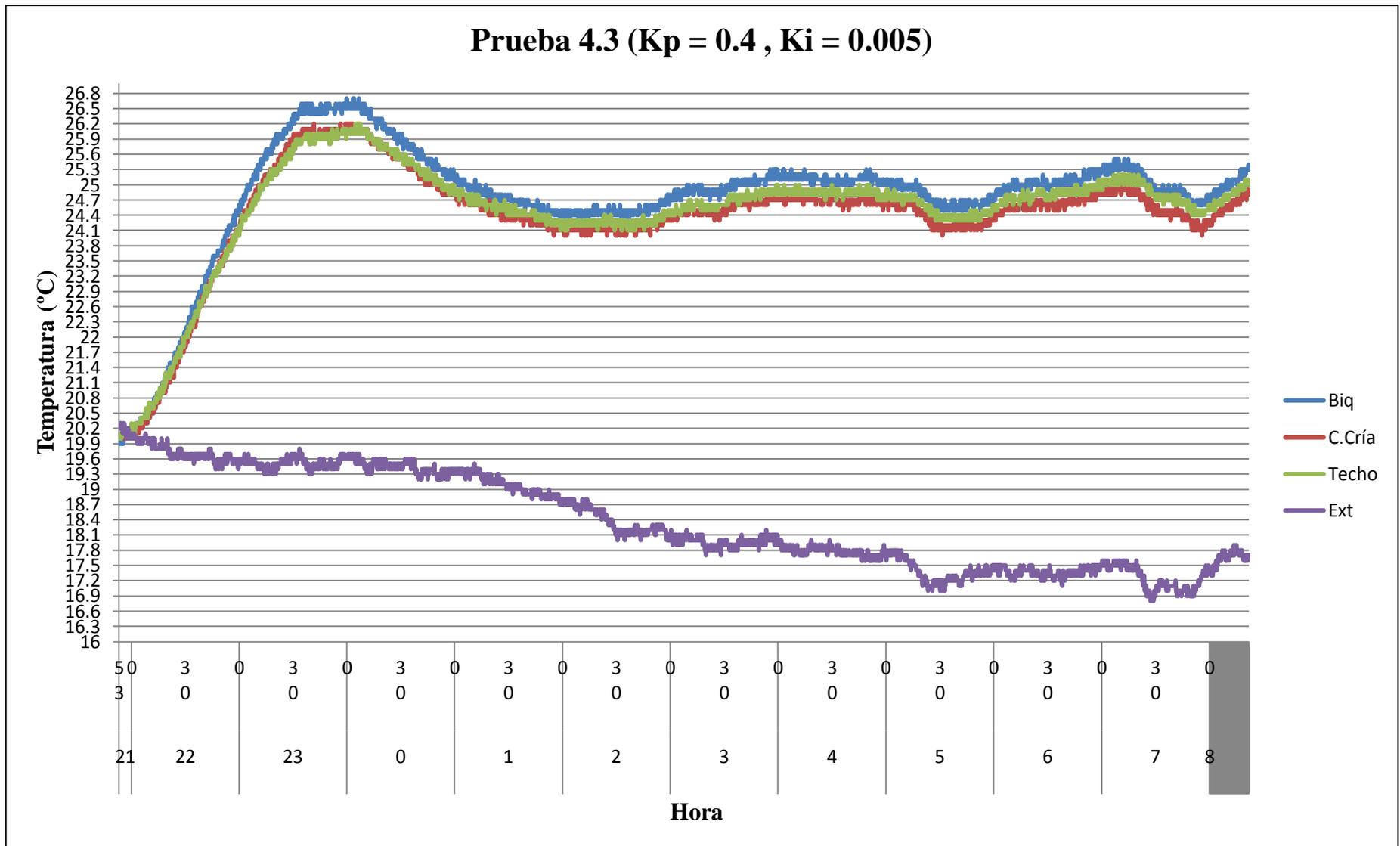


Figura 54.

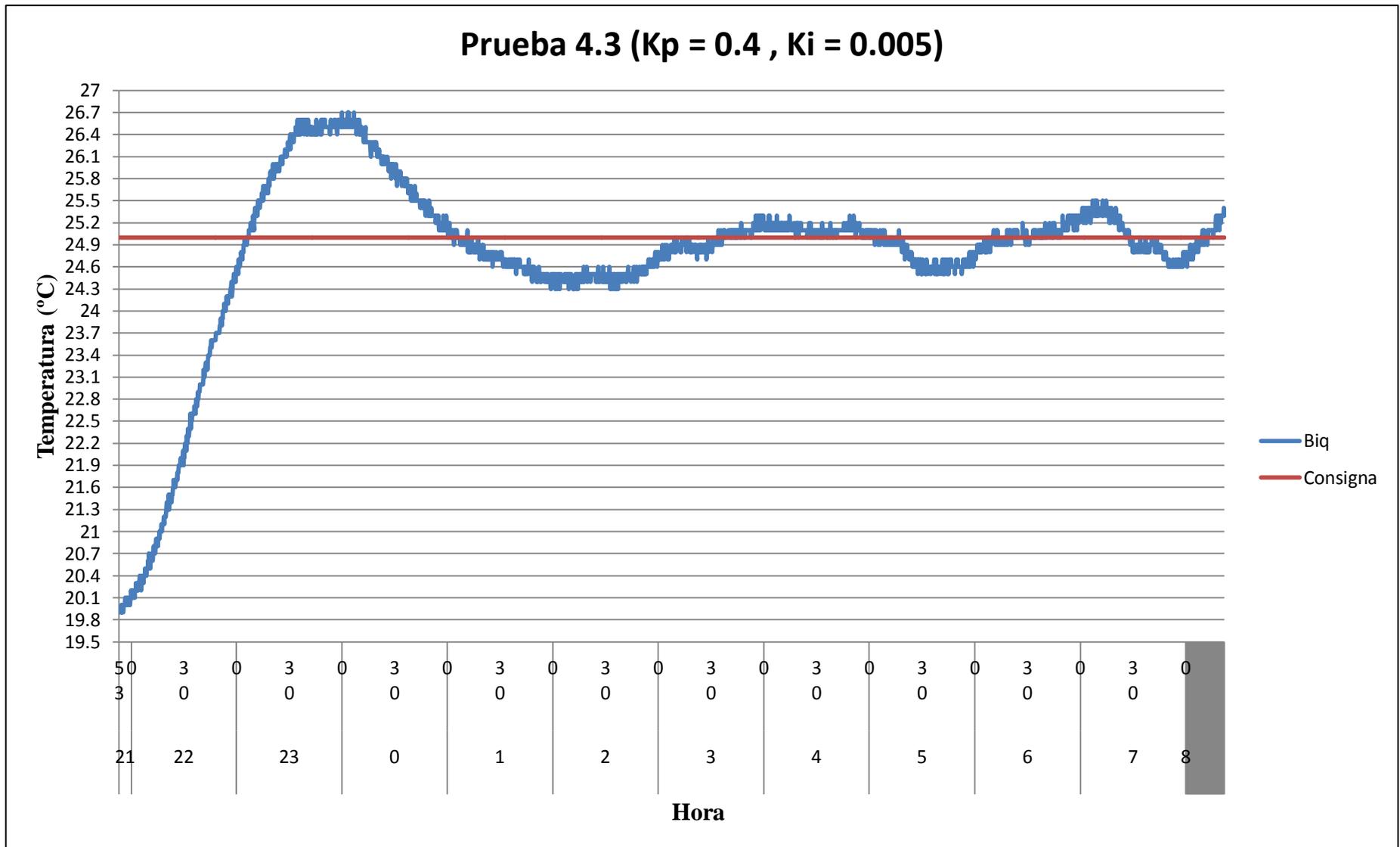


Figura 55.

