



**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS
Y ENERGÍA**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO
DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA
CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA
DE TERMOSTATOS INTELIGENTES**

**(Design and Construction of a Testing Bench for
the Study of the Saving Capacity and the
Efficiency of Smart Thermostats)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA DE MINAS**

Autor: Sergio Bustamante Sánchez

Director: Juan Carcedo Haya

Junio – 2017

ÍNDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
3. ESTADO DEL ARTE	17
4. METODOLOGÍA	20
4.1. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS	20
4.2. IMPLEMENTACIÓN	23
4.2.1. <i>Hardware y electrónica utilizada</i>	23
4.2.2. <i>Desarrollo del Software</i>	46
4.2.3. <i>Calibración del Banco de Pruebas</i>	50
4.3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO (ENSAYOS)	53
4.3.1. <i>Ensayo de funcionamiento de los termostatos para mantener la temperatura de consigna</i>	53
4.3.2. <i>Ensayo de funcionamiento de los termostatos durante un día completo</i>	53
4.4. TOMA DE DATOS	55
5. RESULTADOS	57
5.1. COMPORTAMIENTO DE LOS TERMOSTATOS PARA MANTENER LA TEMPERATURA DE CONSIGNA	57
5.1.1. <i>Termostatos</i>	57
5.1.2. <i>Conclusiones</i>	67
5.2. COMPORTAMIENTO DE LOS TERMOSTATOS DURANTE UN DÍA COMPLETO DE FUNCIONAMIENTO	69
5.2.1. <i>Termostatos</i>	69
5.2.2. <i>Conclusiones</i>	79
6. CONCLUSIONES FINALES	87
7. BIBLIOGRAFÍA	88
8. ANEXOS	91
A. FICHAS TÉCNICAS DE LOS TERMOSTATOS	91
B. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO	99
C. SCRIPTS DESARROLLADOS	102
D. INSTALACIÓN DEL SOFTWARE DE LA CÁMARA	112

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Energía primaria para la calefacción y la refrigeración, 2012. Fuente: Comisión Europea.	14
Figura 3.1. Programas piloto de termostatos inteligentes disponibles en Estados Unidos y Canadá. Fuente: E Source.	18
Figura 4.1. Diagrama de flujo de diseño de la cámara de ensayos térmicos. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 4.2. Termostatos sujetos a evaluación: Netatmo, Momit, Tado° y Nest. Fuente: Fabricantes de los termostatos.	23
Figura 4.3. Raspberry Pi 3 Model B. Fuente: RS Components.	25
Figura 4.4. Relación de pines GPIO. Fuente: pinout.xyz.	25
Figura 4.5. Diagrama de asignación de pines de los protocolos de comunicación. Fuente: pinout.xyz.	26
Figura 4.6. Placa PiFace™ Digital 2. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 4.7. Placa PiFace™ Control & Display 2. Fuente: Farnell.	27
Figura 4.8. Placa PiFace™ SHIM RTC. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 4.9. Placa ADC Pi Plus. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 4.10. Transductor para sondas Pt100. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 4.11. Esquema de alimentación del transductor y del conexionado de las sondas Pt100. Fuente: Setelsa.	30
Figura 4.12. Sonda Pt100. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 4.13. Esquema eléctrico de la sonda Pt100. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 4.14. Símbolo electrónico de un Amplificador Operacional. Fuente: Texas Instruments.	33
Figura 4.15. Esquema de conexión para aplicación de un amplificador inversor. Fuente: Texas Instruments.	33
Figura 4.16. Esquema de conexión en serie de dos amplificadores inversores. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 4.17. Amplificador operacional TL084CN. Fuente: Texas Instruments.	35
Figura 4.18. Transformador Traco® Power con salida ±12V. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 4.19. Tarjeta microSD empleada por la Raspberry Pi. Fuente: SanDisk.	37
Figura 4.20. Memoria USB empleada como respaldo de los archivos de datos generados. Fuente: ADATA	37
Figura 4.21. Vinoteca Saivod VS1210B empleada en el sistema. Fuente: El Corte Inglés.	38
Figura 4.22. Conexión de la nevera con el relé de la placa PiFace™ Digital 2. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 4.23. Almohadilla térmica rectangular RELAXY IMETEC HP-02. Fuente: RELAXY IMETEC.	39
Figura 4.24. Esquema de conexión de las placas a la Raspberry Pi. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 4.25. Esquema de conexión del sistema de adquisición de temperatura del interior de la cámara. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 4.26. Esquema de conexión de los termostatos y los sistemas de refrigeración y calefacción. Fuente: Elaboración propia.	43

Figura 4.27. Componentes instalados en el interior de la caja. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 4.28. Componentes instalados en la ventana de la caja. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 4.29. Cámara de ensayos térmicos creada con los termostatos instalados en su interior. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 4.30. Esquema de funcionamiento de la Cámara Térmica. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 4.31. Diagrama de bloques que representa el funcionamiento del script del sistema cámara.py. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 4.32. Diagrama de bloques que representa el funcionamiento del script del sistema lcd.py. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 4.33. Gráfico creado a partir de la primera toma de datos del prototipo. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 4.34. Simulador de resistencias de platino calibrado por el Centro Español de Metrología. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 4.35. Gráfica de calibración por 4 puntos. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 4.36. Gráfica de las velocidades de refrigeración y calentamiento de la cámara de ensayos térmicos. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 4.37. Programación diaria de temperatura utilizada en el ensayo. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 4.38. Gráfico creado a partir de los datos obtenidos de la Cámara Térmica y de los datos descargados del termostato Netatmo. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 5.1. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C y 17 °C con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 5.2. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 16 °C con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 5.3. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 5.4. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 5.5. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 16 °C con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 5.6. Termostato Momit manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 5.7. Termostato Momit manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 5.8. Termostato Momit manteniendo la temperatura de consigna a 16 °C. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 5.9. Termostato tado ^o manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 5.10. Termostato tado ^o manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C y 16 °C. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 5.11. Termostato Nest manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 5.12. Termostato Nest manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 5.13. Termostato Nest manteniendo la temperatura de consigna a 16 °C. Fuente: Elaboración propia.	66

Figura 5.14. Termostato Netatmo a lo largo de un día de funcionamiento con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 5.15. Termostato Netatmo a lo largo de un día de funcionamiento con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 5.16. Termostato Momit a lo largo de un día de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 5.17. Termostato tadoo a lo largo de un día de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 5.18. Termostato Nest a lo largo de un día de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 5.19. Campana de Gauss de la desviación de la temperatura con respecto a las temperaturas de consigna durante los ensayos de un día de funcionamiento y desviación de la temperatura en cada uno de los casos de temperatura de consigna establecidas (16, 17 y 19 oC). Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 5.20. Histogramas de la desviación de temperatura durante los ensayos realizados (Netatmo Histéresis, Netatmo Avanzado, Momit, Tado° y Nest). Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 5.21. Gráfico comparativo de tiempo en el que la temperatura ha permanecido en un rango de -1 a 1 °C de la temperatura de consigna. Fuente: Elaboración propia.	86
Figura 6.1. Termostatos sujetos a evaluación: Netatmo, Momit, tadoo° y Nest. Fuente: Fabricantes de los termostatos.	87
Figura 8.1. Descarga de la imagen del sistema operativo que se ha instalado en la Raspberry Pi. Fuente: Raspberrypi.org	99
Figura 8.2. Software Win32DiskImager empleado para montar la imagen del sistema operativo en la microSD. Fuente: Elaboración propia.	99

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Ejemplo de algunos programas piloto. Fuente: E Source.....	17
Tabla 4.1. Comparativa de especificaciones de los termostatos. Fuente: Elaboración propia. .	24
Tabla 4.2. Tabla de equivalencias de temperatura, resistencia y tensión del transductor. Fuente: Setelsa.	32
Tabla 4.3. Descripción de los pines del Amplificador Operacional TL084CN. Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 4.4. Valores medidos en la calibración de los canales del Amplificador Operacional. Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 4.5. Archivo Excel generado a partir de los datos obtenidos de la Cámara Térmica. Fuente: Elaboración propia.	55
Tabla 5.1. Resultados de los ensayos para mantener la temperatura de consigna. Fuente: Elaboración propia.	67
Tabla 5.2. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Netatmo con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 5.3. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Netatmo con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 5.4. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Netatmo con el Algoritmo Avanzado. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 5.5. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Netatmo con el Algoritmo Avanzado. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 5.6. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Momit. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 5.7. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Momit. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 5.8. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato tado°. Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 5.9. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato tado°. Fuente: Elaboración propia.	77
Tabla 5.10. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Nest. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 5.11. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Nest. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 5.12. Resultados de temperaturas máximas y mínimas reales de los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 5.13. Resultados de tiempos de encendido del sistema de calefacción parciales y totales de los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 5.14. Resultados de porcentajes de tiempo parciales en los que la temperatura ha sido superior o inferior a la temperatura de consigna en los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.	81
Tabla 5.15. Resultados de tiempos y porcentajes totales en los que la temperatura ha sido superior o inferior a la temperatura de consigna en los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.	83

Tabla 5.16. Resultados de tiempo y porcentaje en los que la temperatura se ha encontrado en un rango de ± 1 °C de la temperatura de consigna en los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.	86
Tabla 8.1. Ficha técnica del termostato Netatmo. Fuente: Elaboración propia.	91
Tabla 8.2. Ficha técnica del termostato Momit. Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 8.3. Ficha técnica del termostato Tado. Fuente: Elaboración propia.....	95
Tabla 8.4. Ficha técnica del termostato Nest. Fuente: Elaboración propia.	97

RESUMEN

La Comisión Europea explica cómo la calefacción y la refrigeración en los edificios y en la industria representan la mitad del consumo energético de la UE. Varios estudios explican cómo lograr un ahorro de energía en el hogar y el uso de termostatos inteligentes ayudará a reducir el consumo de energía al tiempo que aumentan la eficiencia de los hogares.

En este estudio se ha realizado una evaluación comparativa entre cuatro termostatos inteligentes que se encuentran actualmente en el mercado, cuyas características varían en términos de precio, precisión de las mediciones y de la temperatura, algoritmos, etc.

Se ha diseñado y construido una cámara de ensayos térmicos para la evaluación del funcionamiento y el comportamiento que presenta cada termostato. El diseño y la construcción de la cámara se ha realizado a partir de una nevera, una almohadilla térmica, una Raspberry Pi y los componentes electrónicos necesarios para su control y recolección de datos.

A partir de los ensayos realizados en la cámara de ensayos térmicos, se obtuvieron datos sobre el funcionamiento de los cuatro termostatos, tales como la anticipación de la temperatura de consigna, o la forma de mantenerla.

En cuanto al aprendizaje de las características de la vivienda (cámara de ensayos térmicos), fue necesario que el tiempo que estuvo en funcionamiento el sistema, fuese lo suficientemente grande para que cada termostato pudiese memorizar las características de la vivienda, tales como su inercia y su aislamiento térmico, así como, para mejorar el algoritmo que regula la temperatura, lo cual permitiría una menor oscilación con respecto a la temperatura de consigna.

El aprendizaje de los termostatos no ha podido ser demostrado y, en cuanto al modo de anticipación, se ha observado que los termostatos no mejoraron o aprendieron en este aspecto, ya que no optimizaron los tiempos de arranque del sistema de calefacción con el consiguiente aumento del consumo de energía.

ABSTRACT

The European Commission explains how heating and cooling in buildings and industry accounts for half of the energy consumption of the EU. Several studies explain how to achieve an energy saving at home and the use of smart thermostats will help to reduce energy consumption while increasing the efficiency of households.

In this study, a comparative evaluation was carried out between four smart thermostats that are now in the market, whose characteristics vary in terms of price, precision of measurements and set temperature, algorithms, etc.

A thermal test chamber was designed and constructed to evaluate the performance and behaviour of each thermostat. The design and construction of the camera was made from a refrigerator, a thermal blanket, a Raspberry Pi and the necessary electronic components for its control and data collection.

From the tests carried out in the thermal chamber, data on the operation of the four thermostats were obtained, such as the anticipation of the setpoint temperature, or the way of maintaining it.

As to their learning about the characteristics of housing (thermal test chamber), it was necessary to run the system time enough for each thermostat to memorize these characteristics, such as its inertia and its thermal insulation, as well as to generate a better algorithm to regulate the temperature, which would allow a lower oscillation with respect to the setpoint temperature.

The learning of the thermostats was not demonstrated and for the anticipation mode it was seen that the thermostats failed to improve or learn in this aspect, as they did not improve the start-up times of the heating system, with the consequent increase in energy consumption.

1. INTRODUCCIÓN

Para 2020, la UE pretende reducir al menos el 20% de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), aumentar la participación de las energías renovables en al menos el 20% del consumo y lograr un ahorro de energía del 20% o más. Todos los países de la UE también deben alcanzar un 10% en el uso de energías renovables en su sector de transporte.

Uno de los sectores que mejor puede contribuir para este horizonte 2020, es el sector de la calefacción y la refrigeración, ya que la calefacción y la refrigeración en los edificios y la industria suponen un 50% del consumo de energía de la UE.

La calefacción y el agua caliente en los hogares representan el 79% del consumo final total de energía (192,5 Mtep: millones de toneladas equivalentes de petróleo). La refrigeración es una porción relativamente pequeña del uso final total de energía. Únicamente el 18% de la calefacción y la refrigeración se genera a partir de energías renovables, mientras que el 75% continúa generándose a partir de combustibles fósiles. Esta tendencia en la utilización de combustibles fósiles está ligada con el cambio climático y el aumento de la temperatura.

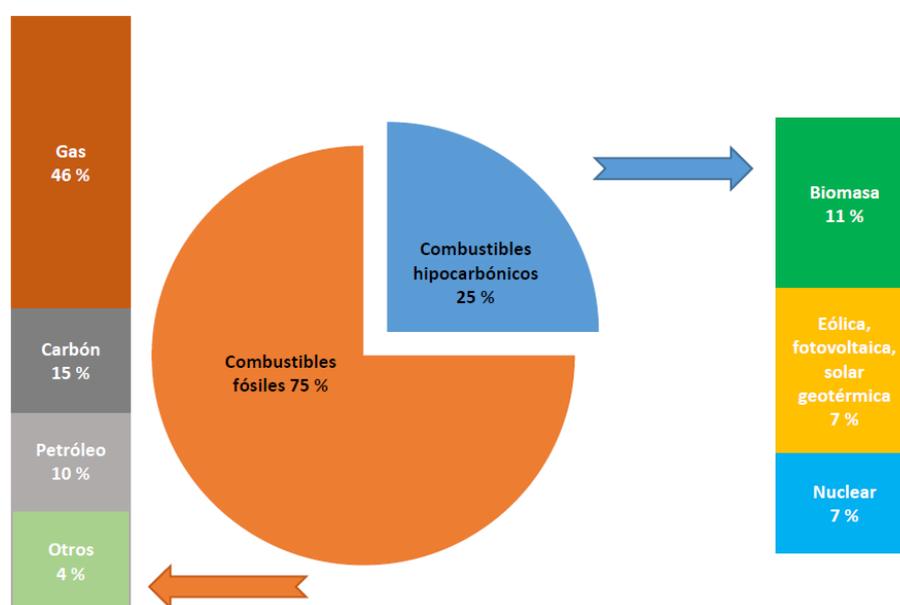


Figura 1.1. Energía primaria para la calefacción y la refrigeración, 2012. Fuente: Comisión Europea.

Debido a estos altos consumos, la Unión Europea creó en 2016 una estrategia relativa a la calefacción y la refrigeración para conseguir que sean más eficientes y sostenibles, además de contribuir a reducir las importaciones de energía y la dependencia, reducir costes para los hogares y las empresas y conseguir el objetivo de reducción de las emisiones de GEI de la UE.

Uno de los puntos de esta estrategia se centra en un uso más inteligente y sostenible de la calefacción y la refrigeración, factible dada la disponibilidad de la tecnología. Los edificios con tecnologías inteligentes permiten realizar un control remoto o automático de los sistemas de calefacción y refrigeración, calentamiento del agua e iluminación, en función de la fecha y la hora, humedad, temperatura exterior y ocupación del edificio.

Los termostatos inteligentes son una de estas tecnologías que dotan a los hogares de inteligencia encargándose de controlar la calefacción y la refrigeración, permitiendo disminuir los consumos para los usuarios y contribuir a disminuir los grandes consumos descritos anteriormente, para garantizar que se cumplan los objetivos de eficiencia y energías renovables de la UE.

Los termostatos inteligentes permiten programar la temperatura deseada en la vivienda para diferentes franjas horarias, para cada uno de los días de la semana. Además, permiten el control remoto en cualquier momento a través de la app de cada fabricante instalada en el Smartphone, Tablet u ordenador. Otras de las características que poseen estos termostatos, y que los hace “inteligentes”, es el control automático en función de múltiples variables, como pueden ser la distancia de uno o varios usuarios a la casa (Geolocalización), la temperatura o climatología exterior, el sensor de presencia o el sensor de humedad.

Los estudios existentes en cuanto a termostatos inteligentes definen en sus conclusiones los ahorros que se pueden llegar a obtener con su utilización, pero no indican como se consiguen estos ahorros, ni que diferencias existen entre la gran variedad de termostatos inteligentes que están en el mercado.

Este trabajo pretende estudiar la capacidad de ahorro y la eficiencia energética desde otro enfoque, no solo obteniendo valores de tanto por ciento de ahorro, sino de entender el comportamiento y el funcionamiento de los termostatos para conseguir estos ahorros de energía, ya que los estudios existentes hasta el momento no muestran cómo lo consiguen.

Partiendo de esta idea se seleccionaron varios modelos de termostatos inteligentes, actualmente en el mercado, cuyas características varían en términos de precio de venta, precisión de las mediciones, precisión de la temperatura de consigna, algoritmos, etc.

Tras la selección de los termostatos se presentó el problema de cómo evaluarlos, por lo que se ha diseñado y construido un banco de pruebas, que consiste en una cámara de ensayos térmicos construida a partir de elementos de refrigeración y calefacción, una Raspberry Pi y los componentes electrónicos necesarios para su control y adquisición de datos.

2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo principal que tiene este trabajo consiste en la realización de un análisis de una selección de termostatos inteligentes existentes actualmente en el mercado para llegar a comprender las diferencias de funcionamiento, capacidades de ahorro, eficiencia y confort, que existen entre ellos.

Para poder realizar el objetivo principal se plantea el problema de cómo llevarlo a cabo, por lo que se creará una metodología a través del diseño y construcción de un banco de pruebas, donde llevar a cabo los ensayos necesarios para lograr, o por lo menos acercarse al objetivo principal de este trabajo.

A partir de los ensayos que se realizarán en la cámara de ensayos térmicos (banco de pruebas) se obtendrán los datos de temperatura del interior de la misma, que variará en función del sistema de refrigeración o calefacción que esté en funcionamiento en cada momento y los tiempos de encendido y apagado de los termostatos, y a partir de los termostatos, se obtendrán los valores de temperatura que registran cada uno de ellos. Con todos estos datos, se generarán las gráficas y tablas necesarias para realizar el estudio y la comparativa entre los termostatos.

3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se va a presentar una idea general de cómo está la situación actual en cuanto a investigación acerca de los termostatos inteligentes. Para comenzar, se realizó la búsqueda de artículos, trabajos, informes, etc. que guardasen alguna relación con el objeto de esta investigación.

Durante la búsqueda se encontraron varios programas piloto en donde las empresas públicas incentivan a los usuarios a comprar e instalar un modelo de termostato, a cambio de acceder a entrar en su programa.

En estos programas piloto se instalan los termostatos en un número determinado de hogares con un sistema de calefacción o refrigeración específicos, y al final del periodo de estudio se observa el ahorro que han conseguido los usuarios.

Por un lado, de estos estudios no se puede obtener ni el comportamiento ni la capacidad de aprendizaje de los termostatos, y, por otro lado, no se puede asegurar al 100 % que los usuarios hayan utilizado los termostatos de manera adecuada durante el estudio, por lo que los resultados puede que no sean del todo correctos.

Tabla 3.1. Ejemplo de algunos programas piloto. Fuente: E Source.

Utility and pilot/program	Vendor	Thermostat	Program /pilot duration	Number of devices	Rebate amount	Retail value of thermostat	Demand reduction	Energy savings	Results resource
Bring your own thermostat									
Austin Energy's Power Partner Thermostat program pilot	Ecobee, EnergyHub, Nest	14 eligible devices	Ongoing from fall 2012	6.000	\$85	Varies by device	0.70 kW per home with one-way communication; 1.60 kW per home with two-way communication	13.0% cooling electricity savings	E Source communication with program manager
Avista's Washington Smart Thermostat Rebate	NA	22 eligible devices	Ongoing from October 2014	NA	\$50 to \$100	NA	NA	NA	NA
CenterPoint Energy's e5 Demand-Response Program	EnergyHub	Radio Thermostat of America, Filtrete	Summers ongoing from 2012	537	\$25 Home Depot gift card to use on thermostat purchase	3 eligible devices: \$110, \$140, \$207	1.20 kW per thermostat on average	13.8% cooling electricity savings	e5 CenterPoint Energy Pilot Results (PDF), Earth Networks (2012)
Enabling technology for a pricing program									
Baltimore Gas and Electric Smart Energy Rewards	Opower	No enabling technology	Ongoing from summer 2013	900.000	\$1.25/kWh	NA	NA	NA	NA
CPS Energy Nest Rush Hour Rewards Program	Nest	Nest	Ongoing	NA	\$85	\$249	1.18 kW per thermostat on average	AC run time cut by 55.0% on average	How Much Did Nest Labs Save Utilities Last Summer? Greentech Media (2014)
San Diego Gas & Electric Reduce Your Use Rewards	Any	Any	Ongoing	NA	\$1.25/kWh	NA	NA	NA	NA

térmicos a partir de una nevera, una manta térmica, y los componentes electrónicos necesarios para su mando y obtención de datos. De esta forma la cámara está administrada por los termostatos, por lo que se genera un sistema similar al de una vivienda en el que se puede variar sus características, como por ejemplo su inercia térmica.

El sistema de la cámara térmica se ha diseñado de manera modular de tal forma que en un momento dado se pueden cambiar los elementos tanto de refrigeración como de calefacción, y así, realizando unos pequeños cambios en la programación de los componentes electrónicos se tendrá una nueva cámara térmica con otras características básicas, como unas potencias o dimensiones mayores.

Con ayuda de la cámara térmica se podrán sacar datos de cada uno de los termostatos y en cuanto a su aprendizaje sobre las características de la vivienda, será necesario ejecutar el sistema durante un periodo lo bastante largo para que a cada termostato le dé tiempo a memorizar dichas características, como su inercia y su aislamiento térmico, así como a generar un algoritmo para regular mejor la temperatura, lo cual permitirá una menor oscilación respecto a la temperatura programada.

4. METODOLOGÍA

4.1. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

Como se ha comentado en apartados anteriores, se decidió construir una cámara térmica donde realizar los ensayos con los cuatros termostatos inteligentes. En este apartado se van a presentar las necesidades que debe cubrir el diseño y cómo se consiguió.

En la figura 4.1 se puede observar el diagrama de flujo que se siguió durante el diseño y posterior montaje del banco de pruebas. El diagrama se puede dividir en dos apartados, el primero de ellos engloba la selección de los componentes de la cámara y su montaje, y el segundo se refiere a los elementos necesarios en cuanto a conectividad.

A continuación, se va a explicar la selección de los elementos más importantes que influyen en el diseño de la cámara de ensayos térmicos. En apartados siguientes, se explicarán las características tanto de estos elementos, cómo del resto de componentes utilizados.

La primera de las necesidades que se estudió fue el espacio en el que iban a estar alojados los termostatos. Este espacio debía ser lo más hermético posible para que la temperatura exterior afectase lo mínimo a la temperatura interior. Partiendo de esta necesidad se estudió la posibilidad de utilizar una nevera, un arcón congelador, o una vinoteca, que, además de ser herméticos, poseían el sistema de refrigeración, con lo que una de las siguientes necesidades se estaría cumpliendo ya.

Partiendo de las tres opciones anteriores (nevera, arcón congelador, vinoteca), el siguiente aspecto que se estudió fue el precio, la potencia y el tamaño:

- Precio: cuanto más barato, mejor.
- Dimensiones: el tamaño debe ser lo suficientemente grande para alojar los cuatro termostatos y los elementos extra, necesarios para su montaje, conexión y medida de la temperatura. Por otro lado, no podía ser demasiado grande, ya que el montaje se iba a realizar en el laboratorio.
- Potencia: no debía tener mucha potencia ya que tenía que simular el enfriamiento normal en una vivienda.

Al final se optó por una vinoteca, que además de cumplir con las necesidades anteriores, posee una ventana de cristal que permite observar las temperaturas mostradas por los termostatos.

En cuanto al sistema de calentamiento, se estudiaron varias posibilidades, calefactor tubular o manta térmica. Al final se seleccionó la manta térmica porque distribuía mejor el calor en la base de la vinoteca, ya que el calefactor tubular además de calentarse demasiado rápido, el calor se originaría en un punto de la vinoteca, por lo que el gradiente de temperatura variaría demasiado de un punto a otro dentro de ella.

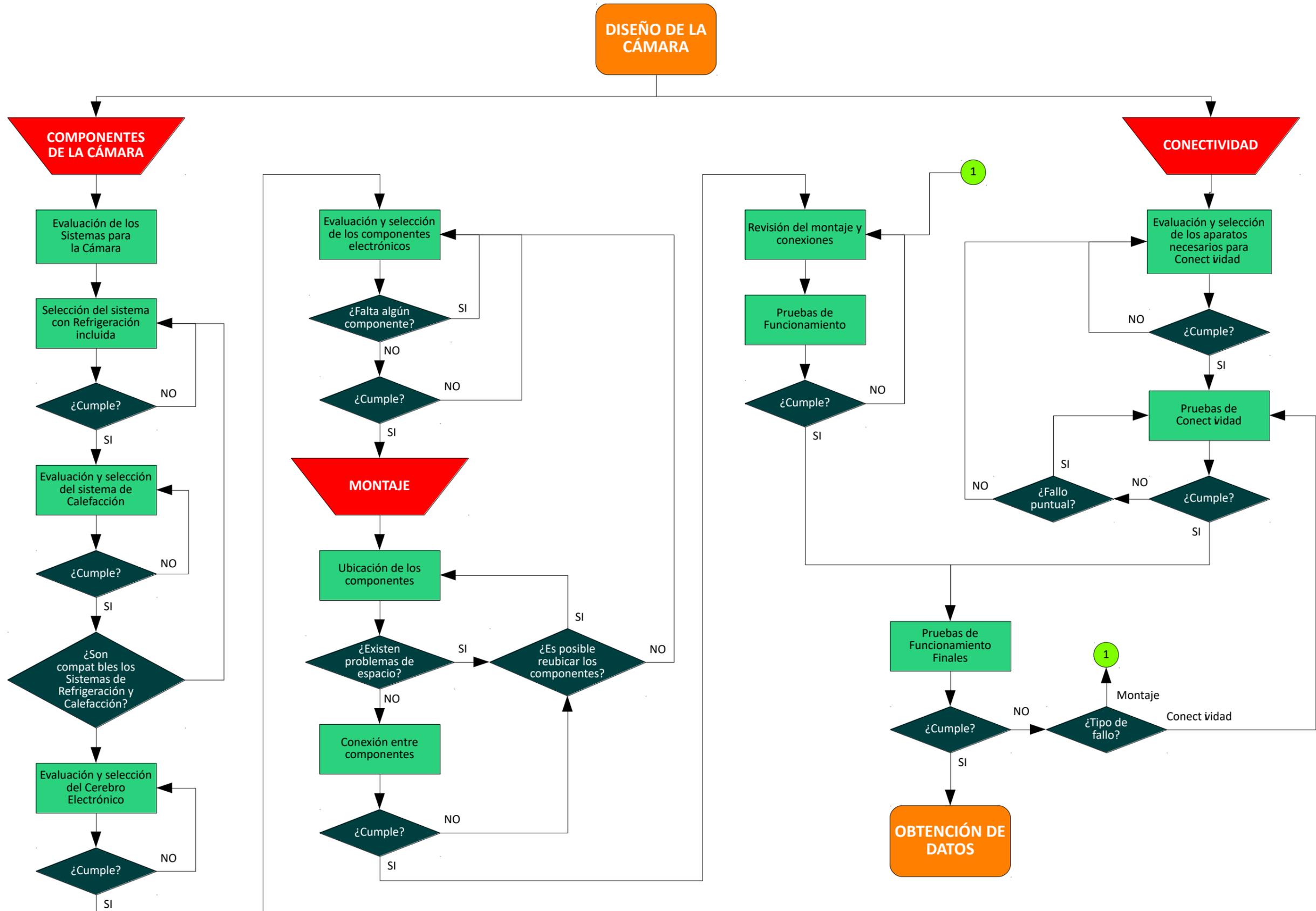


Figura 4.1. Diagrama de flujo de diseño de la cámara de ensayos térmicos. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso consistió en la selección del hardware que sería el encargado de manejar el encendido y apagado de los sistemas instalados en la cámara, además de recopilar y tratar los datos. Tras estudiar los distintos hardware que existen en el mercado, se optó por utilizar la Raspberry Pi, que es un ordenador de placa única muy sencillo, pero capaz de manejar todos los elementos instalados. A parte de esto, se seleccionó la Raspberry Pi por el soporte existente, su precio y su sistema operativo.

La Raspberry Pi posee un gran soporte, ya sea desde la propia Fundación Raspberry, como de comunidades de entusiastas o foros, su precio también fue uno de los motivos, ya que su coste en comparación a lo que puede ofrecer, es muy ajustado, y, por último, su sistema operativo, aunque se pueden instalar distintos sistemas operativos, el más importante y el más equilibrado es Raspbian, basado en Debian.

El resto de elementos que componen la parte electrónica de la cámara, fueron seleccionados debido a las necesidades de las siguientes características:

- Relés para el apagado y encendido de los sistemas de refrigeración y calefacción.
- Entradas y salidas para el registro de encendido y apagado de los termostatos.
- Un display desde el que poder ver varios datos importantes.
- Sondas Pt100 para medir la temperatura en el interior de la cámara.
- Un transductor para transformar la resistencia de las sondas Pt100 a tensión.
- Un conversor analógico/digital para transformar los valores analógicos de las tensiones a la salida del transductor a valores digitales que la Raspberry Pi sea capaz de interpretar.

Como se puede observar en la figura 4.1, surgieron nuevas necesidades en la parte del diseño de los componentes, estas necesidades se solventaron con la adquisición del transformador y el amplificador operacional.

En cuanto a la fase de montaje, no surgieron mayores problemas, más que tener que reubicar los componentes dentro de la caja de fusibles, y cambiar el tipo de sujeción de los termostatos dentro de la cámara de ensayos.

En el apartado de conectividad, se estudió la necesidad de que tanto los termostatos como la Raspberry Pi tuviesen acceso a internet. Esta necesidad se solvento con la adquisición de un amplificador de red wifi con salida ethernet y un switch de 8 puertos. El amplificador se encarga de dar acceso a la red vía wifi a dos de los termostatos y a la Raspberry Pi, y, por otro lado, da acceso a la red vía ethernet a los otros dos termostatos con ayuda del switch.

4.2. IMPLEMENTACIÓN

4.2.1. Hardware y electrónica utilizada

Los elementos empleados para la construcción de la cámara de ensayos térmicos se muestran en la siguiente lista, posteriormente, se irán explicando sus características y funcionalidades:

- Raspberry Pi 3 Model B
- PiFace™ Digital 2
- PiFace™ Control and Display 2
- PiFace™ Shim RTC
- ADC Pi Plus
- Transductor
- Sondas Pt100
- Amplificador Operacional TL084CN
- Resistencias
- Fuente de alimentación
- Nevera
- Almohadilla térmica
- Tarjeta microSD y memoria USB
- Material adicional

4.2.1.1. Termostatos

Los termostatos evaluados son:

- Netatmo
- Momit Home Thermostat (Momit)
- Termostato inteligente tado° (Tado°)
- Nest Learning Thermostat (Nest)



Figura 4.2. Termostatos sujetos a evaluación: Netatmo, Momit, Tado° y Nest. Fuente: Fabricantes de los termostatos.

En la tabla 4.1 se presentan sus principales características en forma de tabla comparativa. En primer lugar, se encuentran las especificaciones de la temperatura de medición y la de ajuste, los huecos sin rellenar son debidos a que los fabricantes no proporcionan esas características. En segundo lugar, se encuentran el resto de características que los hacen inteligentes, como pueden ser la geolocalización, la conectividad de red, etc.

Tabla 4.1. Comparativa de especificaciones de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.

Termostato	Temperatura de medición		Temperatura de ajuste			
	Rango de medición (°C)		Precisión (°C)	Rango de ajuste (°C)		Incremento (°C)
	Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	
Netatmo	0	50	0,5	7	30	0,5
Momit	0	50	0,3	10	30	0,1
Tado°				5	25	0,1
Nest			0,5	9	32	0,5

Termostato	Ethernet/Wifi	Inalámbrico	Multizona (Varios dispositivos)	Soporte para aplicaciones de terceros
Netatmo	-/•	•		•
Momit	•/-		•	
Tado°	•/-		•	• (Próximamente)
Nest	-/•	•	•	

Termostato	Geolocalización	Sensor de humedad	Temperatura exterior	Precio
Netatmo	• (Con ayuda de aplicación de terceros)		•	179,00 €
Momit	•	•	•	129,00 €
Tado°	•	•	•	249,00 €
Nest	•	•	•	249,00 €

La característica de geolocalización se deshabilitará en todos los termostatos que la poseen, ya que no es una característica evaluable con las condiciones del banco de pruebas que se ha diseñado y construido.

4.2.1.2. Raspberry Pi 3 Model B

Raspberry Pi 3 Model B es un ordenador de placa única (Single Board Computer – SBC) de bajo coste, esto significa que es una computadora completa en un sólo circuito, su diseño se centra en un sólo microprocesador con la RAM, entradas/salidas y todas las demás características de un computador funcional en una sola tarjeta que suele ser de tamaño reducido, y que tiene todo lo que se necesita en la placa base.



Figura 4.3. Raspberry Pi 3 Model B. Fuente: RS Components.

En cuanto a la conectividad de la Raspberry Pi 3, ésta dispone de los siguientes puertos:

- HDMI
- 3.5 mm Jack para Audio/Video analógico,
- 4×USB 2.0 y ranura microSD
- Ethernet 10/100
- CSI (Camera Serial Interface) y DSI (Display Serial Interface)

Adicionalmente, también:

- 2.4 GHz 802.11n wireless
- Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth Low Energy

El header de la Raspberry Pi 3 está compuesto por unos pines conocidos como pines generales de entrada/salida (General Pin Input / Output – GPIO), situados en la parte superior de la placa. La Raspberry Pi 3 posee 40 de estos pines, en dos líneas de 20, en la figura 4.4 se puede observar su distribución.

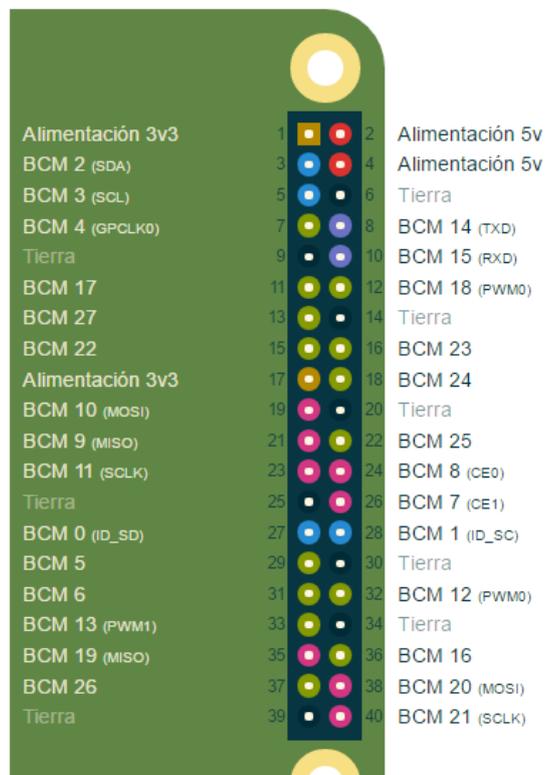


Figura 4.4. Relación de pines GPIO. Fuente: pinout.xyz.

Los pines se diferencian en las clases que se describen a continuación:

- GPIO: Son los pines de estado general, permiten proporcionar un estado lógico o leerlo.
- 5 VDC Power / 3.3 VDC Power: Son pines de alimentación a tensiones continuas de 5 y 3.3 voltios. Se usan para alimentar la electrónica adicional que se conecte sin tener que complicar el montaje. La proporciona la Raspberry Pi a través de su propia alimentación.
- GROUND: Línea de tierra.

Algunos de los pines generales de entrada/salida pueden ser convertidas en un bus serie de datos mediante su configuración. Estos bus que se pueden configurar son:

- SDA/SCL: Corresponden a las dos líneas necesarias para mantener un bus I²C (Inter-Integrated Circuit).
- MOSI/MISO/SCLK/CE0/CE1: Son las líneas del bus SPI (Serial Peripheral Interface).
- TX/RX: Líneas del bus UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter).

En la figura 4.5 se pueden observar los pines que utilizan cada protocolo de comunicación que la Raspberry Pi 3 posee, descritos anteriormente.



Figura 4.5. Diagrama de asignación de pines de los protocolos de comunicación. Fuente: pinout.xyz.

4.2.1.3. PiFace™ Digital 2

La PiFace™ Digital 2 es una placa complementaria para Raspberry Pi que permite la conexión con dispositivos externos.

Incluye componentes como relés, interruptores o entradas/salidas digitales y analógicas que permiten la conexión a sensores, motores, luces, etcétera y se pueden controlar mediante la placa Raspberry Pi.



Figura 4.6. Placa PiFace™ Digital 2. Fuente: Elaboración propia.

Posee las siguientes características:

- Dos relés de conmutación
- Cuatro interruptores táctiles
- Ocho entradas digitales
- Ocho salidas de colector abierto
- Ocho LEDs incorporados para indicar el estado de aplicaciones, circuitos de depuración y códigos
- Emulador gráfico
- Programación sencilla en lenguajes Python 3 y 2, Scratch y C
- Emulador gráfico
- Tamaño del agujero del tornillo de 1.5mm
- Temperatura de funcionamiento -40 ° a 85 °

Esta placa complementaria encaja sobre la Raspberry Pi y se conecta mediante el conector de expansión, o también se puede conectar mediante la conexión de los pines necesarios situados en el conector de expansión. La conexión a través de estos pines permite la comunicación entre la Raspberry Pi y la PiFace™ Digital 2 a través del bus SPI. Estos pines son:

- Pin físico 1: Alimentación 3,3V
- Pin físico 2: Alimentación 5V
- Pin físico 6: Tierra
- Pin físico 19: GPIO 10 (MOSI)
- Pin físico 21: GPIO 9 (MISO)
- Pin físico 23: GPIO 11 (SCLK)
- Pin físico 24: GPIO 8 (CE0)

4.2.1.4. PiFace™ Control and Display 2

La placa PiFace™ Control & Display 2 es un dispositivo plug and play que incluye una pantalla de caracteres, botones y mandos para interconexión con la Raspberry Pi sin teclado, ratón y monitor.



Figura 4.7. Placa PiFace™ Control & Display 2. Fuente: Farnell.

Se ahorra espacio y energía eliminando la necesidad de un monitor mientras que proporciona una interfaz de usuario interactiva simple pero capaz. Sus características principales son:

- Pantalla alfanumérica de 16 caracteres por 2 líneas
- Caracteres personalizados definibles por el usuario
- Retroiluminación de pantalla LED
- Receptor IR para control remoto por infrarrojos
- Interruptor de navegación de tres posiciones
- Cinco interruptores táctiles
- Las bibliotecas Python existentes, permiten construir menús de manera rápida y fácil

Como en el caso de la placa anterior, la PiFace™ Control & Display 2 encaja sobre la Raspberry Pi y se conecta mediante el conector de expansión, o de la misma manera, se puede conectar mediante la conexión de los pines necesarios para realizar la comunicación entre ambas a través del bus SPI. Estos pines son:

- Pin físico 1: Alimentación 3,3V
- Pin físico 2: Alimentación 5V
- Pin físico 6: Tierra
- Pin físico 19: GPIO 10 (MOSI)
- Pin físico 21: GPIO 9 (MISO)
- Pin físico 23: GPIO 11 (SCLK)
- Pin físico 26: GPIO 7 (CE1)

4.2.1.5. PiFace™ Shim RTC

PiFace™ SHIM RTC es una placa complementaria de reloj en tiempo real y calendario con batería de respaldo para Raspberry Pi que no interfiere con otras placas complementarias y proporciona una integración sencilla para enchufar y usar en el desarrollo de diseños y/o aplicaciones que requieren sello de tiempo.