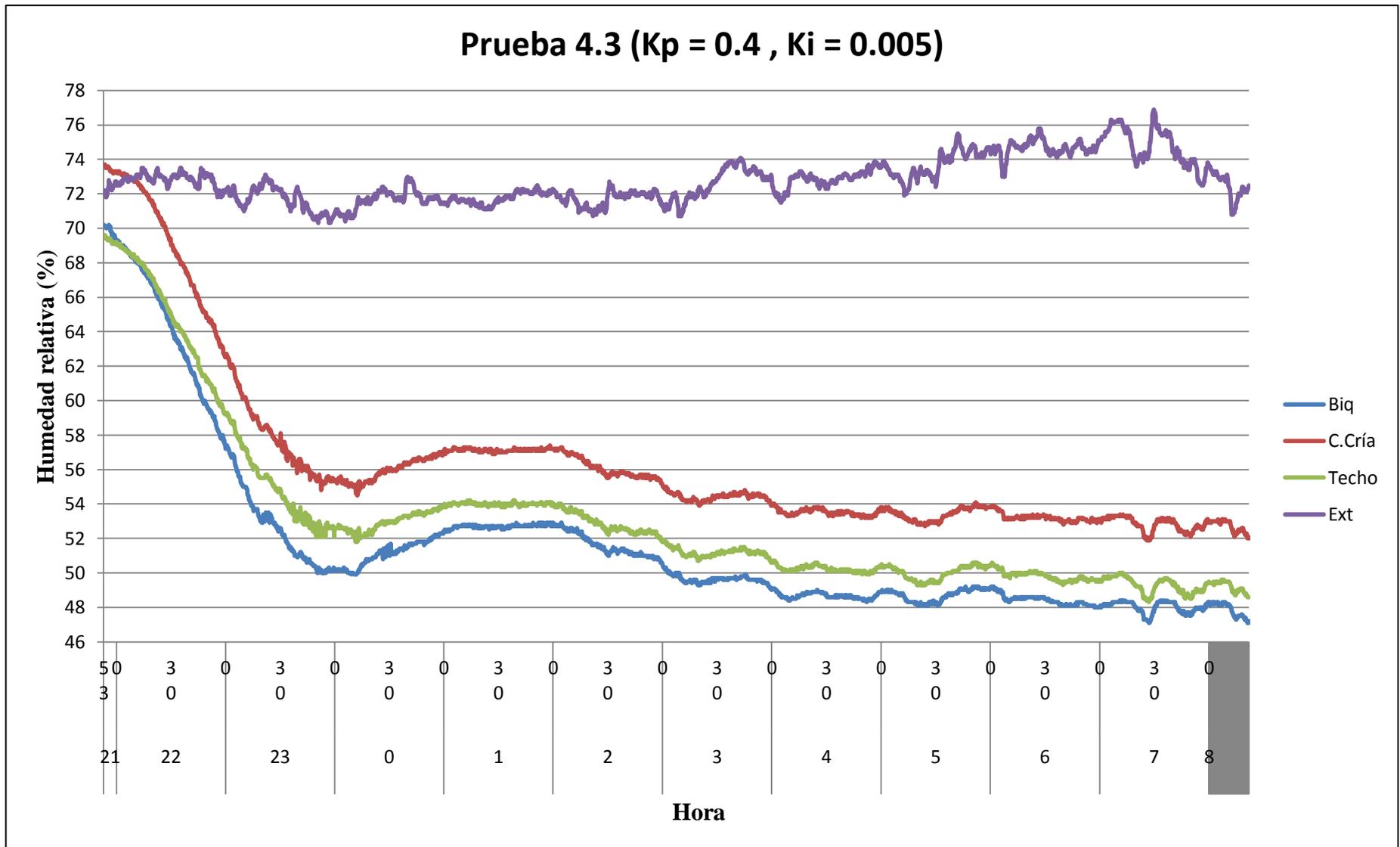


Figura 56.

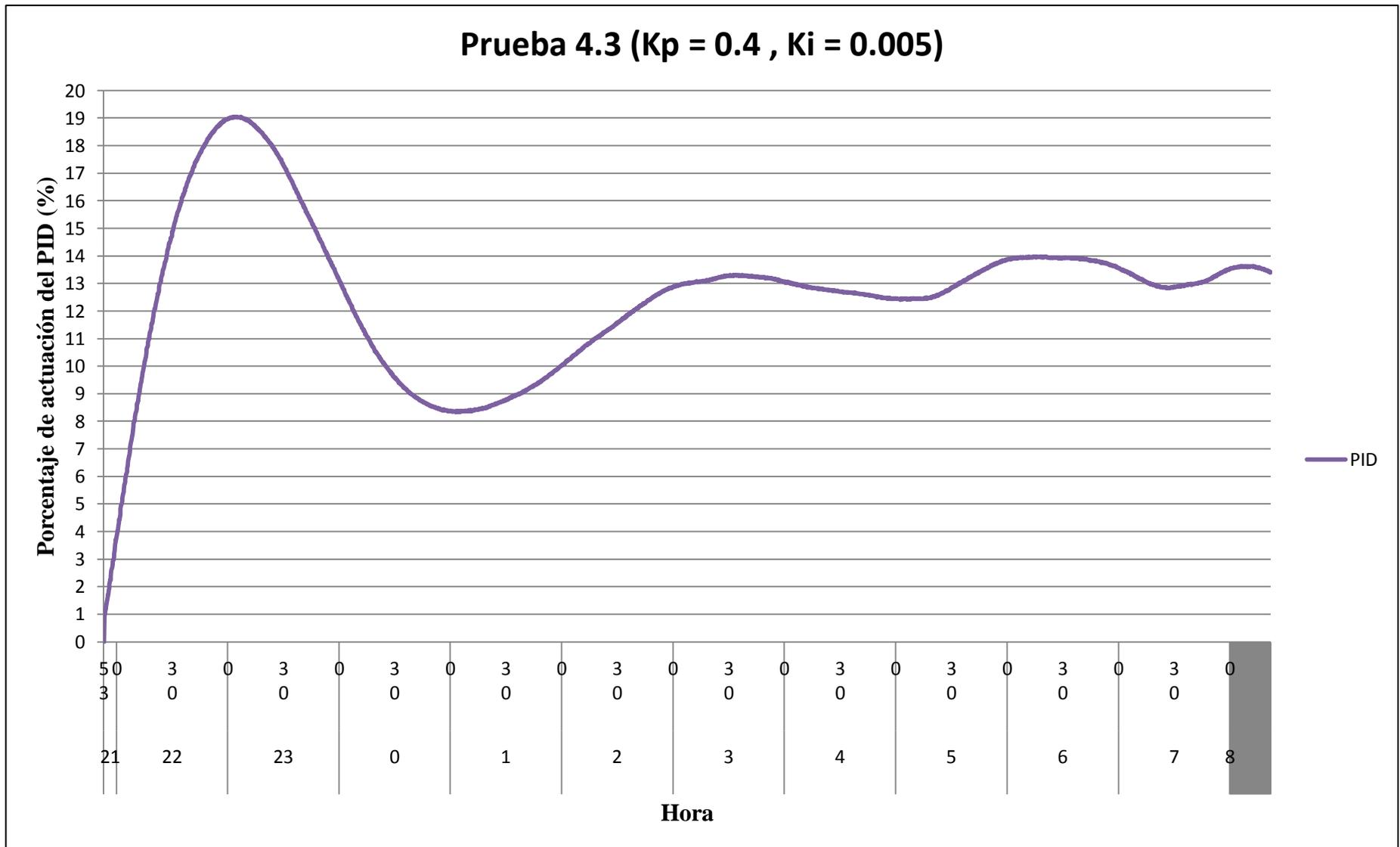


Figura 57.

2.5 Conclusiones extraídas de las pruebas realizadas:

En la prueba 4.1, los parámetros del control PI se escogieron para que el sistema actuara como un control todo o nada. El resultado obtenido lo atestigua, pues en la figura 49 se puede observar que la salida del control PI es 0 o 100 (control todo o nada).

En la prueba 4.2, los parámetros escogidos permiten obtener un funcionamiento aceptable del sistema de actuación, produciendo un pico inicial algo elevado y oscilaciones en régimen permanente de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en torno a la consigna, tal y como se puede observar en la figura 51.

En la prueba 4.3, los parámetros escogidos producen un funcionamiento del sistema de actuación que consideramos correcto, produciendo un pico inicial que la colmena puede tolerar y oscilaciones en régimen permanente de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en torno al valor consigna, tal y como se puede observar en la figura 55.