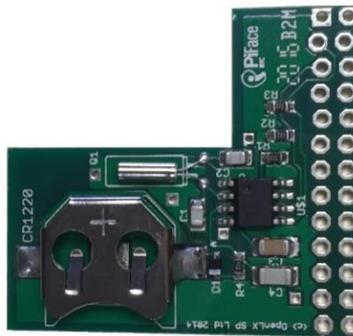


Figura 4.8. Placa PiFace™ SHIM RTC. Fuente: Elaboración propia.

Al tratarse de una placa muy fina, no ocupa por completo los conectores GPIO de la Raspberry Pi, por lo que se puede encajar sobre ella otra placa complementaria. Sus características más importantes son:

- Dispositivo RTC MCP7940N con Batería de Respaldo de Microchip
- Compatible con Raspberry Pi Modelos A, B y B+
- Funciona con conectores GPIO de 26 o 40 pines de Raspberry Pi
- Añade un reloj en tiempo real para aplicaciones que necesiten documentar el tiempo
- Encaja con la mayoría de placas complementarias
- Interfaz de comunicación I²C (SDA y SCL). Conexión con la Raspberry Pi:
 - Pin físico 3: GPIO 2 (SDA)
 - Pin físico 5: GPIO 3 (SCL)

4.2.1.6. ADC Pi Plus

El ADC Pi Plus es un conversor analógico digital de 8 canales de 17 bits, diseñado para trabajar con la Raspberry Pi. El ADC Pi Plus se basa en dos conversores A/D MCP3424 cada uno con 4 entradas analógicas, que se conectan con un convertidor de nivel para el bus I²C y un pequeño header que permite la sección del direccionamiento en el bus de cada uno de los conversores, mediante jumpers.

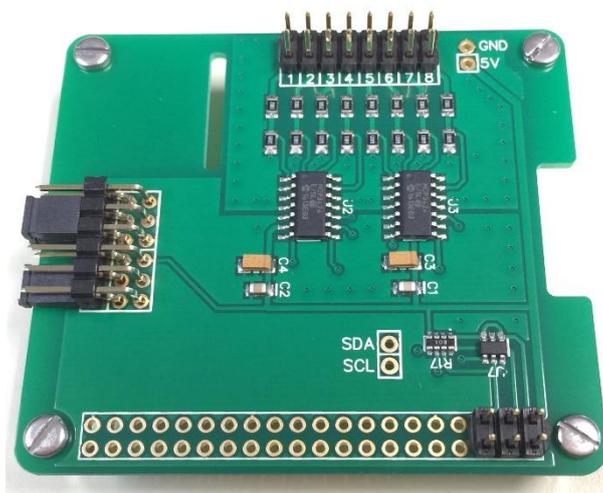


Figura 4.9. Placa ADC Pi Plus. Fuente: Elaboración propia.

Las características principales de la placa SDC Pi Plus son:

- Ocho entradas de 17 bits que miden de 0 a 5 V
- Control a través del puerto I²C de la Raspberry Pi
- Posibilidad de apilar hasta 4 placas ADC Pi Plus en una sola Raspberry Pi
- Varias direcciones I²C seleccionables por medio de jumpers
- Basado en el MCP3424 de Microchip Technologies Inc.
- Rango de escala completa de 5,0V
- Tensión de referencia de 2,048V (Precisión $\pm 0,05\%$, Deriva: 15 ppm / °C)
- Amplificador programable de ganancia (PGA): Ganancias de 1, 2, 4 u 8
- Opciones programables de velocidad de datos:
 - 3,75 SPS (17 bits)
 - 15 SPS (15 bits)
 - 60 SPS (13 bits)
 - 240 SPS (11 bits)
- Opciones de conversión de un solo disparo o continuas

Como se ha visto en las placas descritas anteriormente, esta placa puede encajarse sobre los conectores GPIO de la Raspberry Pi, o puede realizarse la comunicación entre ellas a través de la unión de los siguientes pines:

- Pin físico 1: Alimentación 3,3V
- Pin físico 2: Alimentación 5V
- Pin físico 3: GPIO 2 (SDA)
- Pin físico 5: GPIO 3 (SCL)
- Pin físico 6: Tierra

4.2.1.7. Transductor y sondas de temperatura

El transductor es el elemento que se encarga de medir la resistencia que presentan las sondas dependiendo de la temperatura y lo transforma a valores de tensión entre 0 y 10 V en sus salidas.

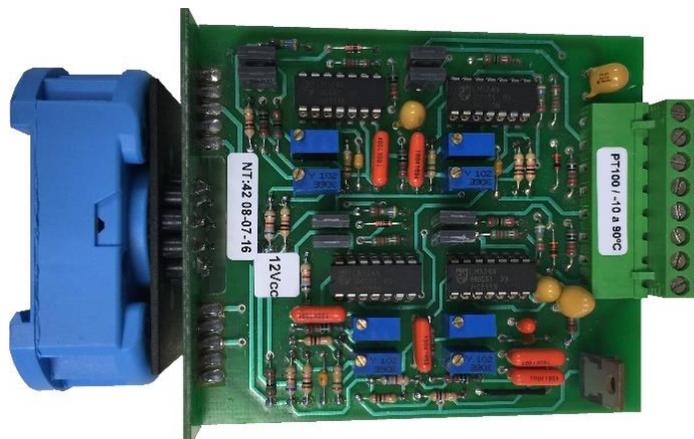


Figura 4.10. Transductor para sondas Pt100. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.11 se puede observar el esquema de alimentación del transductor y el conexionado de las sondas Pt100, el transductor está alimentado con 12 VDC y tiene conexiones para poder instalar hasta cuatro sondas Pt100.

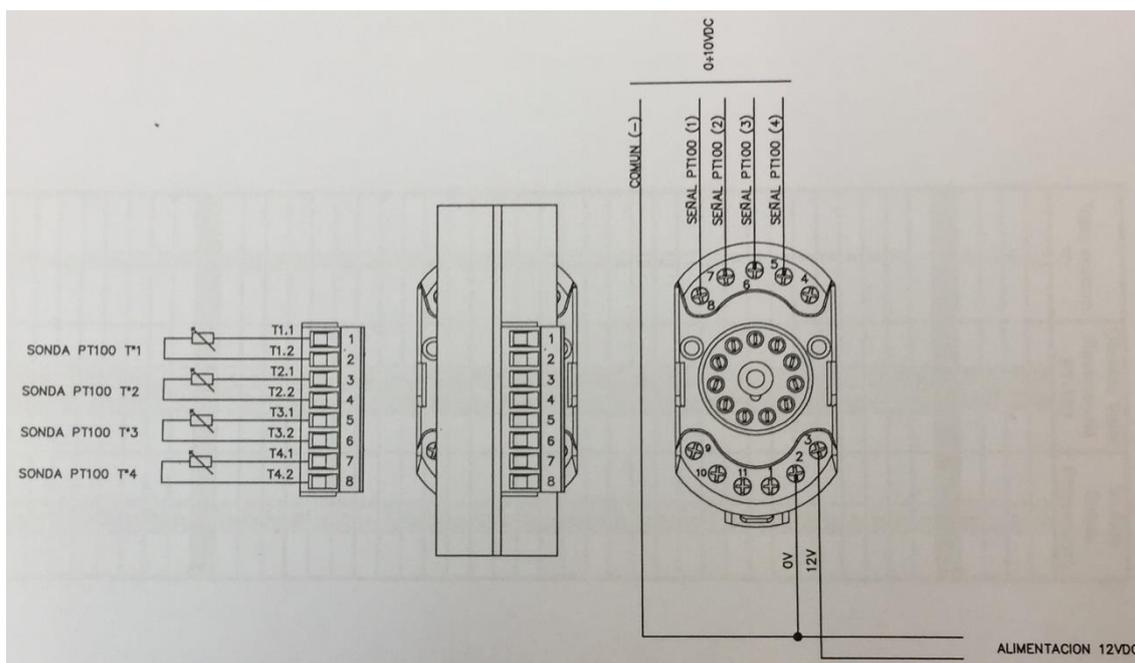


Figura 4.11. Esquema de alimentación del transductor y del conexionado de las sondas Pt100. Fuente: Setelsa.

Una sonda Pt100 es un sensor de temperatura, consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene una resistencia de 100 Ω y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Mediante tablas o fórmula es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde la resistencia que presenta la sonda en un momento determinado.

La sonda Pt100 está encapsulada, dentro de un tubo de acero inoxidable (vaina) se encuentra el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro lado, están los terminales eléctricos de los cables (cabezales), en la figura 4.12 se pueden observar los elementos de la sonda descritos.



Figura 4.12. Sonda Pt100. Fuente: Elaboración propia.

Las sondas Pt100 que se van a utilizar en la construcción de la cámara de ensayos térmicos, están formadas por 3 hilos (dos de color rojo y uno blanco), existen otras sondas con 2 o 4 hilos, pero las más comunes son las de 3. El único requisito que debe tener este tipo de sonda, es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica. La conexión entre la sonda y el transductor se realiza colocando en la clavija 1 (3, 5 y 7) el cable blanco, y en la 2 (4, 6 y 8), los cables rojos juntos.

Para conocer el valor de la resistencia del alambre de platino, se hace pasar una corriente conocida a través de los cables rojos (en la figura 4.13, los cables 2 y 3), con lo cual el transductor mide R_2+R_3 , lo que es lo mismo, $2R$. Luego mide la resistencia entre uno de los cables rojos y el blanco (cable 1), para finalmente restarle $2R$ al valor medido y obtener $R(t)$.

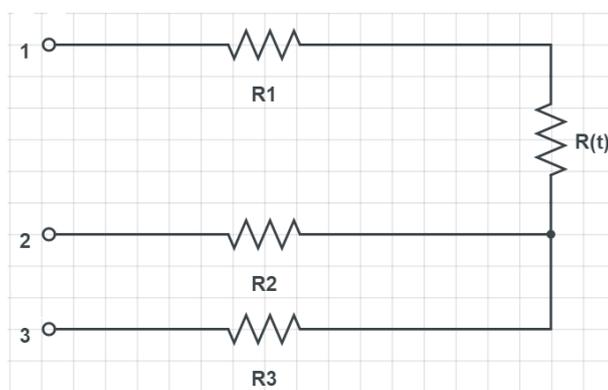


Figura 4.13. Esquema eléctrico de la sonda Pt100. Fuente: Elaboración propia.

Para cada valor de temperatura existe un valor de resistencia exacto, que puede definirse mediante fórmulas matemáticas.

Para el rango de temperatura de $-200 \dots 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ se aplica:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C (t - 100 \text{ } ^\circ\text{C}) t^3]$$

Para el rango de temperatura de $0 \dots 600 \text{ } ^\circ\text{C}$ se aplica:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2]$$

donde:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

t = Temperatura (°C)

R_t = Resistencia de la temperatura captada (Ω)

R_0 = Resistencia con $t = 0$ °C (100 Ω en sondas Pt100)

Para el cálculo se aplican las siguientes constantes:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

$$B = -5,7750 \cdot 10^{-7} \text{ (}^\circ\text{C}^{-2}\text{)}$$

$$C = -4,1830 \cdot 10^{-12} \text{ (}^\circ\text{C}^{-4}\text{)}$$

En la siguiente tabla 4.2, se observan las equivalencias entre la temperatura a la que está la sonda, la resistencia que presenta la misma y la tensión a la salida del transductor. Entre la resistencia y la tensión existe una relación lineal, con lo que, sabiendo la tensión en una de las salidas del transductor, es casi inmediato conocer la resistencia que presenta la sonda de temperatura.

Tabla 4.2. Tabla de equivalencias de temperatura, resistencia y tensión del transductor. Fuente: Setelsa.

Temperatura °C	Ohmios Valor Resistencia PT-100	Voltios Salida Conversora	Temperatura °C	Ohmios Valor Resistencia PT-100	Voltios Salida Conversora
-10	96,09	0,00	20	107,79	3,00
-5	98,04	0,50	21	108,18	3,10
-3	98,83	0,70	22	108,57	3,20
-2	99,22	0,80	23	108,96	3,30
0	100	1,00	24	109,35	3,40
1	100,39	1,10	25	109,73	3,50
2	100,78	1,20	26	110,12	3,60
3	101,17	1,30	27	110,51	3,70
4	101,56	1,40	28	110,9	3,80
5	101,95	1,50	29	111,28	3,90
6	102,34	1,60	30	111,67	4,00
7	102,73	1,70	35	113,61	4,50
8	103,12	1,80	40	115,54	5,00
9	103,51	1,90	45	117,47	5,50
10	103,9	2,00	50	119,4	6,00
11	104,29	2,10	55	121,32	6,50
12	104,68	2,20	60	123,24	7,00
13	105,07	2,30	65	125,16	7,50
14	105,46	2,40	70	127,07	8,00
15	105,85	2,50	75	128,99	8,50
16	106,24	2,60	80	130,89	9,00
17	106,63	2,70	85	132,8	9,50
18	107,02	2,80	90	134,7	10,00
19	107,4	2,90			

Despejando la temperatura en la fórmula de la resistencia cuando la temperatura varía entre 0 y 600 °C, se obtiene la siguiente fórmula de la temperatura en función de la resistencia:

$$t = \frac{-A \cdot R_0 + \sqrt{(A \cdot R_0)^2 - 4 \cdot B \cdot R_0(R_0 - R_t)}}{2 \cdot R_0 \cdot B}$$

En esta fórmula, se introducen las constantes A y B, anteriormente descritas, y la resistencia obtenida a partir de la tensión a la salida del transductor, y se obtiene el valor de la temperatura que está midiendo la sonda.

4.2.1.8. Amplificador Operacional

Un amplificador operacional (AO) es un dispositivo amplificador electrónico de alta ganancia acoplado en corriente continua que tiene dos entradas y una salida, es un dispositivo que puede aumentar cualquier tipo de señal, sea de voltaje o de corriente, de corriente alterna o de corriente directa.

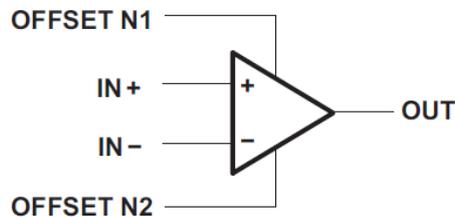


Figura 4.14. Símbolo electrónico de un Amplificador Operacional. Fuente: Texas Instruments.

El AO posee cinco terminales:

- Entrada no inversora (IN+)
- Entrada inversora (IN-)
- Alimentación positiva (OFFSET N1)
- Alimentación negativa (OFFSET N2)
- Salida (OUT)

En este caso, el AO no debe aumentar la tensión, sino que debe disminuirla a la mitad, para conseguir esto, se ha utilizado el AO como inversor. El AO inversor logra invertir un voltaje de entrada a la vez que lo amplifica. En la figura 4.15 se puede observar el esquema de conexión de un AO inversor.

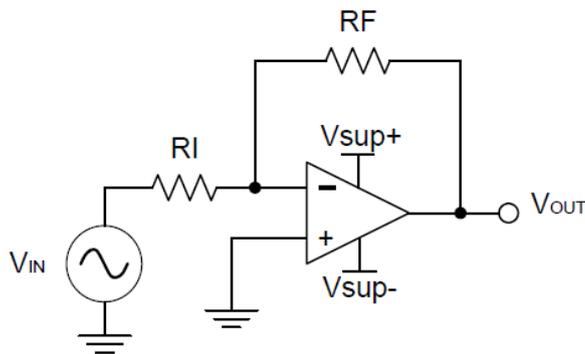


Figura 4.15. Esquema de conexión para aplicación de un amplificador inversor. Fuente: Texas Instruments.

Para conseguir disminuir la tensión a la mitad, es necesario utilizar dos amplificadores inversores en serie, el primero de ellos invierte la tensión (ganancia -1) y el segundo la invierte a la vez que la divide (ganancia -0,5). La ganancia del amplificador inversor se puede simplificar a la siguiente fórmula:

$$A_v = -\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{RF}{RI}$$

En el primero de los amplificadores inversores se desea conseguir $V_{OUT} = -V_{IN}$, o lo que es lo mismo, una ganancia de -1, aplicando esta relación de las tensiones en la fórmula anterior, se obtiene la relación entre las resistencias:

$$\frac{V_{OUT}}{-V_{OUT}} = -\frac{RF}{RI} \rightarrow \frac{RF}{RI} = 1 \rightarrow RF = RI$$

En el segundo de los amplificadores inversores se desea conseguir $V_{OUT} = -\frac{1}{2}V_{IN}$, o lo que es lo mismo, $A_v = -1/2$, aplicando esta relación en la fórmula anterior, se obtiene la relación entre las resistencias:

$$-\frac{1}{2} = -\frac{RF}{RI} \rightarrow 2 \cdot RF = RI$$

La elección del valor de las resistencias en el rango kΩ es deseable porque el circuito del amplificador utilizará corrientes en el rango de miliamperios, y esto asegura que no circulará demasiada corriente por el circuito.

La tensión de alimentación se debe elegir de tal manera que sea mayor que el rango de voltaje de entrada y el rango de salida, en este caso, el rango de entrada máximo será de 10V, con lo que el suministro del amplificador operacional se puede llevar a cabo con un transformador que a su salida proporciona ±12VDC, el mismo transformador que alimenta al transductor.

El esquema de conexión en serie de los dos amplificadores inversores y la elección de los valores de las resistencias se puede observar en la figura 4.16. Cabe destacar, que la relación entre las resistencias de 160 y 82 kΩ no es la calculada anteriormente, pero como será necesario realizar una calibración de los valores de la tensión a la salida, con que tengan una relación lo más próxima posible a la ideal será suficiente.

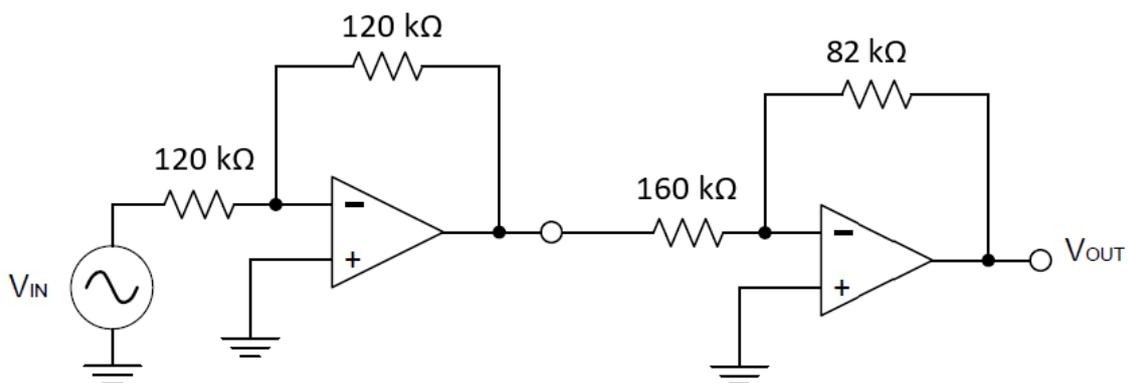


Figura 4.16. Esquema de conexión en serie de dos amplificadores inversores. Fuente: Elaboración propia.

Para que el montaje de los elementos ocupase el menor espacio posible, ya que se necesitan cuatro amplificadores operacionales inversores (dos para cada sonda Pt100), se optó por un amplificador operacional de 4 canales, en concreto el modelo TL084CN, en la figura 4.17 se observa tanto el amplificador operacional como la disposición y nombre de sus pines.

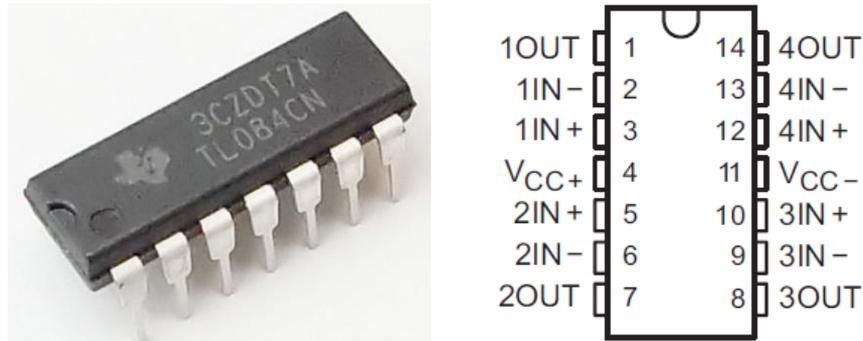


Figura 4.17. Amplificador operacional TL084CN. Fuente: Texas Instruments.

En la tabla 4.3 se pueden observar los nombres, el número que le corresponde, el tipo y una pequeña descripción de cada uno de los pines que posee el amplificador operacional TL084CN.