Conclusiones

César Pérez Méndez

23-06-2014

Conclusiones:

En ausencia de abejas en el interior de la colmena, el sistema diseñado e implementado es capaz de mantener una temperatura estable en el interior de la misma. Esto puede ocurrir de forma natural cuando las condiciones ambientales externas son buenas o bien de forma artificial cuando las condiciones ambientales externas sean adversas. En este último caso, la temperatura se logra mantener en torno al valor deseado mediante la actuación del sistema de calefacción (resistencia calefactora controlada mediante un control PI) o a través del sistema de refrigeración (caballete de ventilación controlado mediante un control todo o nada).

Una vez se implemente el sistema, se espera que la colmena en la que se desarrolle mantenga unas condiciones de temperatura y humedad óptimas, significando ello una mejora en la salud de la población de abejas y un aumento de la productividad.

Así pues consideramos que, en líneas generales, el trabajo realizado ha sido satisfactorio. Sin embargo, debido a la falta de tiempo, quedan algunas líneas abiertas en las que se podría seguir avanzando con el fin de optimizar el sistema objeto de este trabajo.

Una de ellas consiste en tomar medidas de las variables de interés en verano, de forma que se puedan ajustar los parámetros de control definidos con valores reales. Hacer pruebas en presencia de abejas en el interior de la colmena también será fundamental de cara a dicho ajuste. Además, una vez que el controlador esté funcionando en estas condiciones se podrían modificar los parámetros de control y analizar su influencia en el rendimiento de la colmena. Sería un procedimiento iterativo hasta alcanzar los valores óptimos.

También sería interesante ajustar la cantidad de vapor liberado por el sistema de vaporización diseñado, aunque no implementado por las razones ya aducidas a lo largo de esta memoria. De cara a su implementación, sería necesario llevar a cabo un estudio más detallado sobre los valores de la cantidad de vapor liberada y de la frecuencia de actuación que permitiesen llegar a un compromiso entre un descenso de la temperatura y un ascenso razonable de la humedad.

Conclusions:

In the absence of bees inside the hive, the system designed and implemented is able to keep a stable temperature inside. This can happen naturally when the external environmental conditions are good, or artificially when such conditions are adverse. In the latter case, the temperature inside the hive keeps around the desired value thanks to the actuation of the heating system (a heating resistor controlled by PI control) or the cooling one (a ridge ventilation controlled by an ON/OFF controller).

Once the system is implemented, it is expected that the hive maintains optimum conditions of temperature and humidity, thereby causing an improvement in the health of the bees' population and an increase in the productivity.

Then, we consider that, in general lines, the work made has been satisfactory. However, because of time constraints, there are some open lines that could be developed in order to optimize the system.

One of them is to take measurements of the variables of interest (temperature and humidity) in the summer in such a way that the defined control parameters can be adjusted with real values perform. The possibility of making experiments in the presence of bees inside the hive will also be crucial when facing such adjustment. Furthermore, once the system is implemented, the control parameters could be modified analyzing its influence on the hive performance. This would be an iterative procedure until reaching the optimal values.

It would also be interesting to adjust the amount of steam released by the vaporization system designed but not implemented for the reasons along adduced herein. Towards their implementation, it would be necessary to conduct a more detailed study about the values of the amount of steam and the frequency of actuation capable of leading to a compromise between a decrease of the temperature and a reasonable increasing of the relative humidity.

Bibliografía

César Pérez Méndez

23-06-2014

Para la realización del presente trabajo de fin de grado se han descargado librerías para el software Arduino, de las cuales algunas se han podido utilizar tal y como se descargaron y en otras fue necesario realizar pequeñas modificaciones y consultado páginas web en busca de información. En el presente documento, se muestran los enlaces mencionados:

- Información sobre los parámetros óptimos del interior de la colmena:
 - <http://apicultura.over-blog.es/article-29442097.html>
 - <http://blogs.eldiariomontanes.es/ENTORNORURAL/2009/12/21/div-class-post-body/>
 - <http://www.apiten.com/category/comportamientos-sociales/temperatura-de-la-colmena/>
 - El libro “Manual Práctico de Apicultura para las islas canarias”, escrito por Félix Henríquez Jiménez y Enrique Paricio Núñez.
- Refrigeración evaporativa:
 - <http://www.frialia.com/index.php/es/tecnologias/refrigeracion-evaporativa.html>
 - <http://www.humiambiente.com/refrigeracion-evaporativa.php>
- Caballete de ventilación:
 - http://www.ehowenespanol.com/calcular-area-del-caballete-ventilacion-del-techo-casa-residencial-como_274681/
- Librería PID del software Arduino:
 - <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary#.UwnMlvkhCS0>
- Librería para el sensor DHT21:
 - <https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library>
- Tanto la librería del Servo, la del reloj como la del módulo lector SD vienen incorporadas en el software original de Arduino, por lo que se consultó la página oficial:
 - <http://arduino.cc/>

Planos

César Pérez Méndez

23-06-2014

Índice:

Plano 1: Alzado de la colmena original.

Plano 2: Sección planta a la altura de la rejilla de protección de la colmena original.

Plano 3: Sección planta a la altura de los cuadros de la colmena original.

Plano 4: Sección perfil de la colmena original.

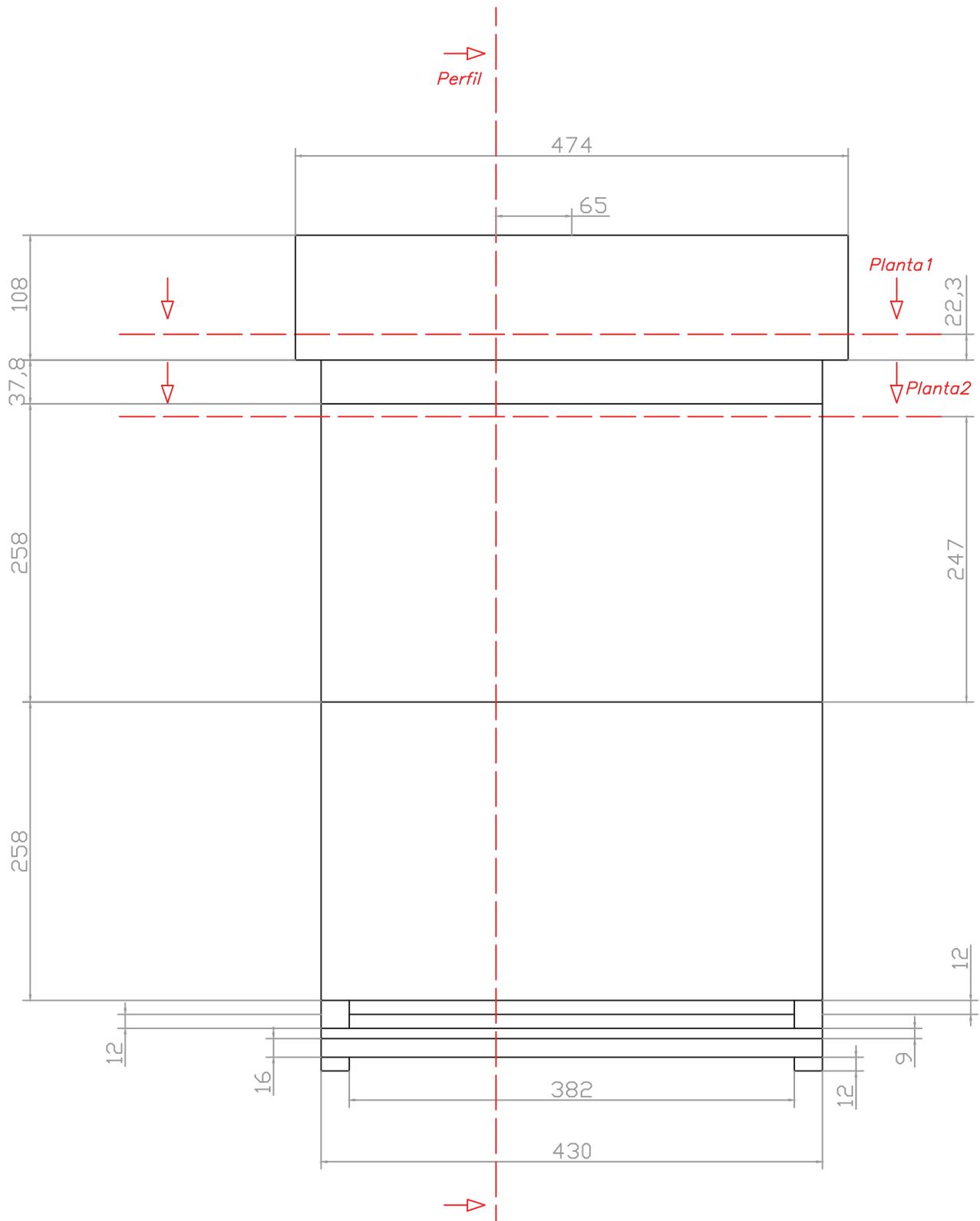
Plano 5: Sección perfil con los sensores DHT21.