Tabla 4.3. Descripción de los pines del Amplificador Operacional TL084CN. Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Pin	I/O	Descripción
1IN-	2	I	Negative Input
1IN+	3	I	Positive Input
1OUT	1	O	Output
2IN-	6	I	Negative Input
2IN+	5	I	Positive Input
2OUT	7	O	Output
3IN-	9	I	Negative Input
3IN+	10	I	Positive Input
3OUT	8	O	Output
4IN-	13	I	Negative Input
4IN+	12	I	Positive Input
4OUT	14	O	Output
V _{CC-}	11	—	Power Supply
V _{CC+}	4	—	Power Supply

Una vez realizado el montaje de las resistencias y el amplificador operacional de 4 canales, es necesario realizar una calibración en las dos señales que se van a utilizar. Esta calibración se realizó con una fuente de alimentación y un polímetro. La fuente alimenta a la serie de amplificadores y con el polímetro se mide la tensión que existe a su salida, que debiera ser la mitad de la tensión de entrada, con estos valores se realiza una curva de ajuste que posteriormente se programará en la Raspberry Pi, para obtener unos valores lo más reales posibles de temperatura. A continuación, en la tabla 4.4 se pueden observar los valores medidos durante el ajuste de los canales del amplificador inversor.

Tabla 4.4. Valores medidos en la calibración de los canales del Amplificador Operacional. Fuente: Elaboración propia.

Tensión Fuente de Alimentación (V)	Tensión Canal 1 (V)	Tensión Canal 2 (V)
5,00	2,600	2,590
4,80	2,460	2,440
4,60	2,360	2,340
4,40	2,255	2,240
4,20	2,160	2,145

4,00	2,040	2,030
3,80	1,950	1,940
3,60	1,840	1,830
3,40	1,740	1,730
3,20	1,640	1,630
3,00	1,540	1,530
2,80	1,435	1,425
2,60	1,330	1,320
2,40	1,220	1,215
2,20	1,125	1,115
2,00	1,010	1,000
1,80	0,915	0,910
1,60	0,810	0,805
1,40	0,705	0,700
1,20	0,610	0,600
1,00	0,511	0,507
0,80	0,409	0,405
0,60	0,323	0,320
0,40	0,203	0,201
0,20	0,098	0,095
0,00	0,000	0,000

A partir de los datos recogidos en la tabla 4.4 se han realizado las curvas de ajuste de los dos canales, quedando de la siguiente forma:

- Canal 1: $V_1 = -0,0193 \cdot v_1^2 + 1,9926 \cdot v_1 - 0,008$
- Canal 2: $V_2 = -0,0198 \cdot v_2^2 + 2,0042 \cdot v_2 - 0,0049$

4.2.1.9. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación empleada convierte la corriente alterna de 100 – 240 VAC en corriente continua de ± 12 VDC, con una potencia de salida máxima de 15 W.

Esta fuente de alimentación es suficiente para alimentar tanto al transductor con 12 VDC, como al amplificador operacional de 4 canales con ± 12 VDC. Sus características principales son:

- Input:
 - 100 – 240 VAC, 47 – 63 Hz, 0,375 A máx.
- Output:
 - ± 12 VDC, ± 650 mA



Figura 4.18. Transformador Traco® Power con salida ± 12 V. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.10. Tarjeta microSD y Memoria USB

La tarjeta microSD se hace imprescindible en este tipo de sistemas, ya que es necesario montar en ella el sistema operativo de la Raspberry Pi para que sea mucho más cómodo y seguro. Por otro lado, es necesaria ya que en ella se realizarán una copia de los archivos generados durante el funcionamiento de la cámara de ensayos térmicos creada.

La tarjeta microSD empleada corresponde con el modelo SanDisk Ultra microSD UHS-I, se puede observar en la figura 4.19, y sus características más importantes son:

- Factor de forma: microSDHC
- Capacidad: 32 GB
- Rendimiento: Hasta 48 MB/s de velocidad de lectura
- Dimensiones: 14,99 x 10,92 x 1,02 mm (L x An x Al)
- Temperatura de funcionamiento: -25 °C a 85 °C
- Adaptador a tamaño SD
- Dimensiones del adaptador: 24 x 32 x 2,1 mm (L x An x Al)



Figura 4.19. Tarjeta microSD empleada por la Raspberry Pi. Fuente: SanDisk.

La memoria USB se ha utilizado como copia de seguridad de los archivos generados por el sistema, ya que en caso de fallo de la tarjeta microSD, todos los datos generados durante los ensayos se encontrarían en la memoria USB.

La memoria USB empleado durante la ejecución de los ensayos es una unidad flash USB de perfil fino de la marca ADATA, en concreto, corresponde al modelo UV100 (Figura 4.20), cuyas características principales son:

- Capacidad: 8GB
- Dimensiones: 41 x 19,3 x 5,8 mm (L x An x Al)
- Peso: 4 g
- Interfaz: USB 2.0
- Requisitos del sistema: Windows XP, Vista, 7, 8, 8.1, 10, Mac OS 9.X y Linux™ Kernel 2.4 o superior, no necesita controlador de dispositivo



Figura 4.20. Memoria USB empleada como respaldo de los archivos de datos generados. Fuente: ADATA

4.2.1.11. Nevera

La nevera empleada se corresponde con una Vinoteca Saivod VS1210B (Figura 4.21) con capacidad de 12 botellas. Se escogió este modelo en concreto por su potencia, su tamaño, su sistema de refrigeración, su rango de temperatura y su precio, a continuación, se pueden observar sus características principales:

- Tecnología de refrigeración: Sistema de enfriamiento por semiconductores (Peltier)
- Potencia: 70 W
- Rango de temperatura: 4 – 18 °C
- Ajuste por defecto: 10 °C
- Control: Electrónico
- Iluminación interior: LED
- Puerta: Doble Cristal
- Alimentación: 200 – 240 VAC 50/60Hz
- Dimensiones: 46 x 39,90 x 56,70 cm (ancho x alto x fondo)
- Peso: 12,90 kg



Figura 4.21. Vinoteca Saivod VS1210B empleada en el sistema. Fuente: El Corte Inglés.

Pará realizar las conexiones necesarias y la colocación de los termostatos cableados en su interior, se retiró la parte posterior de la misma y se realizaron dos pequeños agujeros por los que pasar los cables, en cuanto a la conexión con el relé de la placa PiFace™ Digital 2, se realizó un corte en el cable de fase (marrón) y mediante una clema de conexión se realizó la unión entre los dos extremos del cable cortado y los cables provenientes del relé (NO y CO) (marrones).

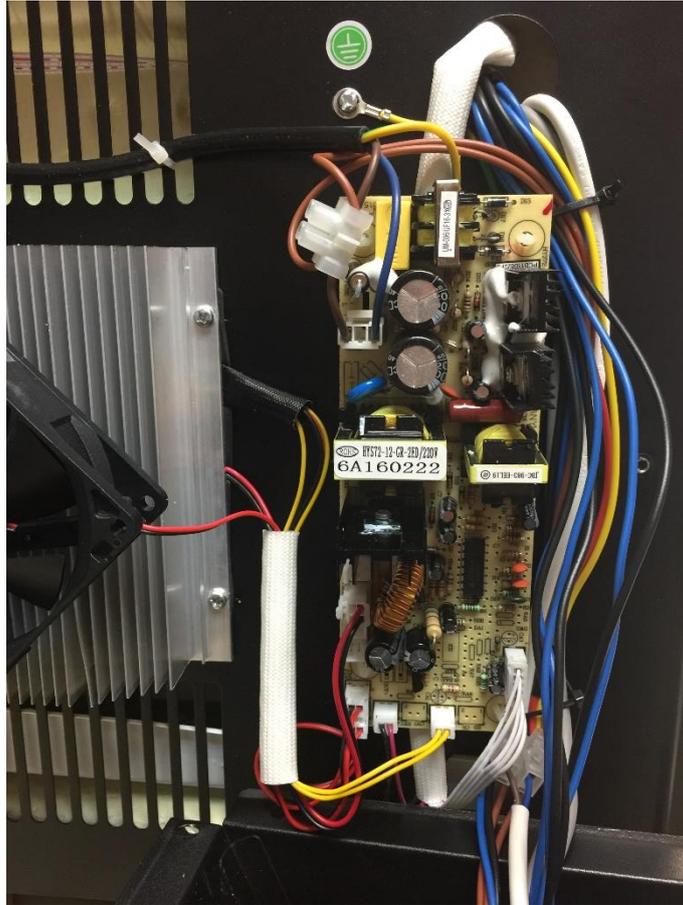


Figura 4.22. Conexión de la nevera con el relé de la placa PiFace™ Digital 2. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.12. Almohadilla Térmica

El Modelo de almohadilla térmica empleado en la construcción de la cámara de ensayos térmicos se corresponde con la almohadilla térmica rectangular RELAXY IMETEC HP-02 (Figura 4.23), como en el caso de la nevera, esta almohadilla se escogió por su potencia, su tamaño y su rango de temperaturas. Sus características principales son:

- Potencia: 15 W
- Dimensiones: 50 x 38 cm
- Mando digital y led con control electrónico de la temperatura
- Número temperaturas: 5
- Revestimiento: Suave microfibra
- Alimentación: 220 – 240 VAC 50 Hz
- Longitud cable: 2,1 m



Figura 4.23. Almohadilla térmica rectangular RELAXY IMETEC HP-02. Fuente: RELAXY IMETEC.

La conexión con la placa PiFace™ Digital 2 se realizó de la misma manera que en el caso de la nevera, mediante un corte en el cable de fase de la almohadilla, una clema de conexión y los cables provenientes del relé.

4.2.1.13. Material adicional

Adicionalmente, con el fin de proporcionar un soporte sólido y con el fin de poder experimentar sin tener la electrónica expuesta a posibles accidentes, se realizó su montaje dentro de una caja de fusibles, modelo Mistral65 de ABB, de dimensiones 250 x 232 x 154 mm (largo x ancho x fondo), y un índice de protección IP65.

Para facilitar la conexión y desconexión de los cables que provienen de los termostatos, en lugar de acceder a los tornillos de las entradas de la placa PiFace™ Digital 2, se optó por mapear los canales en una línea con 4 BNCs. De igual manera, la conexión y desconexión de las sondas Pt100, se realizó mediante un conector RS232.

Finalmente, el sistema creado lo cierran los siguientes componentes:

- Fuente de alimentación para Raspberry Pi.
- Placa de prueba, 80 x 60 x 10 mm (L x An x Al).
- Elevadores, tornillos, tuercas y arandelas.
- Leds (1 x Rojo, 1 x Amarillos y 4 x Verde) y resistencias auxiliares (6 x 220 Ω)
- Cables de conexión con terminales pin.
- Monitor y teclado.
- Cable adaptador HDMI a VGA.

4.2.1.14. Esquema de Conexionado

En la figura 4.24 se puede observar el esquema de conexión a la Raspberry Pi de las placas del fabricante PiFace™ y de la placa ADC Pi Plus. Todas ellas se conectan a 5 V, a 3,3 V y a tierra, excepto la placa RTC, que no lo necesita. Además de estas conexiones, cada una de ellas se conecta a la Raspberry Pi mediante los pines del bus que utilicen (SPI o I²C).

A continuación, en la figura 4.25 se observa el esquema de conexión del sistema encargado de medir la temperatura en el interior de la cámara.

Y, por último, la figura 4.26 muestra las conexiones entre los termostatos y la placa PiFace™ Digital 2, que se encargará de decir a la Raspberry Pi el estado del relé interno de los termostatos. Conectados a esa misma placa, pero en sus dos relés, se encuentran la nevera y la almohadilla térmica.

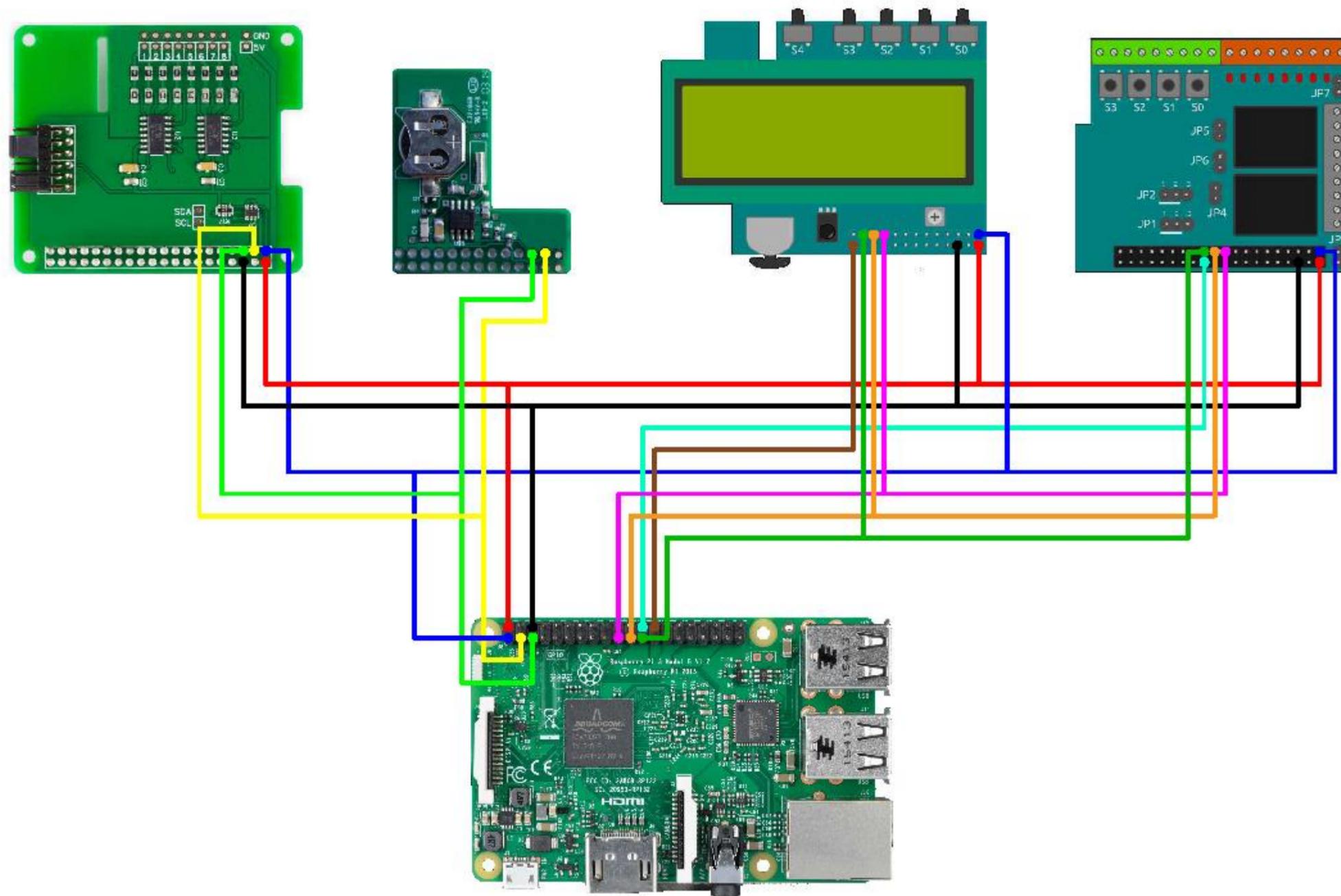


Figura 4.24. Esquema de conexión de las placas a la Raspberry Pi. Fuente: Elaboración propia.

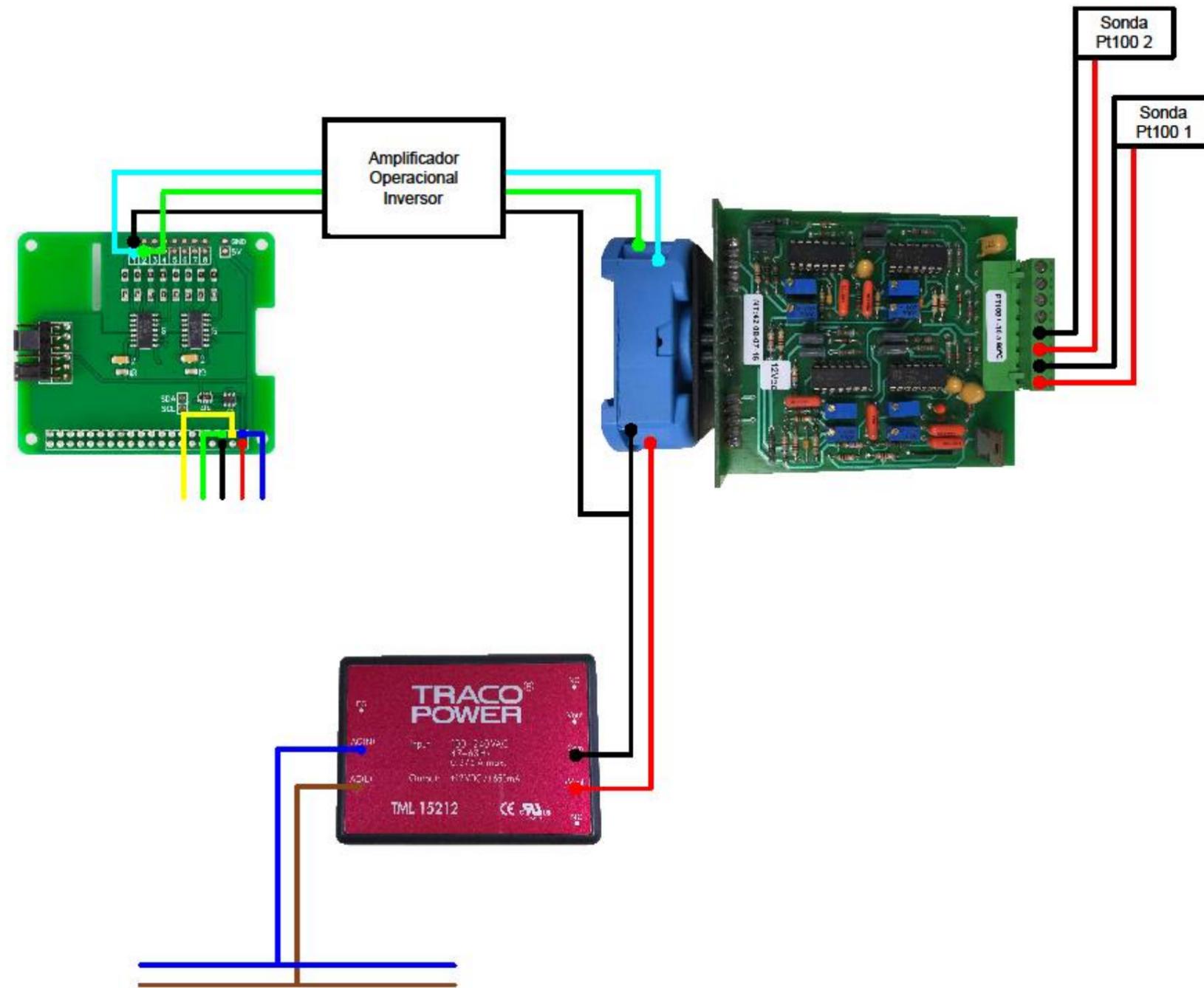


Figura 4.25. Esquema de conexión del sistema de adquisición de temperatura del interior de la cámara. Fuente: Elaboración propia.

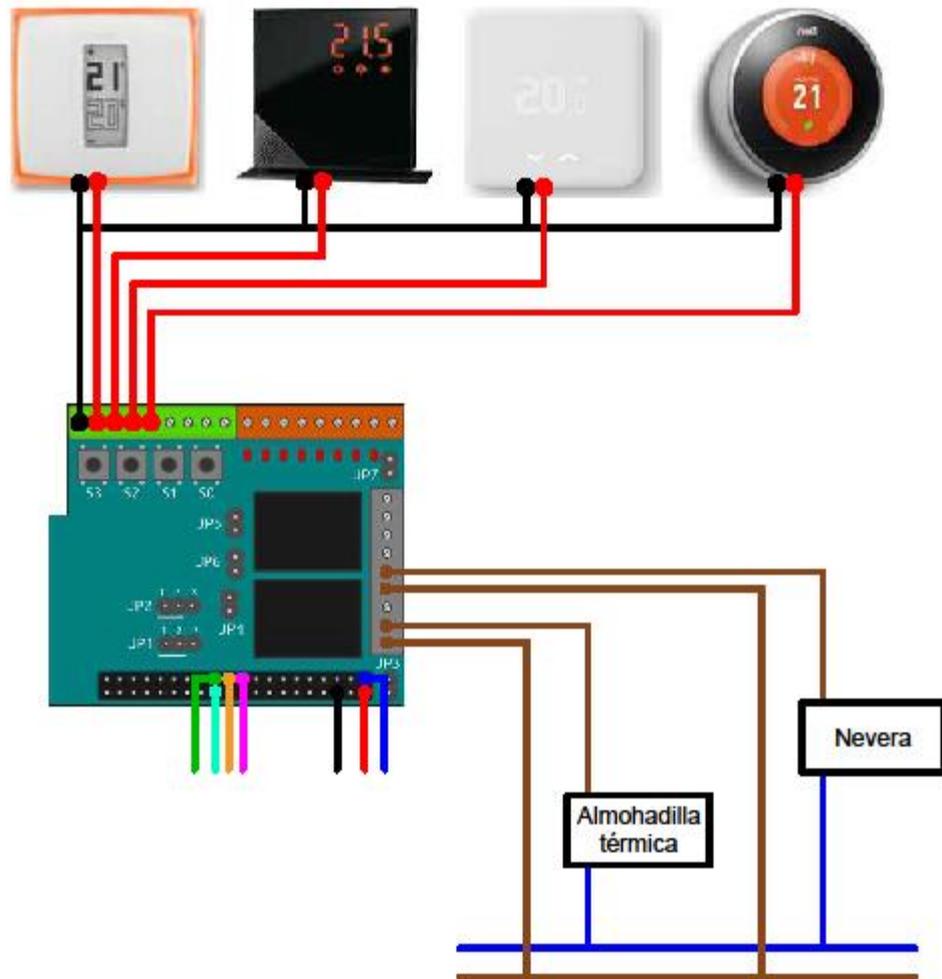


Figura 4.26. Esquema de conexión de los termostatos y los sistemas de refrigeración y calefacción.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.15. Montaje de los elementos

En la figura 4.27 se puede observar la ubicación final de los anteriores elementos dentro de una caja de fusibles. Se ha realizado de esta manera para que la parte electrónica de la cámara estuviera más protegida y a la vez fuese manejable.

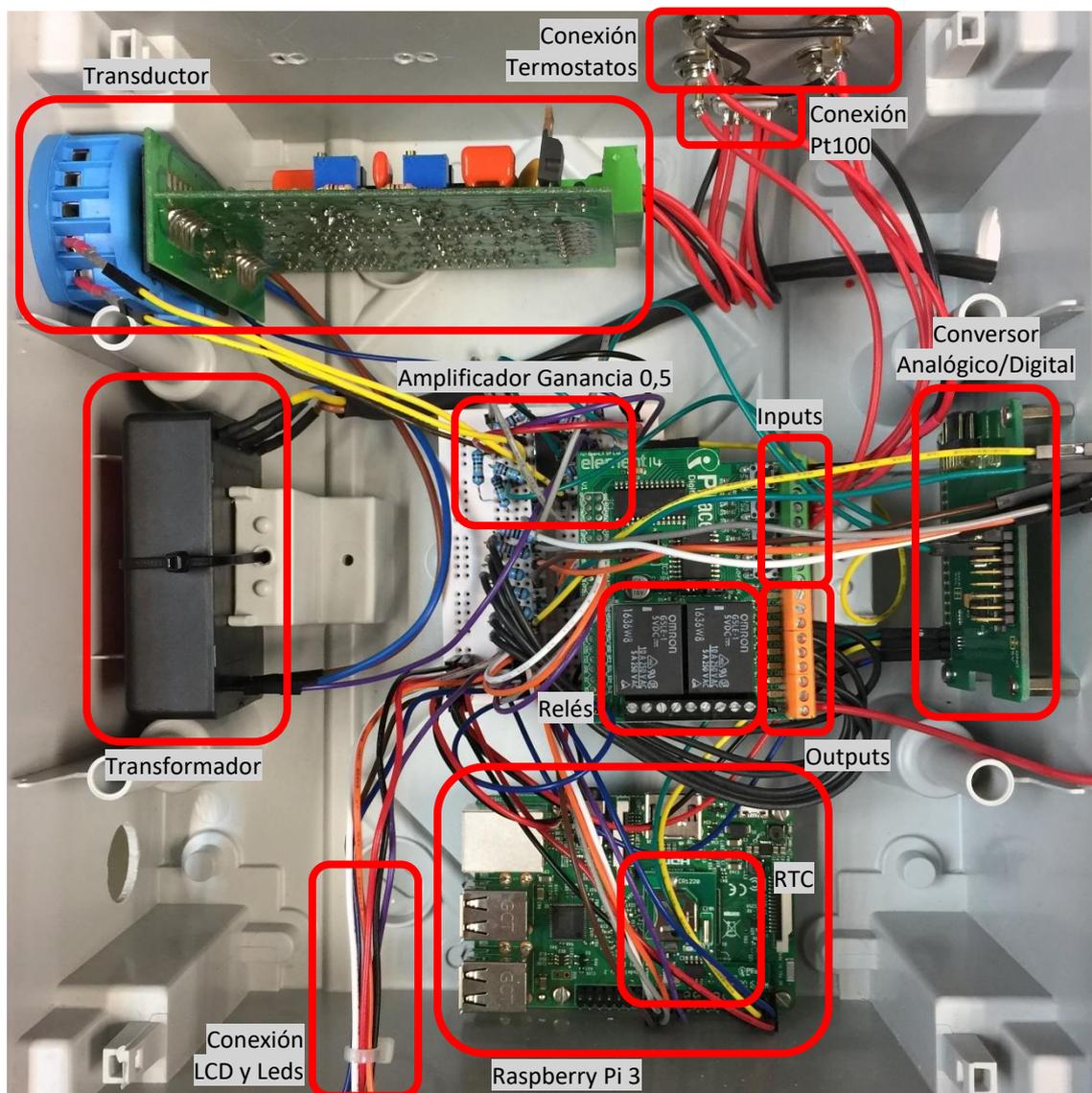


Figura 4.27. Componentes instalados en el interior de la caja. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.28 se pueden apreciar los elementos diseñados para observar en tiempo real algunos de los datos que el sistema puede obtener. Se han situado en una ventana en la caja de fusibles para que su visualización sea más accesible, simple y rápida, sin necesidad de tener que acceder a los archivos de datos cada vez que se desee o sea necesario realizar una comprobación del funcionamiento del sistema.



Figura 4.28. Componentes instalados en la ventana de la caja. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 4.29, se puede observar la cámara de ensayos térmicos creada, con todos sus componentes montados y los termostatos ya instalados en su interior, lista para funcionar.

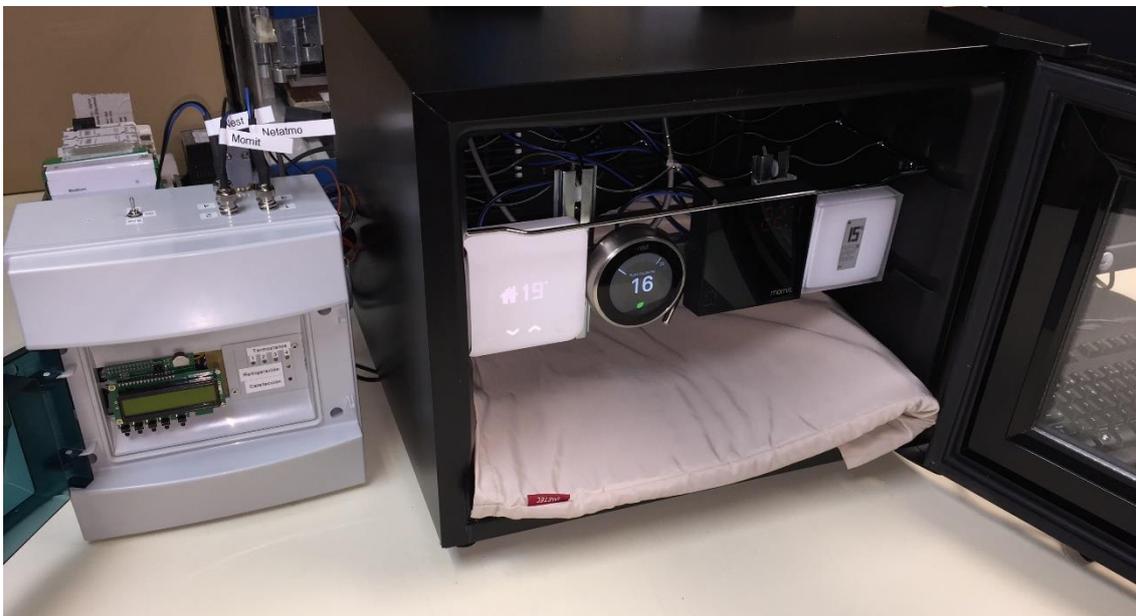


Figura 4.29. Cámara de ensayos térmicos creada con los termostatos instalados en su interior. Fuente: Elaboración propia.

Los termostatos han sido instalados en el interior de la cámara, sobre carril DIN, y éste a su vez ha sido sujetado a la cámara por medio de las baldas metálicas que posee la nevera.

4.2.2. Desarrollo del Software

El primer paso que se realizó, fue la instalación del sistema operativo en la Raspberry Pi, el sistema operativo elegido fue Linux. De las múltiples imágenes del sistema operativo preparadas para su uso con Raspberry, se eligió Raspbian que es el sistema operativo oficial de la Fundación, basado en Debian Jessie. Puede instalarse de dos formas, la primera es a través de NOOBS (New Out Of the Box Software), que es un instalador de sistema operativo que contiene Raspbian, también proporciona una selección de sistemas operativos alternativos para descargar de Internet e instalar. La segunda forma de instalar Raspbian, consiste en descargar la imagen desde su página web y a continuación montar la imagen en una tarjeta microSD.

La imagen del sistema operativo se presenta con dos opciones de descarga, normal y lite. La opción lite, consiste en una mínima imagen basada en Debian Jessie, mientras que la normal, añade a la versión lite, más software y PIXEL, que es el escritorio.

Se escogió la versión normal para instalar en la Raspberry Pi, ya que es más sencillo su manejo con la posibilidad de tener escritorio, y, además, el sistema operativo viene preinstalado con un montón de software para la educación, programación y uso general, por ejemplo, tiene Python, Scratch, Sonic Pi, Java, Mathematica, etc.

Antes de comenzar el desarrollo del software, se debe realizar un acondicionamiento del sistema operativo base. Estos pasos, de forma más detallada, se presentan en el ANEXO B. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO 1.B, no obstante, a continuación, se realiza un breve repaso de las acciones.

Lo primero que se debe realizar, es una actualización del sistema y una comprobación de que no haya dependencias rotas, esto se realiza, aunque la versión del sistema operativo instalado sea la más actual.

El siguiente paso es una configuración del entorno, se realizan el cambio de la contraseña por defecto, para más seguridad, el ajuste del teclado y la zona horaria.

A continuación, se instalan los módulos necesarios para el sistema, que nos permiten el uso del bus I²C, “pythonsmbus” e “i2c-tools”. Con el fin de simplificar el montaje de unidades USB externas y ofrecer una mayor compatibilidad, también se añaden los paquetes “usbmount” y “ntfs-3g”. También se instala el sistema de gestión de paquetes en Python “pip” y la librería para acceso a información del sistema y procesos “psutil”.

Por último, antes de comenzar a desarrollar el software que va a manejar la cámara térmica, es necesario instalar los repositorios de código proporcionados por los propios distribuidores de los módulos adquiridos, todos ellos codificados en Python. Una vez obtenidos los códigos de cada una de las placas, éstos permiten ejecutar un código de test para comprobar que todo funciona correctamente.

El esquema de funcionamiento de la figura 4.30 es la manera de funcionar que se ha diseñado para la cámara térmica, con lo que el software a desarrollar debe satisfacer todas las necesidades de funcionamiento.

El funcionamiento de la cámara se puede dividir en tres apartados. El primero se corresponde con la medida de temperatura en su interior, a través de las sondas Pt100. El segundo se encarga de encender y apagar los sistemas de calefacción y refrigeración de la cámara, y, por último, el tercer apartado se encarga de obtener los datos de trabajo de los dos apartados anteriores.

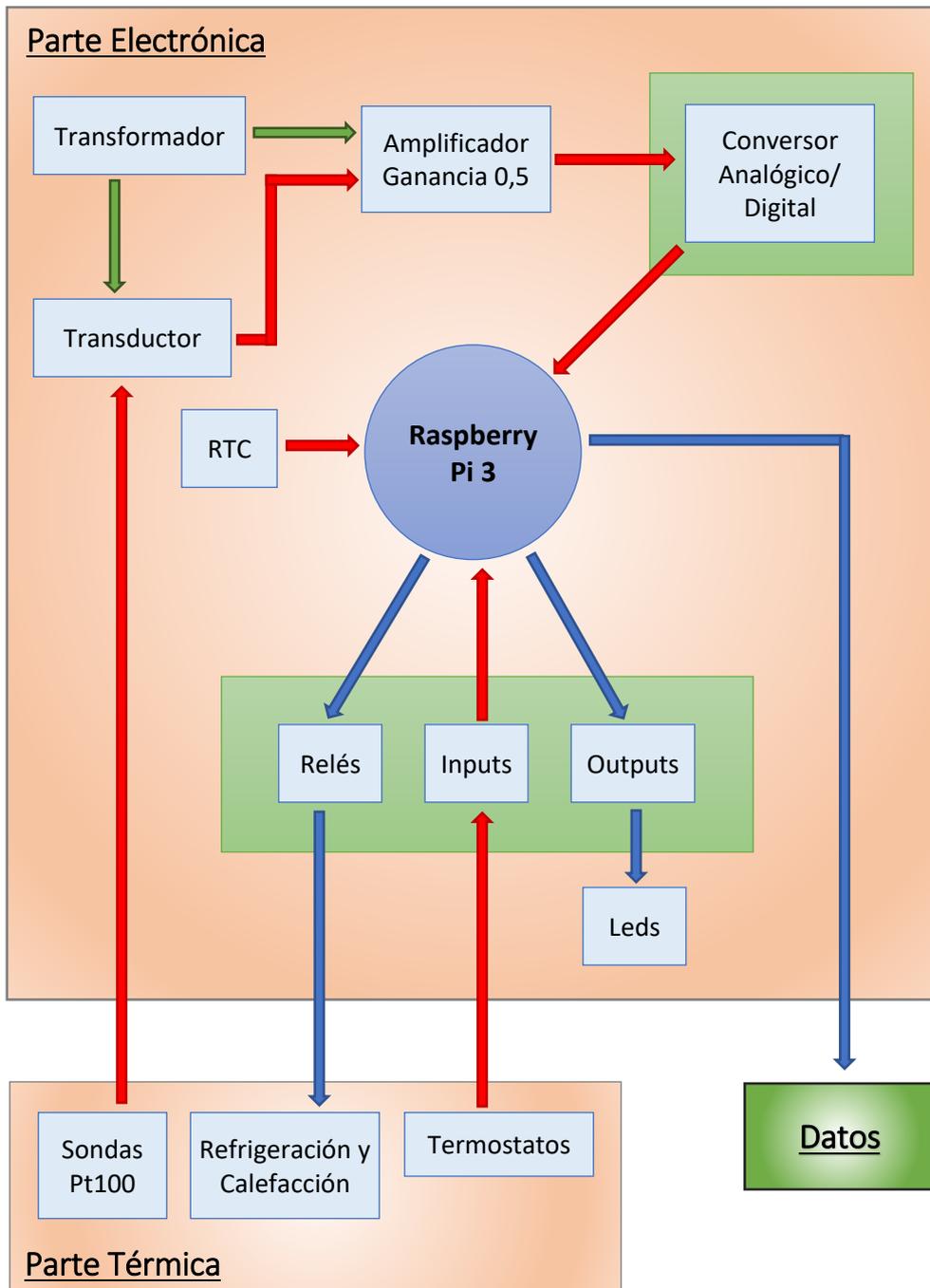


Figura 4.30. Esquema de funcionamiento de la Cámara Térmica. Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior del esquema se encuentra la fase de medida de la temperatura en el interior de la cámara. El transformador alimenta tanto al transductor (12 VDC) como al amplificador operacional (± 12 VDC). El transductor se encarga de medir la resistencia que presentan las sondas dependiendo de la temperatura y lo transforma a valores de tensión entre 0 y 10 V en sus salidas. Como el convertor Analógico/Digital solo puede leer valores de tensión entre 0 y 5 V, se ha visto necesaria la incorporación del amplificador operacional de 4 canales, para conseguir dividir a la mitad la tensión de salida del transductor. Cada uno de sus canales funciona como un amplificador inversor, dos de ellos de ganancia $-0,5$ y los otros dos de ganancia -1 , que aplicados en serie dos a dos, se obtienen valores de tensión divididos entre dos a su salida. Los valores digitales obtenidos por el convertor, son enviados a la Raspberry Pi.

En la parte inferior del esquema, se encuentran los elementos que gestionan la calefacción y refrigeración de la cámara. El termostato evaluado en cada caso es el que mide la temperatura del interior de la cámara y, en función de lo que mida y la temperatura de consigna establecida, cierra o abre su relé interior provocando una variación en la lectura de uno de los Input (0-1). Esta variación queda registrada en la Raspberry Pi que, dependiendo de su valor, enciende el sistema de refrigeración o el de calefacción por medio de los dos relés que posee el sistema diseñado.

Paralelamente a la acción anterior, la Raspberry Pi se encarga de encender y apagar los indicadores Led de la ventana, así como de mostrar los valores de la temperatura del interior de la cámara a través de la pantalla LCD.

Por otro lado, el resto de termostatos pueden también funcionar para ser comparados entre ellos, con la única diferencia de que no indican a la Raspberry Pi lo que hacer con los sistemas térmicos. Al mismo tiempo, la Raspberry Pi registra las variaciones de sus relés, genera los datos y gestiona los indicadores led correspondientes a cada termostato.

Una vez que ya se conoce el funcionamiento que posee la cámara térmica, se comienza a explicar de forma general el software desarrollado para conseguirlo, está compuesto de dos scripts principales, cámara.py y lcd.py.

El funcionamiento del primero de los scripts, cámara.py, se observa en forma de diagrama con las fases del procesado de los datos en la figura 4.31. Este script genera un bucle en el que, por un lado y de manera resumida, obtiene los datos de voltaje pertenecientes a las sondas Pt100 a través del conversor analógico/digital y por medio de varias operaciones (comentadas anteriormente), los transforma en valores de temperatura, todos estos datos los escribe en un archivo de texto generado al inicio del script.

Por otro lado, este script se encarga de encender y apagar el sistema de calefacción y el de refrigeración dependiendo de lo que indique el termostato principal, también se encarga de encender y apagar los LEDs que indican el estado de los termostatos, situados en la ventana de la caja de fusibles, además, estas variaciones de encendidos y apagados, son recogidas en el archivo de datos generado al inicio.

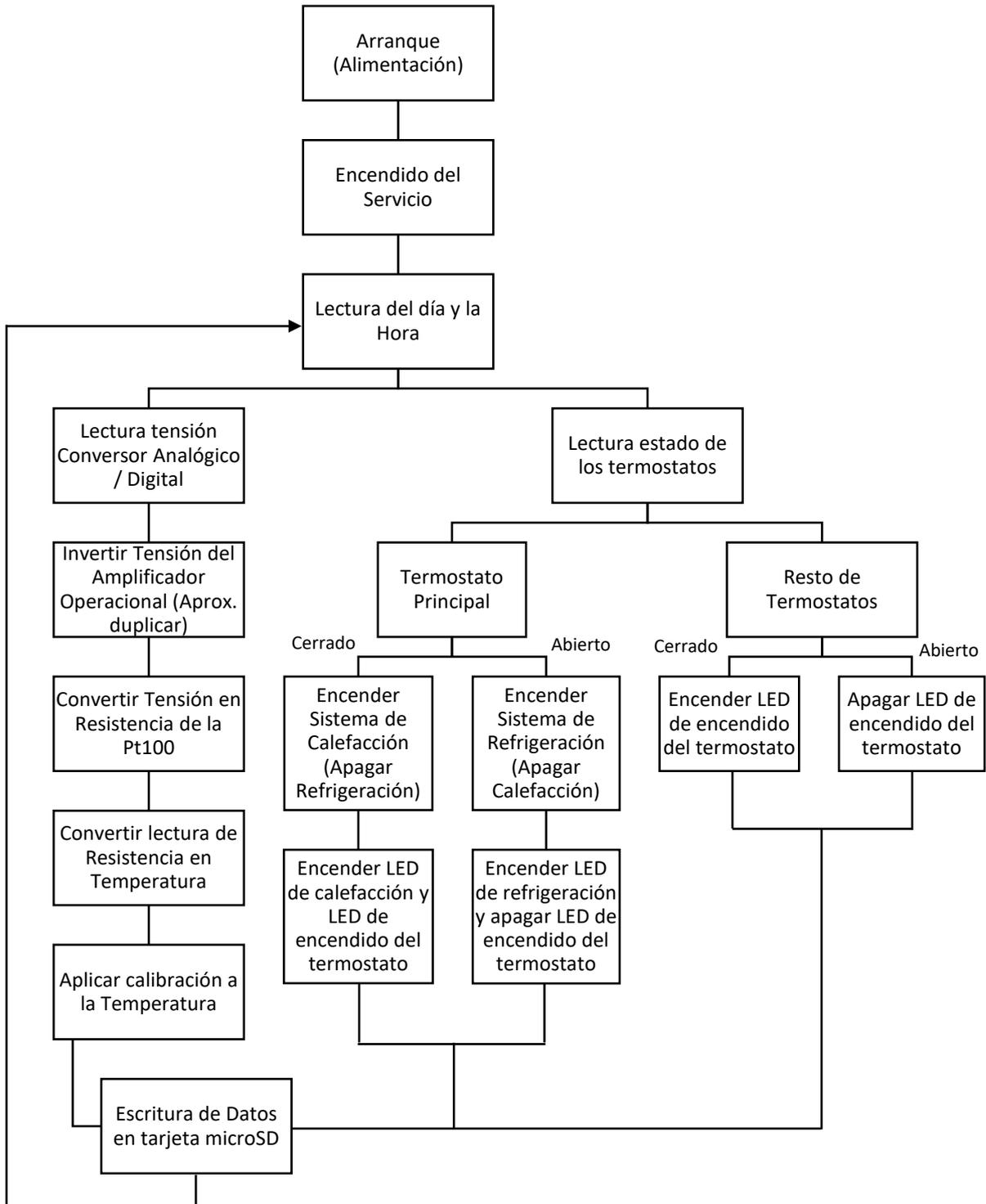


Figura 4.31. Diagrama de bloques que representa el funcionamiento del script del sistema cámara.py.
Fuente: Elaboración propia.