Plano 6: Sección alzado con los sensores DHT21.

Plano 7: Planta, perfil y alzado del caballete de ventilación.

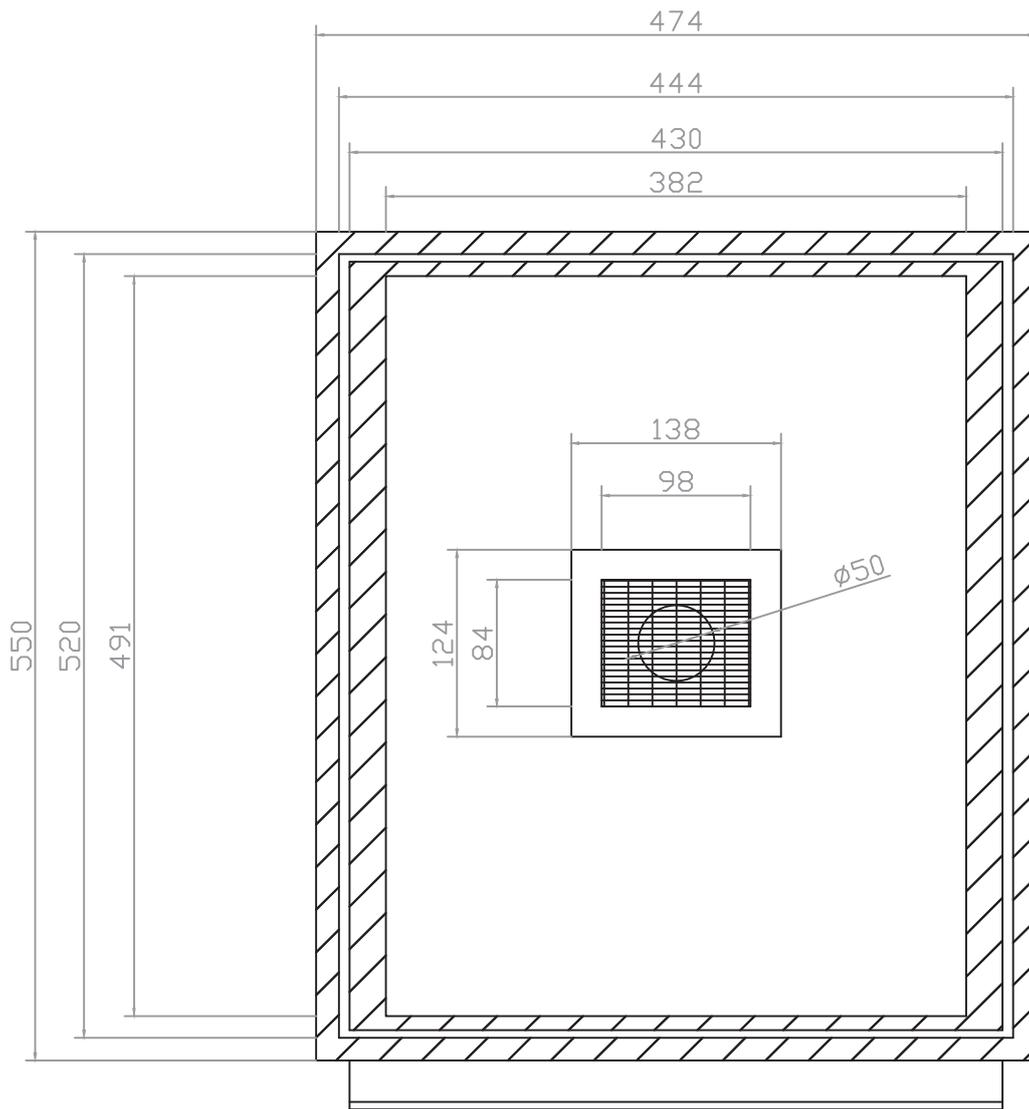
Plano 8: Sección perfil del sistema completo.

Plano 9: Sección alzado del sistema completo.

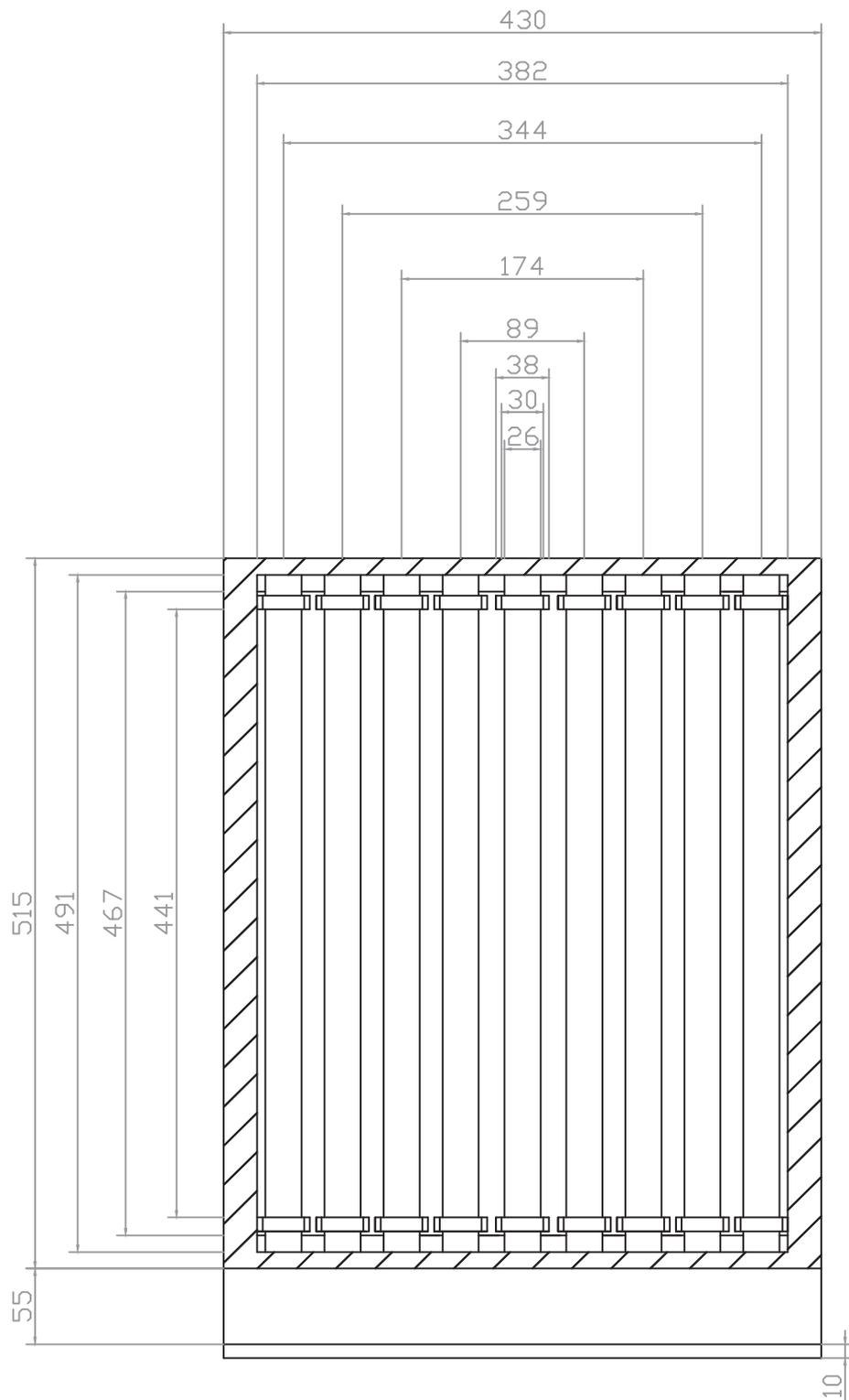


Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.