El segundo script, lcd.py, se encarga de presentar por medio del display LCD los datos en tiempo real más importantes del sistema, como son el estado de la cámara térmica, las temperaturas de las sondas superior e inferior y el estado de la Raspberry Pi.

El display LCD posee 5 botones en su parte inferior, mediante la pulsación de cada uno de ellos se obtiene una opción diferente:

- Botón 1: Estado de la cámara térmica.
- Botón 2: Temperatura de la sonda superior.
- Botón 3: Temperatura de la sonda inferior.
- Botón 4: Muestra las temperaturas de las dos sondas.
- Botón 5: Estado de la Raspberry Pi. Al presionar este botón se ejecuta un script secundario, que muestra a través del display LCD la IP de la Raspberry Pi, su temperatura y su memoria libre en ese instante.

El funcionamiento del script lcd.py se observa en forma de diagrama de bloques en la figura 4.32. Este script genera un bucle en el que permanece a la espera hasta que se pulsa uno de los botones de la pantalla, una vez pulsado, muestra la opción elegida, y vuelve a permanecer a la espera de la siguiente pulsación.

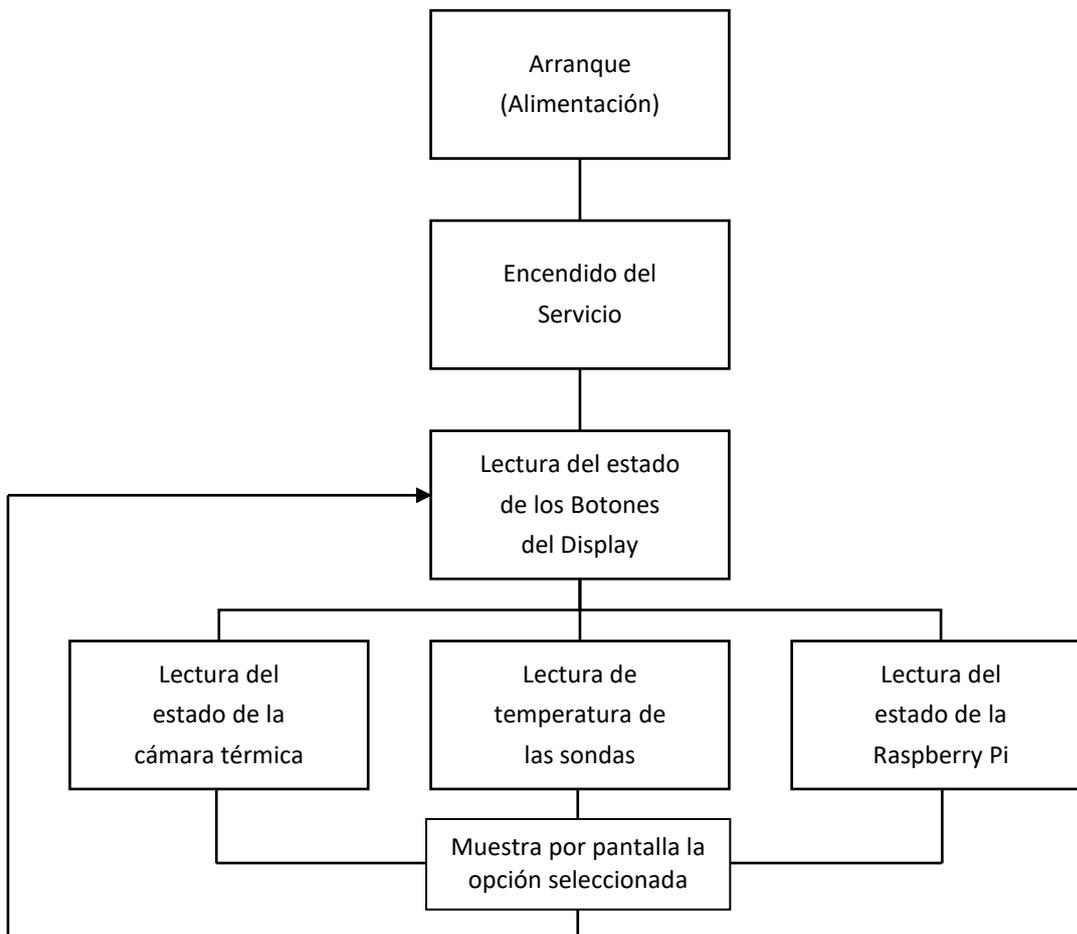


Figura 4.32. Diagrama de bloques que representa el funcionamiento del script del sistema lcd.py. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Calibración del Banco de Pruebas

Una vez realizado el montaje y el desarrollo del software, se realizó una prueba del funcionamiento del prototipo, y se observó que las temperaturas obtenidas por las Pt100, incluso a temperatura ambiente, eran muy diferentes, cuando tendrían que ser muy similares. En la figura 4.33 se puede observar la primera gráfica generada, en la que la diferencia de temperatura medida entre las dos sondas llega a ser de 1 °C.

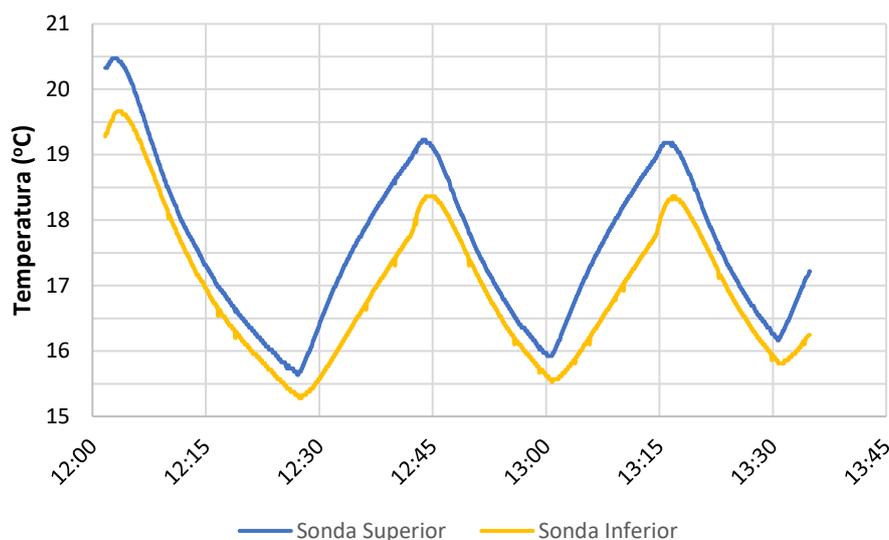


Figura 4.33. Gráfico creado a partir de la primera toma de datos del prototipo. Fuente: Elaboración propia.

Por este motivo, se realizó la calibración del banco de pruebas con cuatro puntos, tres de ellos se obtuvieron mediante un simulador de resistencias de platino perteneciente y calibrado por el Centro de Metrología Español (C.E.M.), y el último punto se obtuvo a partir de un pequeño experimento con hielo y agua, para obtener 0 °C.

Como se puede ver en la figura 4.34, el simulador Pt100 posee tres valores de resistencia, 107,02Ω, 107,79Ω y 108,57Ω, que se corresponden con 18, 20 y 22 °C. Estas resistencias se conectan una a una en los dos canales que se van a utilizar del transductor, y se obtiene la temperatura, para posteriormente compararla con la equivalente a la resistencia.



Figura 4.34. Simulador de resistencias de platino calibrado por el Centro Español de Metrología. Fuente: Elaboración propia.

El último punto para calibrar el prototipo, se obtuvo del punto de fusión del agua. Se colocó dentro de la nevera, funcionando el sistema de refrigeración, un recipiente con hielo y en su interior las dos sondas de temperatura.

Una vez obtenidos los cuatro puntos de calibración de los dos canales de temperatura, se realizó la siguiente gráfica (Figura 4.35), en la que se observan las diferencias de valores entre los puntos azules (Ideal) y los puntos naranjas (Sonda superior) y grises (Sonda inferior). A partir de éstos, se obtuvieron las líneas de tendencia y su correspondiente ecuación, que servirán para obtener la temperatura calibrada y lo más real posible.

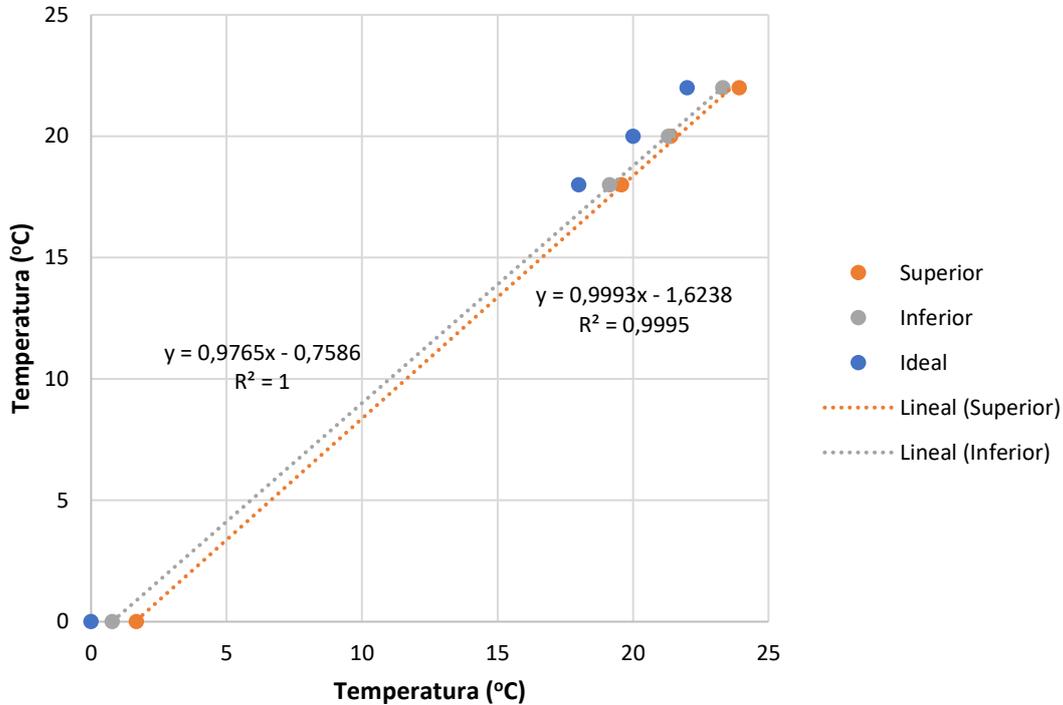


Figura 4.35. Gráfica de calibración por 4 puntos. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la implementación del hardware, el software y la calibración final, se realizó un ensayo para obtener las velocidades de refrigeración y calentamiento que posee la cámara de ensayos térmicos, en la figura 4.36 se pueden observar estas curvas.

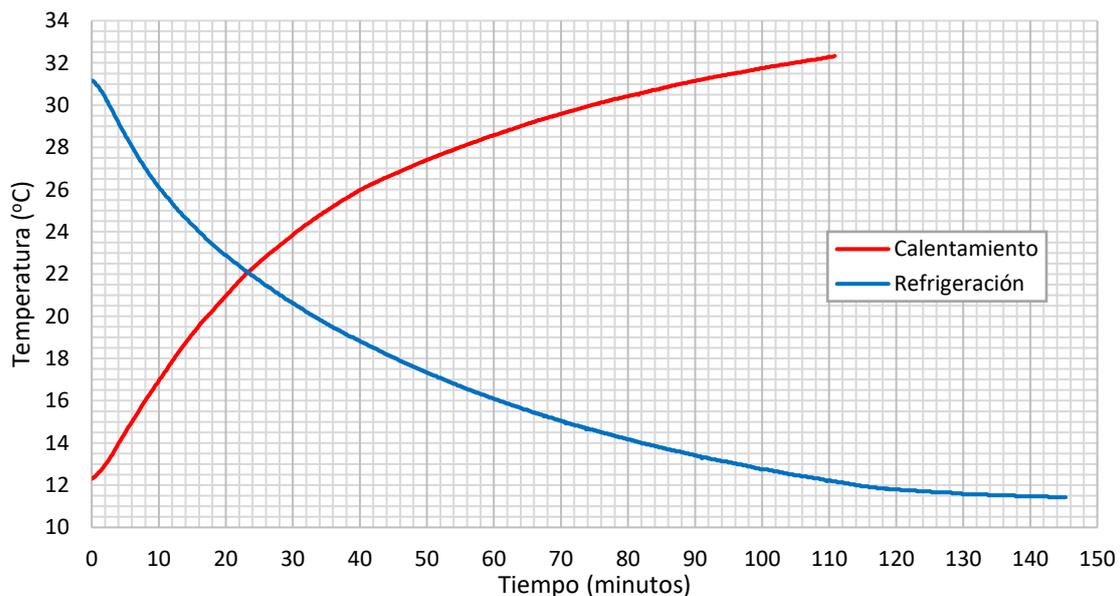


Figura 4.36. Gráfica de las velocidades de refrigeración y calentamiento de la cámara de ensayos térmicos. Fuente: Elaboración propia.

4.3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO (ENSAYOS)

4.3.1. Ensayo de funcionamiento de los termostatos para mantener la temperatura de consigna

En este ensayo de los termostatos, se va a estudiar el comportamiento que presentan cada uno de ellos a la hora de permanecer en una temperatura constante durante un determinado tiempo, este ensayo simula, por ejemplo, los 19 °C que se desea tener en una vivienda al levantarse por la mañana.

Las temperaturas de consigna utilizadas son las recomendadas por los fabricantes de los termostatos para cada periodo del día:

- Cómodo: 19 °C. Periodo del día en el que hay personas en la vivienda.
- Noche: 17 °C. Periodo durante la noche.
- Eco: 16 °C. Periodo durante el día, en el que la vivienda está vacía.

Con este ensayo se pretende conseguir entender el funcionamiento y el comportamiento que tiene cada termostato para permanecer en cada una de las temperaturas de consigna, además, a partir de las temperaturas que proporcionen las sondas Pt100 se obtendrá la precisión con la que los termostatos miden la temperatura y cuanto se desvían de la temperatura real.

En el caso del termostato Netatmo, se puede elegir entre dos algoritmos de funcionamiento, el primero de ellos, el **Algoritmo de Histéresis** es el que está activo durante las primeras semanas de funcionamiento, con él, cuando la diferencia entre la temperatura de la habitación y la establecida es inferior al umbral de sensibilidad, el termostato considera que se ha alcanzado la temperatura establecida y apaga la calefacción. El segundo, es el **Algoritmo Avanzado o PID (Proporcional-Integral-Derivativo)**, este algoritmo puede entrar a funcionar cuando el termostato ha estado encendido el tiempo suficiente, en el cual, ha podido memorizar las características de la vivienda, tales como la inercia térmica o el aislamiento térmico.

4.3.2. Ensayo de funcionamiento de los termostatos durante un día completo

En este ensayo se va a estudiar el comportamiento que tienen los termostatos a lo largo de un día completo, la cámara térmica irá siguiendo la temperatura de consigna establecida en cada uno de los termostatos, apagándose y encendiéndose a medida que los mismos se lo indiquen.

Con este ensayo se van a evaluar las temperaturas máximas y mínimas que se producen a lo largo del día, durante los distintos periodos de temperatura, y así poder realizar una evaluación de confort.

Por otro lado, se va a medir el tiempo de encendido de la calefacción durante los ensayos de cada uno de los termostatos, para después realizar una comparativa para saber cuál de ellos mantuvo encendido el sistema de calefacción más tiempo, cuál el que menos y por qué.

Las temperaturas de consigna utilizadas son las mismas que en el ensayo anterior, y los periodos de tiempo que se han establecido a lo largo del día, se pueden observar en la figura 4.37.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

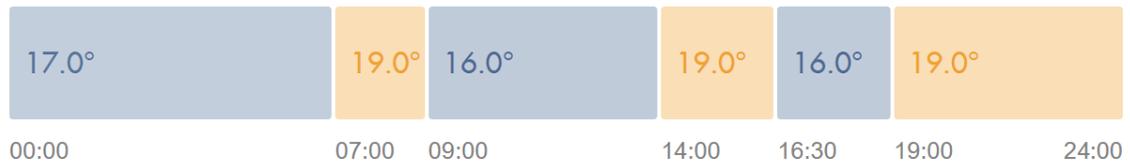


Figura 4.37. Programación diaria de temperatura utilizada en el ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Los datos que se obtienen de este ensayo, son los proporcionados por el sistema creado a partir de la Raspberry Pi, y por uno de los termostatos que permite la descarga de los datos guardados de temperatura, este termostato es Netatmo, el resto de termostatos no posee la opción de descarga de datos. Con la ayuda de las figuras que se obtengan del ensayo anterior, se podrá entender o intuir lo que está midiendo el termostato en las gráficas que se consigan a través de este otro ensayo.

Una vez que se tengan los datos y las gráficas realizadas, se procederá al estudio de tiempos de encendido del sistema de calefacción y se realizará una comparativa entre temperaturas máximas y mínimas.

4.4. TOMA DE DATOS

El archivo de datos que se genera en el sistema creado, recoge todos los datos que se obtienen y se utilizan en el script cámara.py, descrito anteriormente. En cada iteración por el bucle, se guardan en el archivo los datos del día y la hora, a continuación, se guardan todos los datos pertenecientes a la obtención de la temperatura de las sondas (desde las tensiones, resistencias y temperaturas con y sin calibración), y, por último, se añaden los estados de los relés internos de los termostatos (abierto-0/cerrado-1) y el estado de los sistemas de calefacción y refrigeración (encendido-1/apagado-0).

La tabla 4.5 corresponde a un ejemplo del archivo creado con los datos que se obtienen del sistema. Los más interesantes son el día y la hora, las temperaturas de las sondas Pt100, el estado de los termostatos (abierto-0 o cerrado-1) y el modo de funcionamiento de la cámara (refrigeración o calefacción).

Tabla 4.5. Archivo Excel generado a partir de los datos obtenidos de la Cámara Térmica. Fuente: Elaboración propia.

Hora	VoltajeADC1	VoltajeADC2	VoltajeREAL1	VoltajeREAL2	R1	R2	TaSinCalibrar SondaSUP	TaSinCalibrar SondaINF	TaSondaSUP	TaSondaINF	T1	T2	T3	T4	Heat	Cold
10:35:48	1,772	1,670	3,462	3,288	109,592	108,915	24,632	22,889	22,991	21,592	0	0	0	0	0	1
10:35:53	1,769	1,670	3,457	3,288	109,574	108,915	24,585	22,889	22,944	21,592	0	0	0	0	0	1
10:35:58	1,769	1,670	3,457	3,288	109,574	108,915	24,585	22,889	22,944	21,592	0	0	0	0	0	1
10:36:04	1,769	1,670	3,457	3,288	109,574	108,915	24,585	22,889	22,944	21,592	0	0	0	0	0	1
10:36:09	1,769	1,673	3,457	3,292	109,574	108,934	24,585	22,937	22,944	21,639	0	0	0	0	0	1
10:36:14	1,769	1,673	3,457	3,292	109,574	108,934	24,585	22,937	22,944	21,639	0	0	0	0	0	1
10:36:19	1,769	1,673	3,457	3,292	109,574	108,934	24,585	22,937	22,944	21,639	0	0	0	0	0	1
10:36:24	1,769	1,673	3,457	3,292	109,574	108,934	24,585	22,937	22,944	21,639	0	0	0	0	0	1
10:36:29	1,767	1,673	3,452	3,292	109,555	108,934	24,537	22,937	22,896	21,639	0	0	0	0	0	1
10:36:35	1,767	1,673	3,452	3,292	109,555	108,934	24,537	22,937	22,896	21,639	0	0	0	0	0	1
10:36:40	1,767	1,675	3,452	3,297	109,555	108,953	24,537	22,985	22,896	21,686	0	0	0	0	0	1
10:36:45	1,764	1,675	3,447	3,297	109,537	108,953	24,489	22,985	22,848	21,686	0	0	0	0	0	1

La obtención de los datos de temperatura que muestran los termostatos se va a tomar de dos formas diferentes dependiendo de las características que posee cada uno de ellos. El termostato Netatmo, permite la descarga de estos datos a través de su web, basta con indicar el periodo de tiempo de los datos que se quieren obtener, y se elige la extensión del archivo que contendrá los datos, puede ser en formato xls o csv. El resto de termostatos no posee esta posibilidad, por lo que la toma de datos debe ser manual, observando la variación de la temperatura, tanto en la pantalla de los mismos, como en su web o en la aplicación para Smartphone.

A partir de los datos de la tabla 4.5, obtenidos por la cámara térmica, y los datos de temperatura de los termostatos, se generan las gráficas de temperatura y estado de los termostatos frente a tiempo, en la figura 4.38 se observa un ejemplo de éstas gráficas.

Con estas gráficas, a medida que los termostatos vayan aprendiendo las características de la vivienda (en este caso la cámara de ensayos térmicos) y mejorando sus algoritmos, se podrá realizar la evaluación de sus funcionalidades y comportamientos.

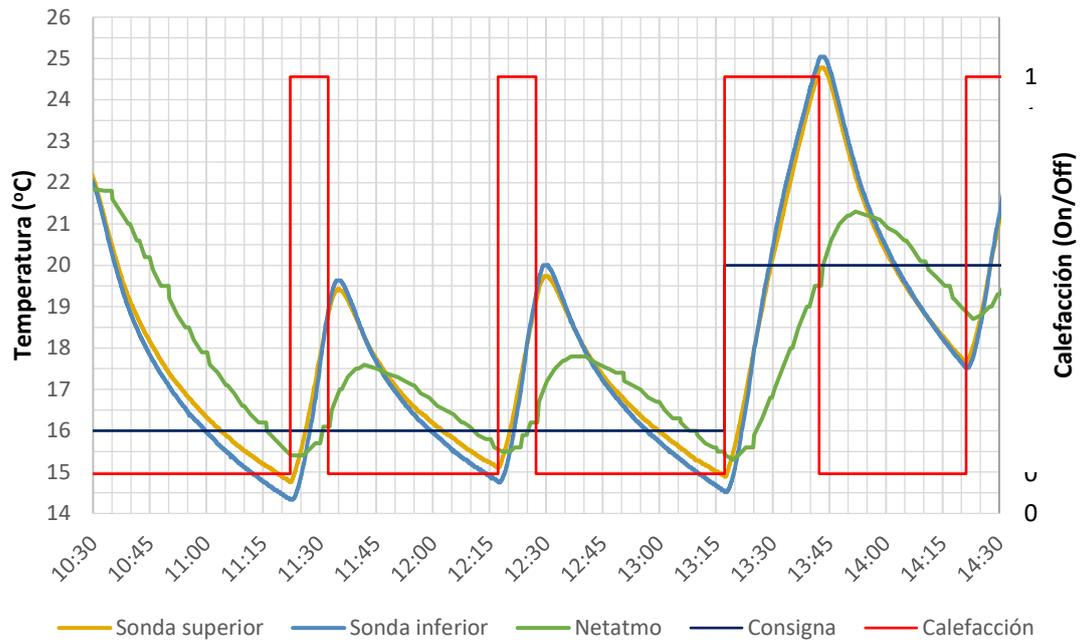


Figura 4.38. Gráfico creado a partir de los datos obtenidos de la Cámara Térmica y de los datos descargados del termostato Netatmo. Fuente: Elaboración propia.

5. RESULTADOS

5.1. COMPORTAMIENTO DE LOS TERMOSTATOS PARA MANTENER LA TEMPERATURA DE CONSIGNA

A continuación, se va a explicar el comportamiento que realiza cada termostato para mantener la temperatura de consigna establecida, el comportamiento que presentan es muy parecido en los tres casos de temperatura de consigna, por lo que se explicará el comportamiento en relación a uno de los tres casos, y se presentarán las figuras necesarias para poder comprenderlo.

5.1.1. Termostatos

5.1.1.1. *Netatmo*

5.1.1.1.1. *Netatmo: Algoritmo de Histéresis*

En la figura 5.1, se puede observar el comportamiento del termostato Netatmo utilizando el Algoritmo de Histéresis para mantener una temperatura de 19 °C y posteriormente 17 °C. A continuación, se describen las observaciones realizadas del primero de los casos que muestra la figura, el de 19 °C.

Se puede apreciar como Netatmo enciende el sistema de calefacción cuando su sensor le indica 0,2 °C por debajo de la temperatura de consigna, y lo apaga cuando se encuentra 0,2 °C por encima de la misma. Al apagar el sistema de calefacción, la temperatura sigue aumentando durante un pequeño espacio de tiempo, de esta manera, Netatmo mantiene la temperatura entre 18,8 y 19,8 °C, según su sensor de temperatura.

Al mirar las temperaturas que se obtienen de las Pt100 instaladas en el interior de la cámara, se puede observar que la temperatura que está midiendo el termostato se aleja bastante de la real. Cuando se encuentra por encima de la temperatura de consigna la diferencia entre la temperatura real y la que mide Netatmo, varía entre 0,9 y 1,9 °C, cuando se encuentra por debajo de la de consigna, esta variación esta entre 1,1 y 1,3 °C. Estas variaciones hacen que la temperatura real de la vivienda oscile entre 17,6 y 21,8 °C, lo que se aleja bastante de la temperatura de 19 °C deseada.

De la misma forma ocurre en el caso de fijar la temperatura de consigna en 17 °C, como se puede apreciar en la parte derecha de la figura 5.1, Netatmo se comporta de la misma manera que en el caso de 19 °C, y las sondas Pt100 siguen midiendo por encima y por debajo de la temperatura que muestra Netatmo, pero ésta vez, disminuyendo un poco la diferencia entre temperaturas, entre 0,6 y 1,5 °C por encima y 1,3 °C por debajo.

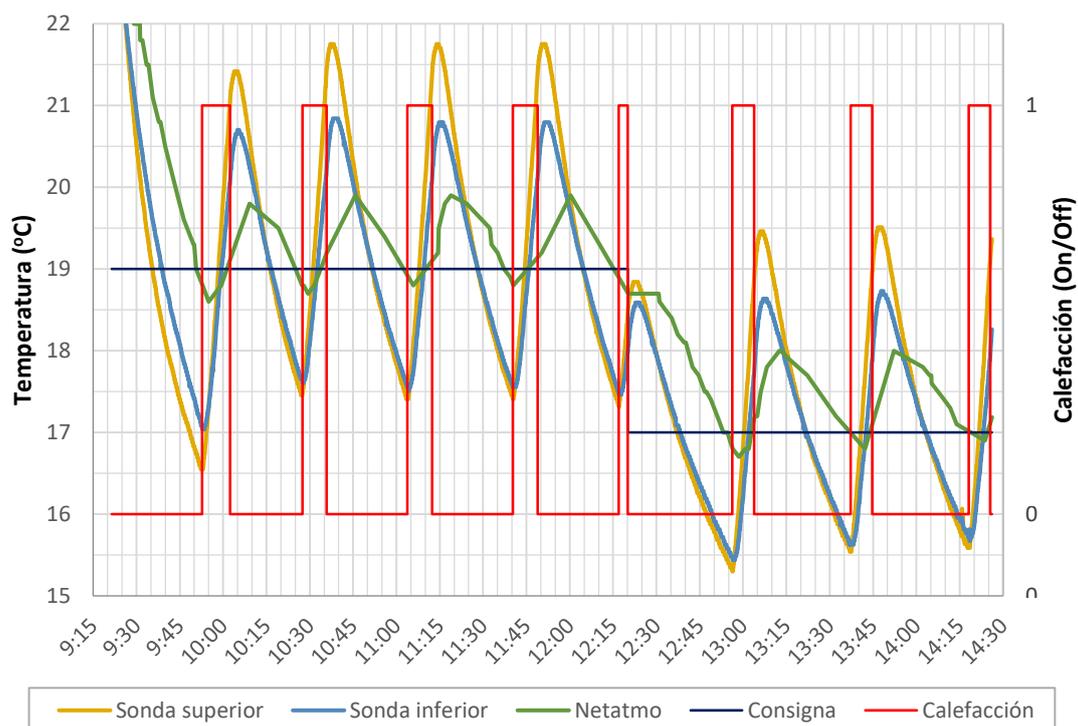


Figura 5.1. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 19°C y 17°C con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.2 se puede observar como el termostato Netatmo funciona de la misma manera que los dos casos anteriores, aun cambiando la temperatura de consigna a 16°C, la temperatura real proporcionada por las sondas, se aleja mucho de la temperatura establecida.

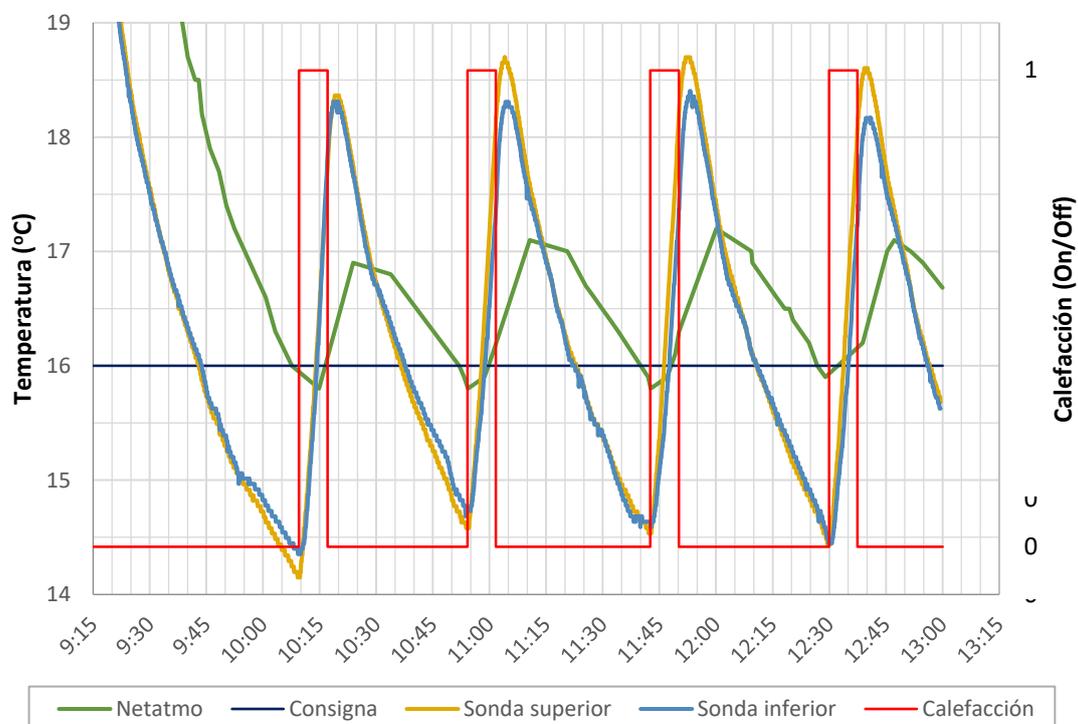


Figura 5.2. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 16°C con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.1.2. Netatmo: Algoritmo Avanzado o PID

Al activar el Algoritmo Avanzado en Netatmo con una temperatura de consigna de 19 °C, se obtiene la figura 5.3, completamente distinta a las anteriores.

La temperatura obtenida por Netatmo en este caso, oscila entre 18,2 y 19,6 °C, no se puede establecer con claridad a que lectura de temperatura enciende o apaga el sistema de calefacción, ya que en cada caso toma un valor diferente.

En cuanto a la temperatura real medida por las sondas Pt100, nos encontramos frente a que ésta llega a descender hasta los 16,5 °C al inicio de mantener la temperatura de consigna, con el paso de tiempo, se mantiene el descenso en 17,3 °C (1,7 °C por debajo). Por encima de la temperatura de consigna se observa que la temperatura real se va ajustando cada vez más, pero sin llevar ningún orden y llegando a sobrepasar en 2,4 °C.

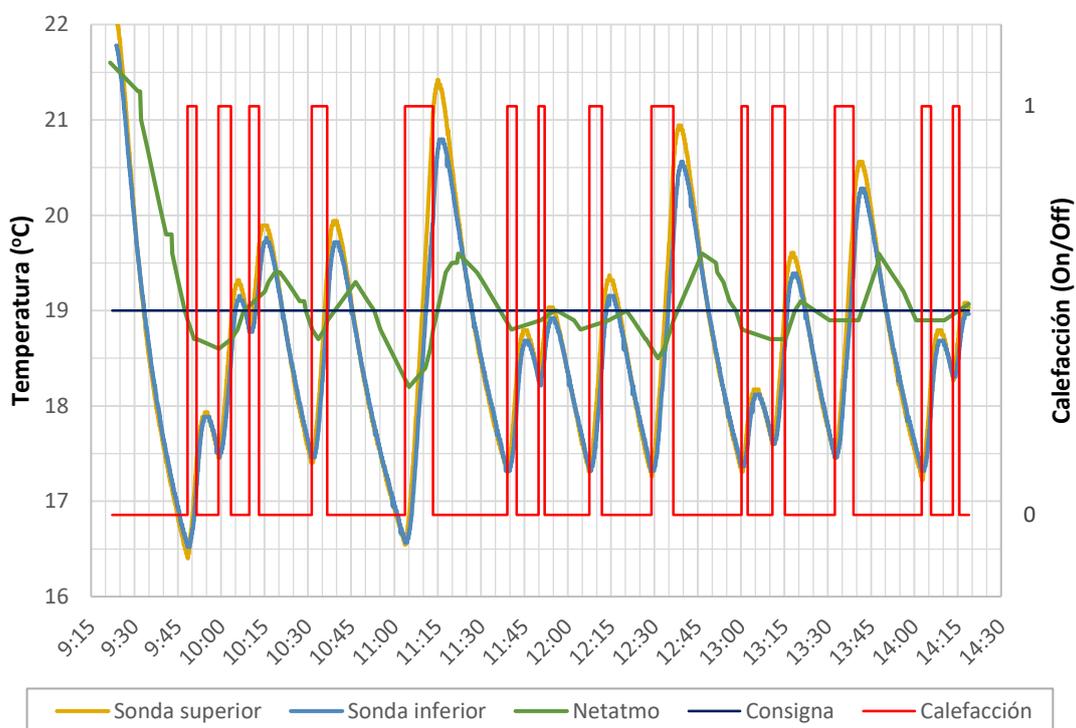


Figura 5.3. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.

Al variar la temperatura de consigna a 17 °C (figura 5.4) y posteriormente a 16 °C (figura 5.5), ocurre lo mismo que en la figura 5.3, el termostato Netatmo enciende y apaga el sistema de calefacción sin llevar ningún orden, obteniendo unas temperaturas reales muy alejadas de las de consigna, 2,1 °C por encima y 1,8 °C por debajo en el primer caso, y 3 °C por encima y 1,8 °C por debajo en el segundo caso.

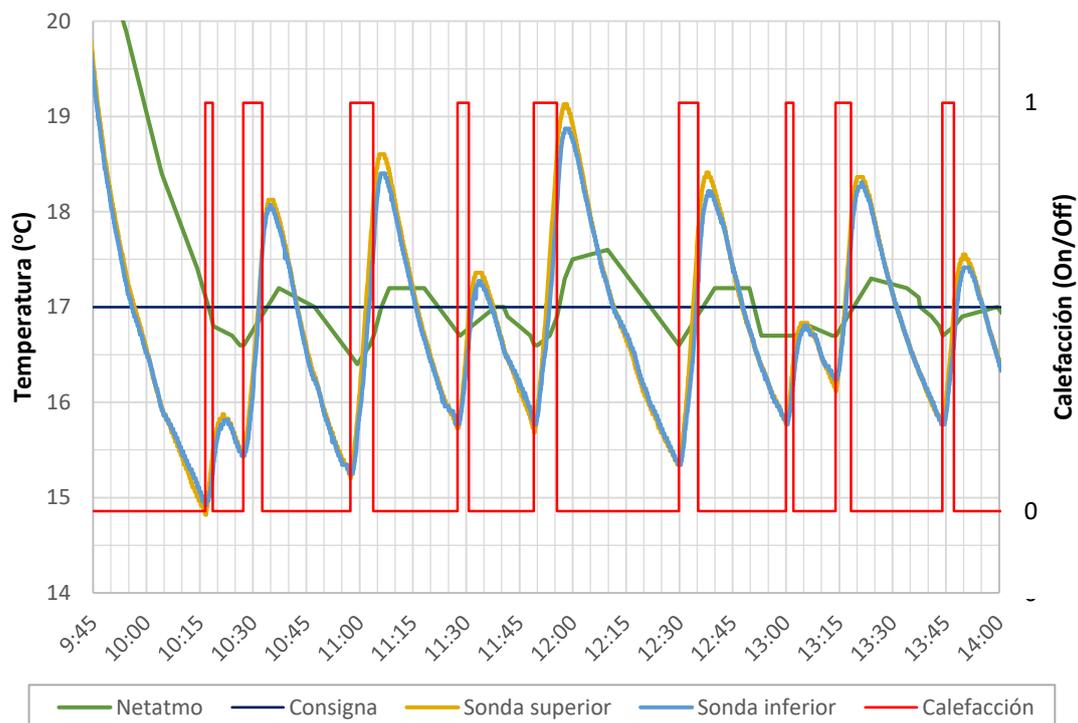


Figura 5.4. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.

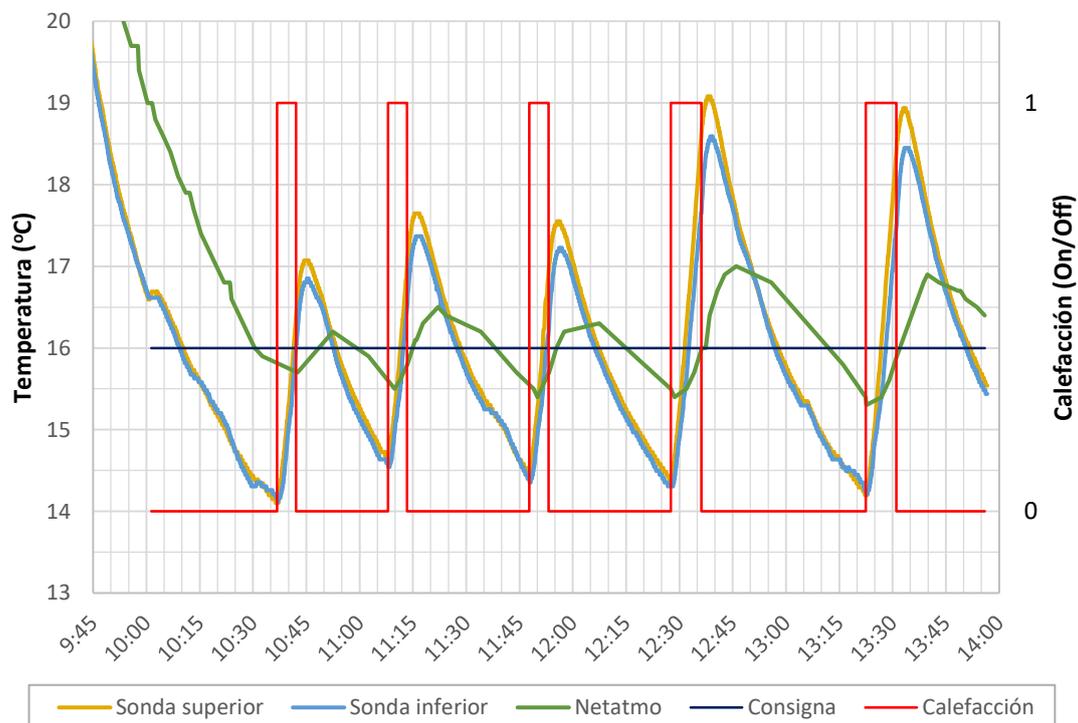


Figura 5.5. Termostato Netatmo manteniendo la temperatura de consigna a 16 °C con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2. Momit

El termostato Momit, manteniendo la temperatura de consigna en 19 °C (Figura 5.6), se comporta de una manera similar al termostato Netatmo, enciende el sistema de calefacción cuando su sensor le indica que está a 18,2 °C, y lo apaga cuando ha sobrepasado la temperatura de consigna en 1 °C aproximadamente, al estar tanto tiempo encendido, la temperatura del sensor aumenta hasta 21,4 °C, muy por encima de la de consigna.