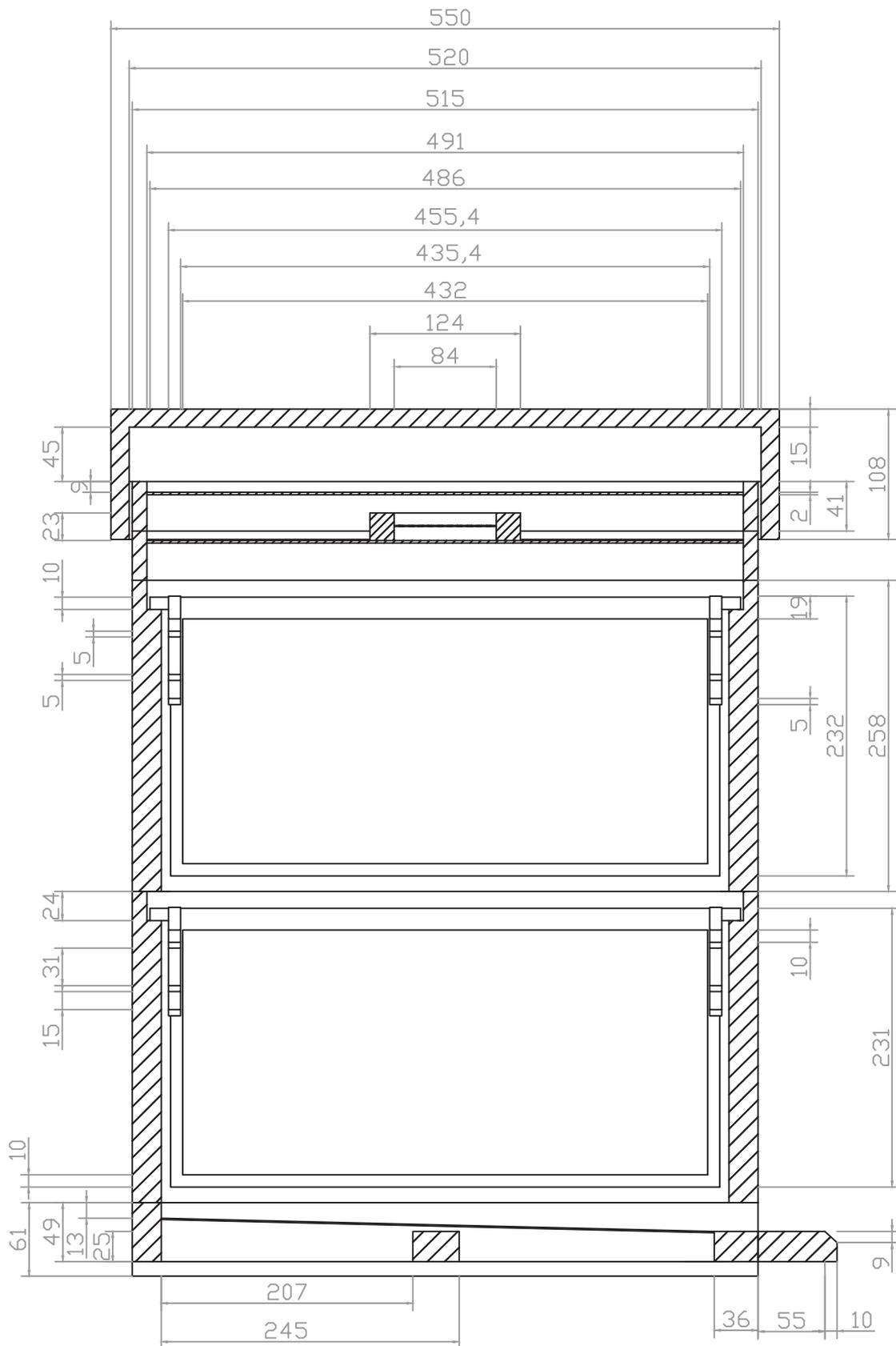
	Fecha	Autor	 ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
Dibujado	6-2014	César	
Comprobado	6-2014	Pérez Méndez	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	Alzado		Nº P. :1
1:5			Nom.Arch: Alzado.dwg



Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.			
	Fecha	Autor	 ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
Dibujado	6-2014	César	
Comprobado	6-2014	Pérez Méndez	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	Sección a la altura de la rejilla de protección		Nº P. :2
1:5			Nom.Arch: Planta1.dwg

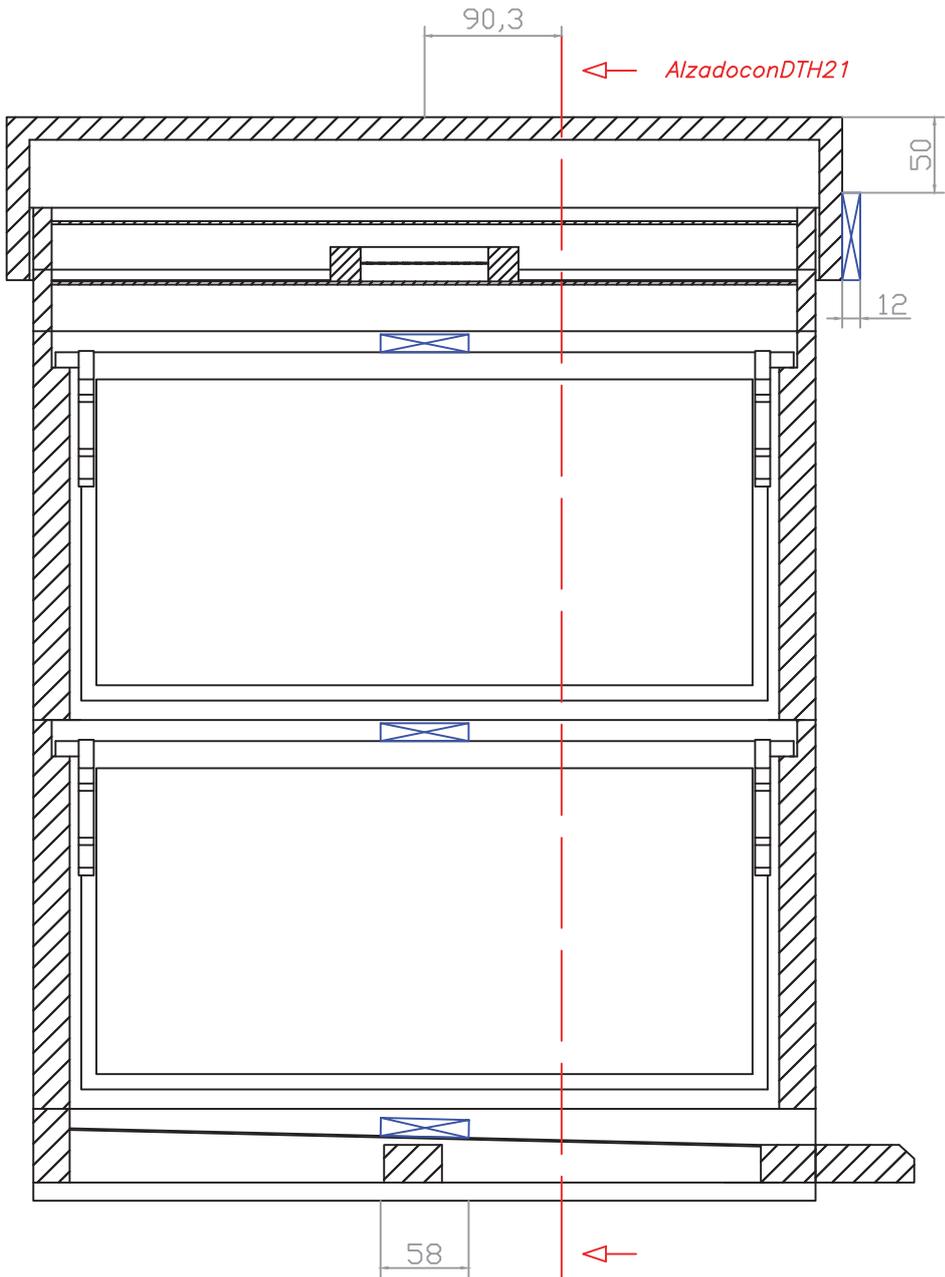


Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.			
	Fecha	Autor	 ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
Dibujado	6-2014	César	
Comprobado	6-2014	Pérez Méndez	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	Sección a la altura de los cuadros		Nº P. :3
1:5			Nom.Arch: Planta2.dwg



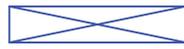
Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.				
	Fecha	Autor		ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
Dibujado	6-2014	César		
Comprobado	6-2014	Pérez Méndez		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA:	Sección Perfil			Nº P. :4
1:5				Nom.Arch:

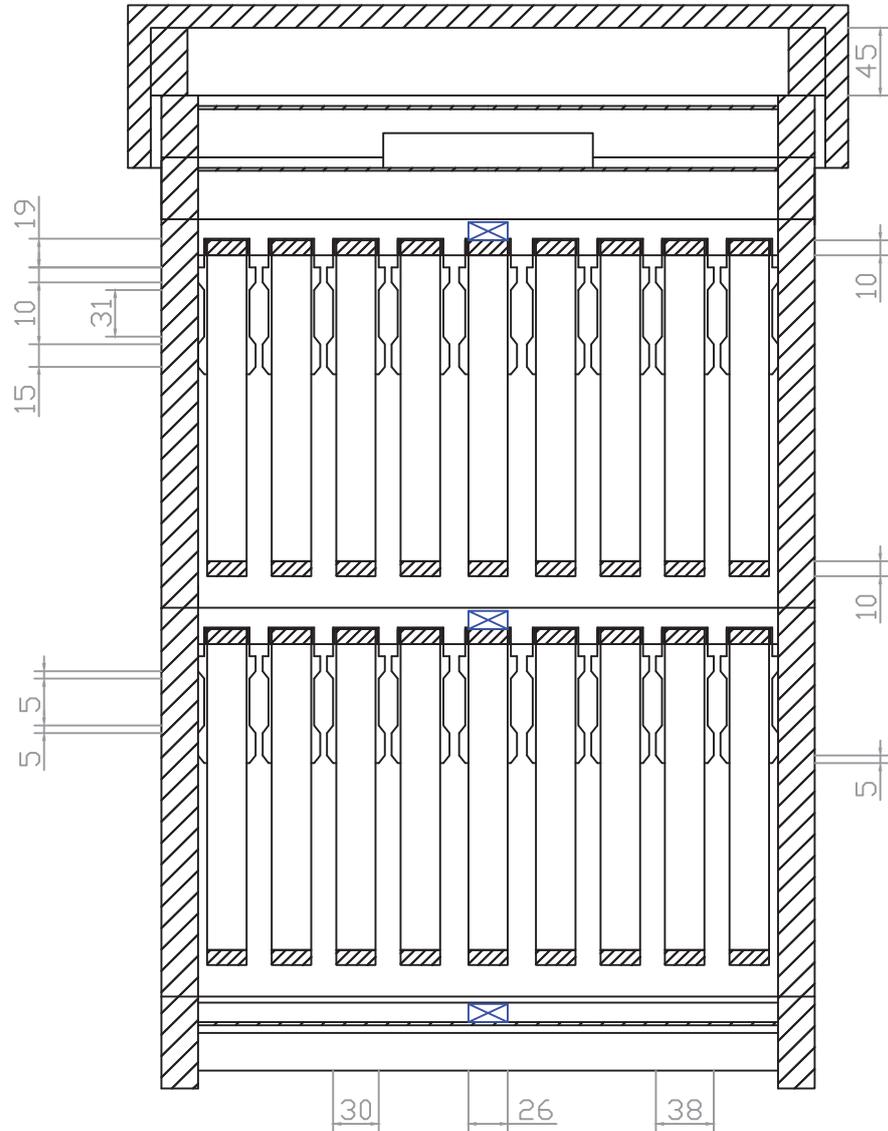
<i>Leyenda</i>	
	<i>Sensor DTH21</i>



Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.				
	Fecha	Autor	ULL Universidad de La Laguna	ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
<i>Dibujado</i>	6-2014	César		
<i>Comprobado</i>	6-2014	Pérez Méndez		
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN			
ESCALA:	Sección perfil con los sensores DHT21			Nº P. :5
1:5				Nom.Arch:

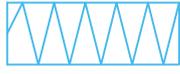
Leyenda

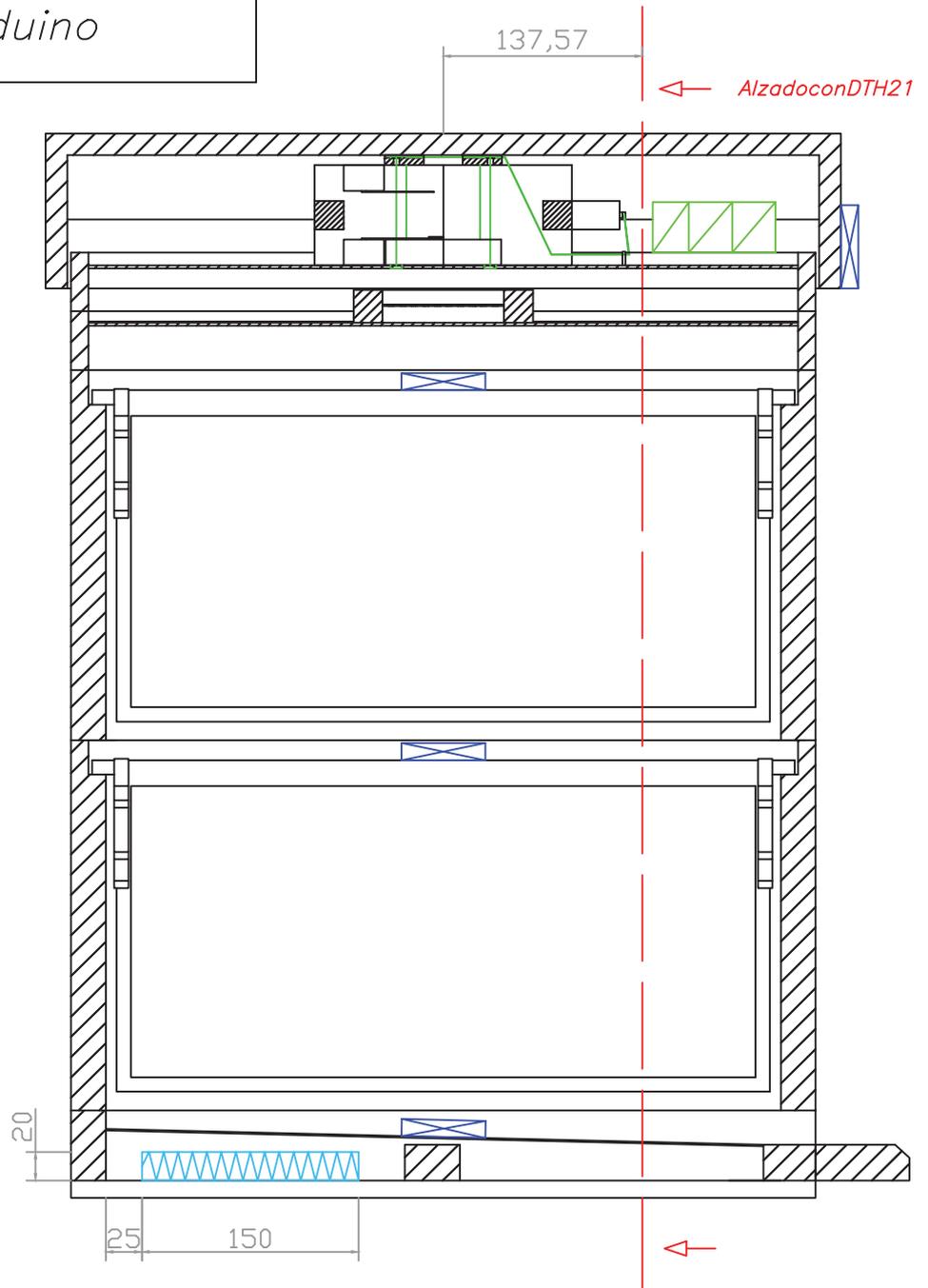
 Sensor DTH21



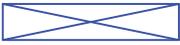
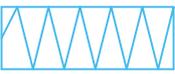
Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.

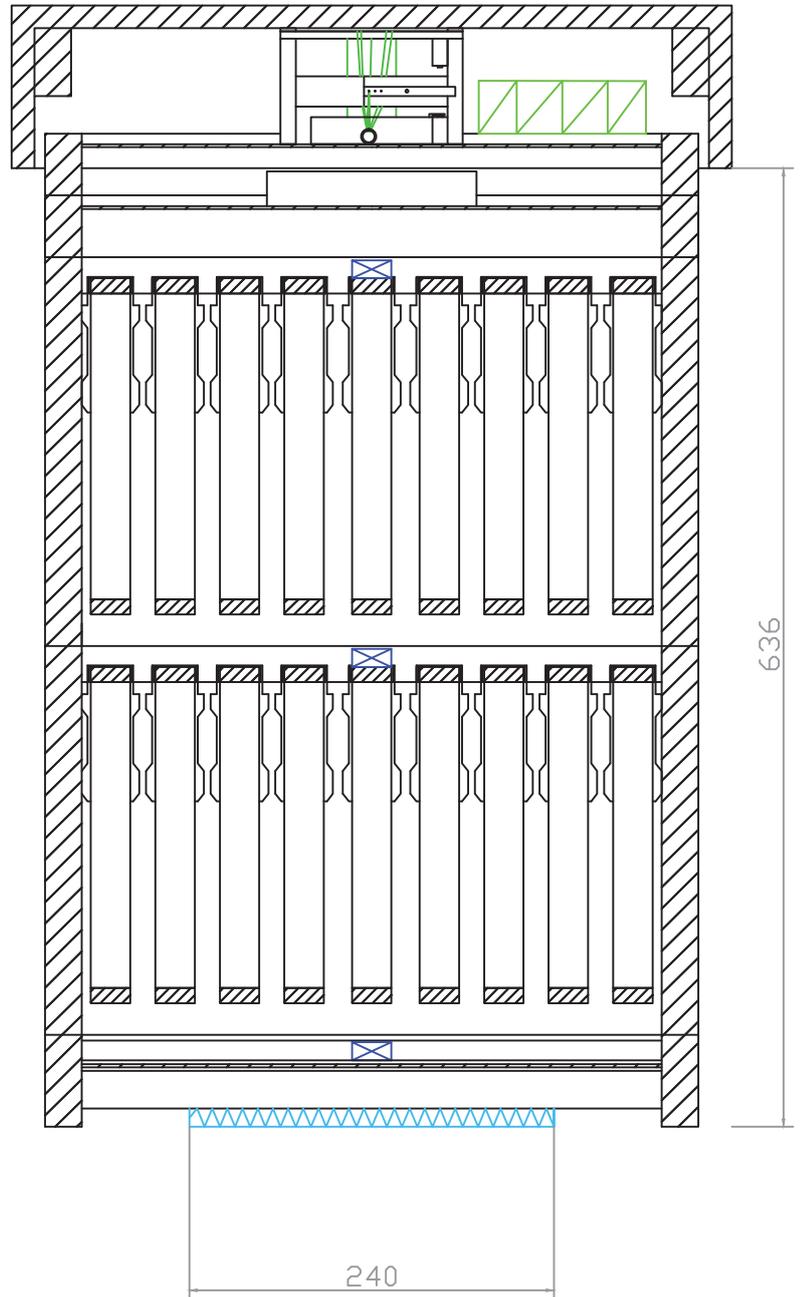
	Fecha	Autor	 ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
Dibujado	6-2014	César	
Comprobado	6-2014	Pérez Méndez	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	Sección alzado con los sensores DHT21		Nº P. :6
1:5			Nom.Arch: AlzadoconDHT21.dwg

Leyenda	
	Sensor DTH21
	Resistencia Calefactora
	Arduino



Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.			
	Fecha	Autor	 ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
Dibujado	6-2014	César	
Comprobado	6-2014	Pérez Méndez	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	Sección Perfil del sistema completo		Nº P. :8
1:5			Nom.Arch: Perfil sist comp.dwg

Leyenda	
	Sensor DTH21
	Resistencia Calefactora
	Arduino



Diseño e implementación del sistema de control y automatización de colmenas.			
	Fecha	Autor	 ESCUELA TECNICA SUPERIOR INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL Grado en Ing Electrónica Industrial y Automática Universidad de La Laguna
Dibujado	6-2014	César	
Comprobado	6-2014	Pérez Méndez	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN		
ESCALA:	Sección Alzado del sistema completo		Nº P. :9
1:5			Nom.Arch: Alzadosistcomp.dwg

Presupuesto

César Pérez Méndez

23-06-2014

Índice:

1. Presupuesto material:	2
2. Mano de obra:	2
3. Presupuesto total:	3

El presupuesto que se muestra a continuación es orientativo, pues aunque algunos componentes han sido comprados y sí se sabe el precio de mercado, otros son reciclados de otros usos y no está claro el precio de mercado de éstos.

1. Presupuesto material:

Material	Unidades	Precio unitario (€)	Importe (€)
Placa Arduino Mega 2560 R3	1	15,97	15,97
Sensor DHT21	4	3,37	13,48
Interruptor final de carrera	2	2,25	4,50
Tarjeta memoria SD 2GB	1	4	4
Módulo lector de SD para Arduino	1	4,29	4,29
Servo motor SKY6290 9g	1	8,69	8,69
Reloj DS1307 para Arduino	1	3,95	3,95
Resistencia calefactora	1	20	20
Resistencia 10K Ω	4	0.20	0.80
Resistencia 3.3K Ω	2	0.20	0.40
Resistencia 1.8K Ω	2	0.20	0.40
Resistencia 2.2K Ω	1	0.20	0.20
Resistencia 1K Ω	1	0.20	0.20
Relé de estado sólido	1	18.75	18.75
Diodo de potencia (250V y 10A)	1	0.60	0.60
Cables para conexión Arduino	1	3.85	3.85
Total			100.08

Tabla 1.

2. Mano de obra:

Para el cálculo del presupuesto de mano de obra, se ha estimado que para un Graduado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática la hora de trabajo corresponde a 20€ Teniendo en cuenta que la asignatura trabajo final de grado tiene 12 créditos, las horas de trabajo correspondientes son 120.

Concepto	Nº horas	Precio unitario (€)	Importe (€)
Mano de obra	120	20	2400

Tabla 2.

3. Presupuesto total:

Sumando el presupuesto material y la mano de obra, se obtiene el presupuesto final. En el caso del presente trabajo de fin de grado, el presupuesto final asciende a 2500.08 €

Anexo

César Pérez Méndez

23-06-2014

En el siguiente anexo, se adjunta el código que se ha desarrollado en el software Arduino.

```
//Se incluyen todas las librerías necesarias
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
#include <SD.h>
#include "DHT.h"
#include <PID_v1.h>
#include <Servo.h>

//Para la SD
File myFile;

//Para el Servo
Servo myservo;

//Pin correspondiente al relé de estado sólido
const int ledPin = 28;

//Pines correspondientes a los finales de carrera
//Final de carrera en la posición del caballete de ventilación totalmente cerrado
const int fco = 10;
//Final de carrera en la posición del caballete de ventilación totalmente cerrado
const int fcf = 11;

//Variables correspondientes a los finales de carrera
int caballeteorigen = 0;
int caballetefinal = 0;

//Variables empleadas para la lógica externa del controlador PI

//Cada 5 segundos actualiza el valor de actuación
unsigned long previousMillis = 0;
//Variable de actualización de previousMillis
unsigned long z1 = 5000;
//Es el valor de temporización actualizado, preparado para compararse con X1
int z2;
```

```
//Valor de actuación del PID proporcional a 5 segundos
float X1;

    //Define las variables del PID

//Parámetros de entrada a la librería del PID
double Setpoint, Input, Output;
//Parámetro de control para compensar la diferencia de temperatura entre cámara de cría y
techo.
int P1 = 8;
//Parámetro de control que garantiza cierto margen de seguridad.
int P2 = 5;
//Crea el controlador PID, con valor de kp = 0.2, ki = 0.005, kd = 0
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,0.2,0.005,0, DIRECT);

    //Define los pines correspondientes a los sensores DHT21
//Biquera
#define DHTPIN1 5
//Cámara Cría
#define DHTPIN2 6
//Techo
#define DHTPIN3 7
//Exterior
#define DHTPIN4 8
//El tipo de sensor es el DHT21
#define DHTTYPE DHT21
//Las 4 clases de los diferentes sensores
DHT dht1(DHTPIN1, DHTTYPE);
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE);
DHT dht3(DHTPIN3, DHTTYPE);
DHT dht4(DHTPIN4, DHTTYPE);
```

```
// Crea el objeto RTC
RTC_DS1307 RTC;
//Variables del Reloj
byte dia;
byte hora ;
byte minuto ;
byte segundo;

//Variable para guardar datos cada x segundos
int guardar;

    //Variables para el caballete
//Posición inicial del caballete de ventilación (totalmente cerrado)
int pos = 158;
int P3 = 5;

    //Variables que se van a estudiar (temperatura y humedad)

//Sensor en la biquera
float T1;
float H1;
//Sensor en la cámara de cría
float T2;
float H2;
//Sensor en el techo
float T3;
float H3;
//Sensor en el exterior
float T4;
float H4;
```

```
//Ciclo de inicialización
void setup () {

// Establece la velocidad de datos del puerto serie
Serial.begin(9600);

// Establece la velocidad de datos del bus I2C
Wire.begin();

// Establece la velocidad de datos del reloj
RTC.begin();

// Establece la fecha y hora del ordenador
RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));

//Define el pin de datos del servo
myservo.attach(12);

//Mueve el servo a la posición inicial pos (Caballete de ventilación cerrado)
myservo.write(pos);

//Configura que el pin correspondiente al relé de estado sólido es una salida
pinMode (ledPin, OUTPUT);

//Configura los pines correspondientes a los finales de carrera como entradas digitales
pinMode (fco, INPUT);
pinMode (fcf, INPUT);

//Se definen los parámetros del controlador PID
//Variable de entrada del controlador PID
Input = T3 + P1;
//Consigna del controlador PID
Setpoint = 35 - P2;
//El controlador PID opera de forma automática
myPID.SetMode(AUTOMATIC);
//Tiempo de ejecución del controlador PID
myPID.SetSampleTime(5000);
```

```

//Se configura e inicializa la tarjeta SD
Serial.print("Initializing SD card...");
pinMode(53, OUTPUT);
if (!SD.begin(53)) {
  Serial.println("initialization failed!");
  return;
}
Serial.println("initialization done.");
myFile = SD.open("test.csv", FILE_WRITE);
if (myFile) {
  Serial.print("Writing to test.csv...");
  myFile.println("Dia;Hora;Minuto;Segundo;T1;H1;T2;H2;T3;H3;T4;H4;X1;OUTPUT");
  myFile.close();
  Serial.println("done.");
}
else {
  Serial.println("error opening test.csv");
}

//Muestra por pantalla las variables que se van a leer para comprobar si el sistema evoluciona
correctamente
Serial.println("Dia  Hora:Minuto:Segundo\t T1 (C),\t H1 (%),\t T2 (C),\t H2 (%),\t T3 (C),\t
H3 (%), \t T4 (C),\t H4 (%),\t X1 (C),\t Output (%),\t");
}

//Ejecución cíclica
void loop () {
  // Obtiene la fecha y hora del RTC
  DateTime now = RTC.now();
  //Registra los valores del reloj en sus respectivas variables
  día = now.day();
  hora = now.hour();
  minuto = now.minute();
  segundo = now.second ();
}

```

```

//Cada 5 segundos se registran los datos en la tarjeta SD.
guardar = now.second()% 15;

//Registra los valores de temperatura y humedad en sus respectivas variables
T1 = dht1.readTemperature();
H1 = dht1.readHumidity();
T2 = dht2.readTemperature();
H2 = dht2.readHumidity();
T3 = dht3.readTemperature();
H3 = dht3.readHumidity();
T4 = dht4.readTemperature();
H4 = dht4.readHumidity();

//El servo va hacia la posición registrada en la variable pos
myservo.write(pos);

//Se leen ambos finales de carrera para saber la posición del caballete de ventilación
caballeteorigen = digitalRead(fco);
caballetefinal = digitalRead(fcf);

//Abrir el caballete de ventilación
if ((T4 >= (35-P3))||((T3 >= 35)&&(T4 < 35))){
  if (caballetefinal == LOW){
    pos -=1;
    myservo.write(pos);
    delay(100);
  }
}

//Cerrar el caballete de ventilación
else{
  if(caballeteorigen == LOW){
    pos += 1;
    myservo.write(pos);
    delay(100);
  }
}

```

```

Input = T3 + P1;

//El PID calcula el valor de actuación
myPID.Compute();

//El valor de actuación se hace proporcional a 5 segundos de actuación
X1 = Output * 20;

//El temporizador millis está en funcionamiento siempre.
//Cada vez que pasan 5 segundos, se le suman 5 a la variable previousMillis. De esta
forma, no queda desfasada en el tiempo.
if(millis()>z1){
  z1 += 5000;
  previousMillis += 5000;
}
//Si el temporizador menos previousMillis es menor que X1 (actuación proporcional a 5
segundos), la salida es alta, y la resistencia caliente.
//Sino, la salida es baja y la resistencia no actúa.
z2 = millis() - previousMillis;
if(z2 < X1){
  digitalWrite(ledPin,HIGH);
}
else{
  digitalWrite(ledPin,LOW);
}

if(guardar == 0){
  myFile = SD.open("test.csv", FILE_WRITE);
  //Se muestra por pantalla los valores de las variables de estudio.
  Serial.print(now.hour(), DEC);
  Serial.print(':');
  if(now.minute()>9){
    Serial.print(now.minute(), DEC);
  }
}

```

```
else{
    Serial.print('0');
    Serial.print(now.minute(), DEC);
}
Serial.print(':');
if(now.second()>9){
    Serial.print(now.second(), DEC);
}
else{
    Serial.print('0');
    Serial.print(now.second(), DEC);
}
Serial.print("\t\t");
Serial.print(T1);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(H1);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(T2);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(H2);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(T3);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(H3);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(T4);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(H4);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(X1);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(Output);
Serial.println();
```

```
//Se guardan en la memoria SD las siguientes variables
if (myFile) {
    myFile.print(dia);
    myFile.print(";");
    myFile.print(hora);
    myFile.print(";");
    myFile.print(minuto);
    myFile.print(";");
    myFile.print(segundo);
    myFile.print(";");
    myFile.print(T1);
    myFile.print(";");
    myFile.print(H1);
    myFile.print(";");
    myFile.print(T2);
    myFile.print(";");
    myFile.print(H2);
    myFile.print(";");
    myFile.print(T3);
    myFile.print(";");
    myFile.print(H3);
    myFile.print(";");
    myFile.print(T4);
    myFile.print(";");
    myFile.print(H4);
    myFile.print(";");
    myFile.print(X1);
    myFile.print(";");
    myFile.print(Output);
    myFile.println();
    myFile.close();
}
}
}
```