Este aumento de temperatura a la hora de apagar el sistema de calefacción conlleva un tiempo de encendido mucho mayor, con respecto a Netatmo, con lo que la temperatura real proporcionada por las Pt100 aumenta considerablemente, hasta llegar a los 25,3 °C cuando se encuentra por encima de la temperatura de consigna, con lo que se obtiene una diferencia de casi 4 °C entre la temperatura real y la del sensor del termostato.

Cuando se encuentra por debajo, la temperatura real disminuye hasta los 17,4 °C, muy similar a la temperatura registrada en el ensayo de Netatmo.

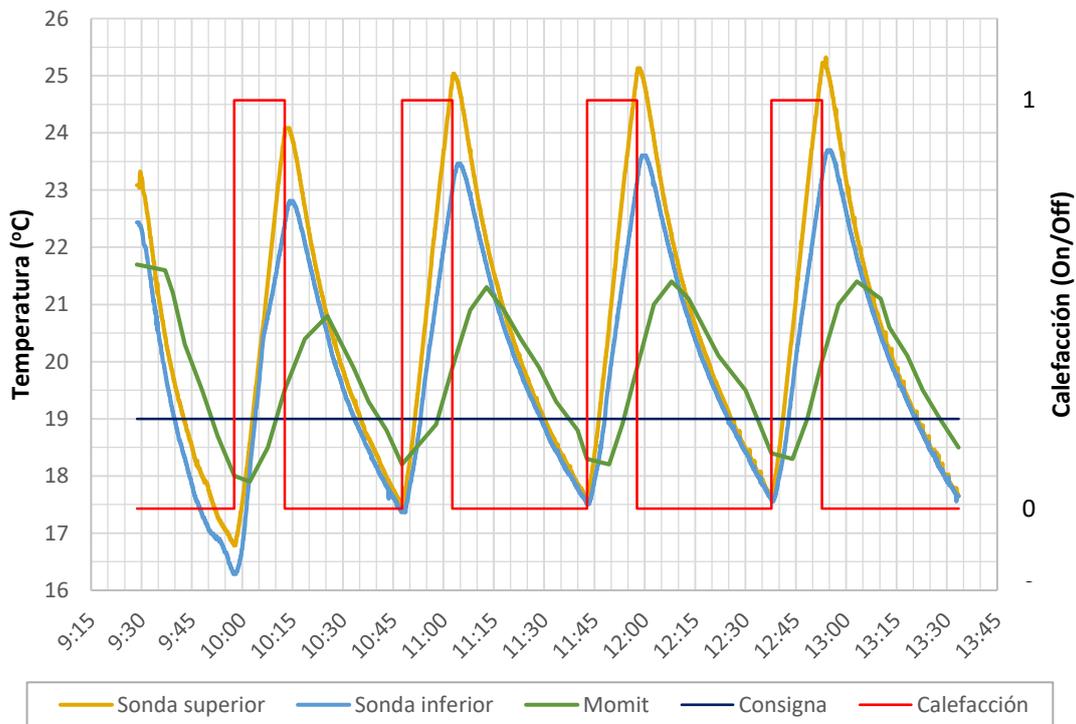


Figura 5.6. Termostato Momit manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.7 vemos como el termostato Momit tiene el mismo comportamiento para mantener la temperatura de consigna en 17 °C, que al mantener la temperatura de consigna en 19 °C, mostrado en la figura 5.6.

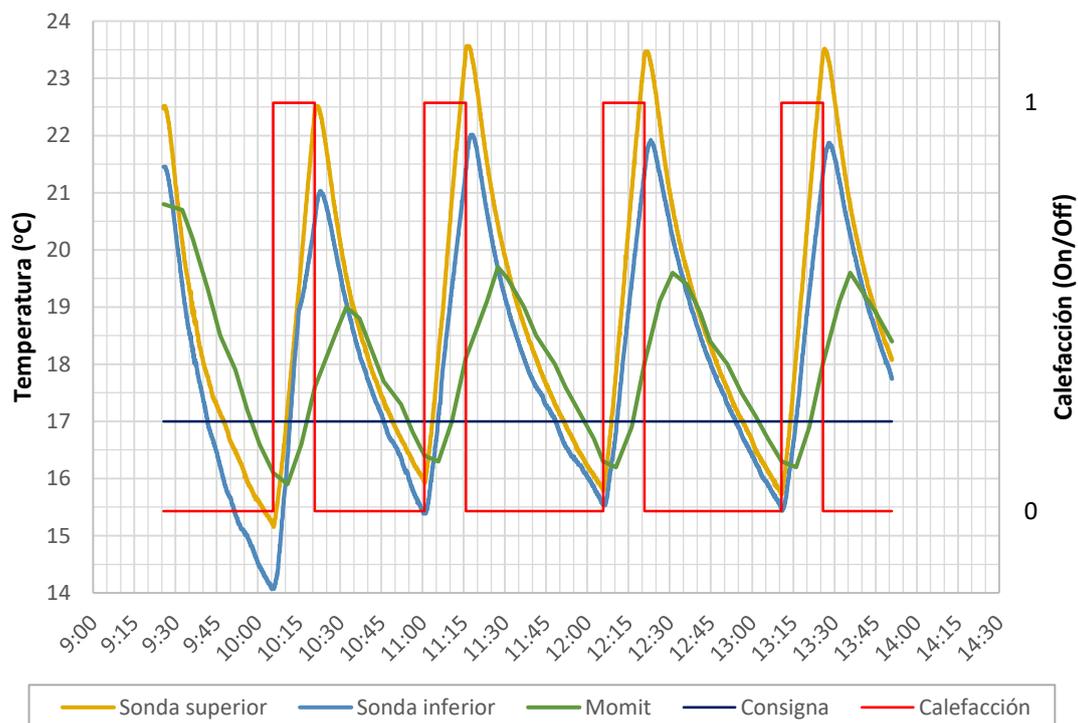


Figura 5.7. Termostato Momit manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.8 podemos observar el comportamiento del termostato Momit manteniendo la temperatura de consigna en 16 °C, comparado con las figuras anteriores, se puede ver como el termostato mantiene el sistema de calefacción menos tiempo encendido, una vez que se ha estabilizado la temperatura, pasa de 15 a 10 minutos, esto puede deberse a dos factores. El termostato entiende que la temperatura disminuye de manera más pausada que en los anteriores casos, o, puede deberse a que el termostato ha aprendido las características de la vivienda y sepa que no es necesario encender tanto tiempo el sistema de calefacción. En cualquiera de los casos, es aquí donde se puede observar la “inteligencia” que posee el termostato.

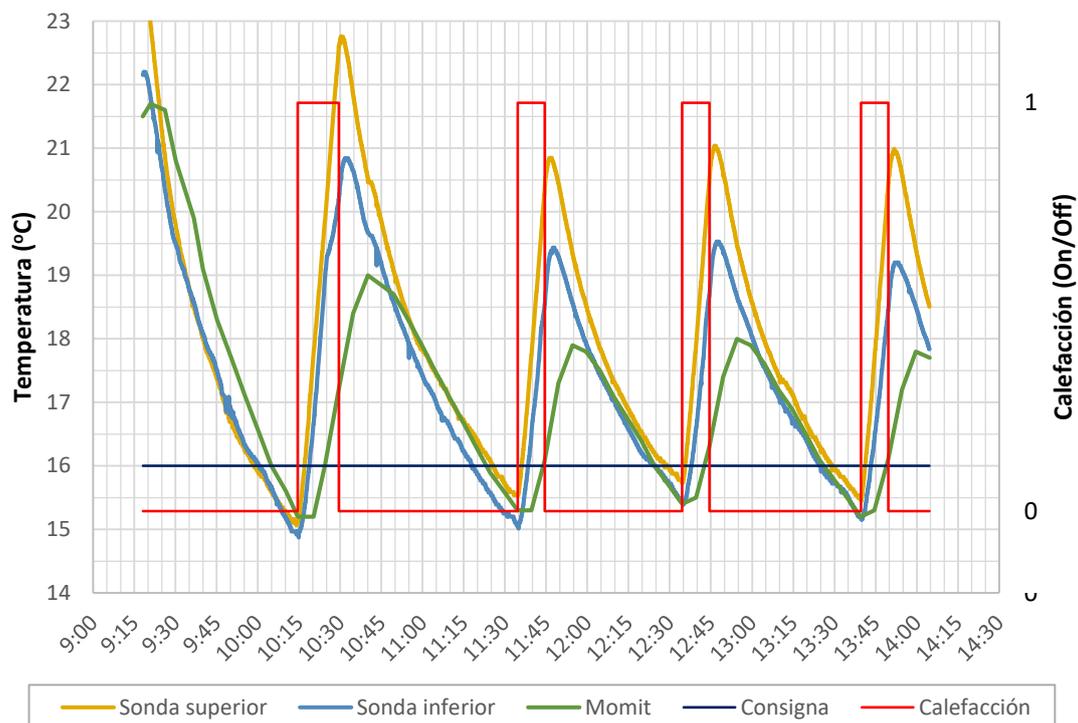


Figura 5.8. Termostato Momit manteniendo la temperatura de consigna a 16 °C. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.3. Tado°

El termostato tado° se comporta de manera muy diferente a los termostatos anteriores, cuando su sensor detecta que la temperatura de la vivienda (en este caso la cámara térmica) está disminuyendo, acercándose a la temperatura de consigna establecida, enciende el sistema de calefacción durante un periodo de tiempo, para que la temperatura permanezca siempre por encima de la de consigna.

En la figura 5.9, el termostato intenta mantener la temperatura de la cámara a 19 °C, se puede observar como el termostato enciende el sistema de calefacción cuando se alcanza una temperatura de 19,3 °C, consiguiendo establecer un rango de temperatura muy próximo a la de consigna, entre 0,3 y 1,5°C por encima.

Teniendo en cuenta las temperaturas reales que nos proporcionan las Pt100, nos encontramos con que, una vez que se ha estabilizado la temperatura por medio del sistema de encendido-apagado de la calefacción, la temperatura real supera la temperatura de consigna en 1,1 °C por encima, y 0,2 °C por debajo.

La diferencia entre la temperatura real y la medida por el sensor del termostato, es de 0,3 °C por encima y 0,4 °C por debajo.

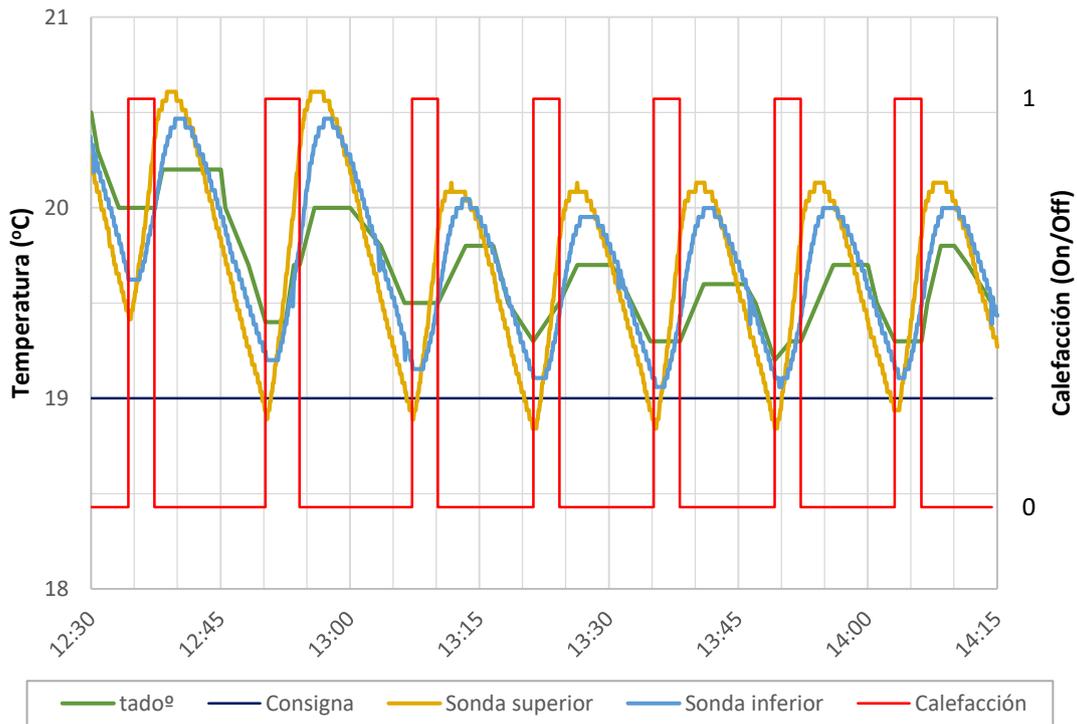


Figura 5.9. Termostato tado° manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.10 podemos observar como el termostato tado° mantiene la temperatura de consigna de 17 y 16 °C, su comportamiento es muy similar al de la figura 5.9, explicado anteriormente.

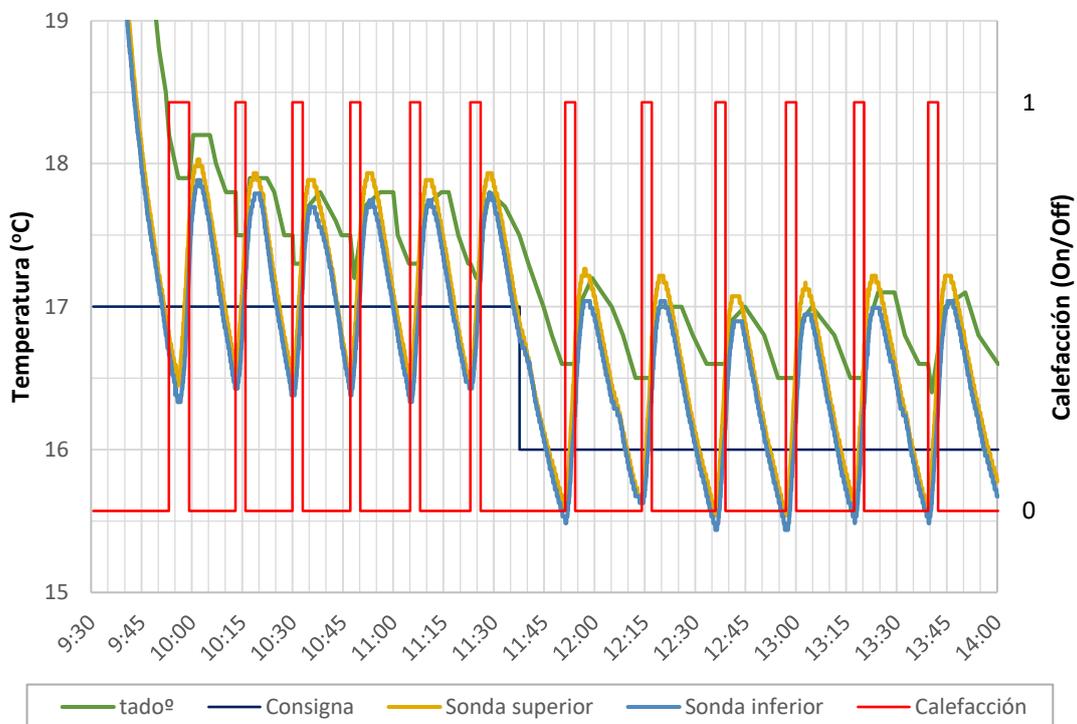


Figura 5.10. Termostato tado° manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C y 16 °C. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.4. Nest

El comportamiento que presenta el termostato Nest para mantener la temperatura de consigna es muy parecido al comportamiento del termostato Netatmo, explicado anteriormente.

Nest enciende el sistema de calefacción cuando su sensor le indica que la temperatura está medio grado por debajo de la de consigna, y lo apaga cuando se encuentra en la temperatura de consigna, de esta manera, el termostato consigue ajustar la variación de la temperatura medida en medio grado por encima y medio grado por debajo.

Comparando la temperatura de Nest con la de las sondas Pt100, se puede apreciar una variación de 0,7 °C por debajo y 0,7 °C por encima, lo que se transforma en 1,2 °C de diferencia, tanto por encima como por debajo, con respecto a la temperatura de consigna establecida en la figura 5.11.

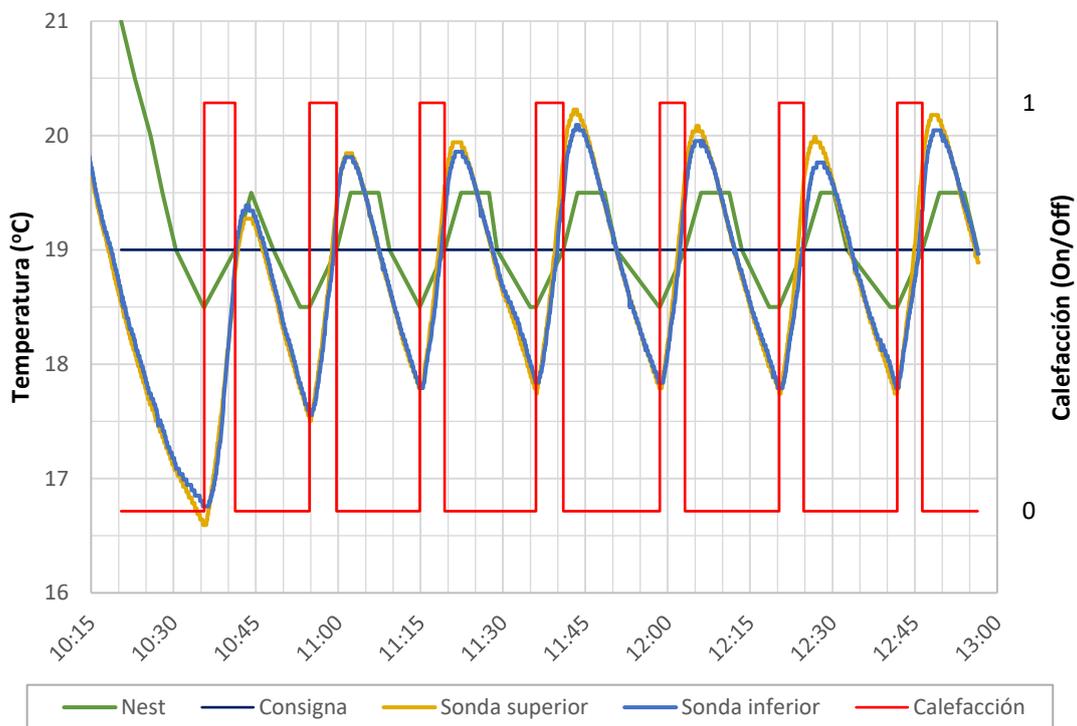


Figura 5.11. Termostato Nest manteniendo la temperatura de consigna a 19 °C. Fuente: Elaboración propia.

Cuando la consigna disminuye hasta los 17 °C como es el caso de la figura 5.12, el funcionamiento es el mismo que el de la figura 5.11, lo único que varía es la diferencia entre la temperatura de Nest con la de las sondas Pt100, aumenta a 0,9 °C por debajo y disminuye a 0,5 °C por encima, lo que se transforma en 1,4 °C de diferencia por debajo y 1 °C de diferencia por encima, con respecto a la temperatura de consigna.

Otra diferencia que se puede apreciar entra la figura 5.11 y la figura 5.12, se encuentra en el momento en el que se desactiva el sistema de calefacción. En la figura 5.11, se observa como la temperatura de Nest aumenta hasta el momento de apagar la calefacción, mientras que en la figura 5.12, la temperatura se mantiene igual en el momento de encenderla o apagarla, esto es debido a la precisión con la que Nest nos muestra la temperatura, lo que hace que, ante un pequeño aumento de temperatura, ésta no se vea reflejada en la gráfica de la figura 5.12 durante el periodo de encendido y apagado de la calefacción.

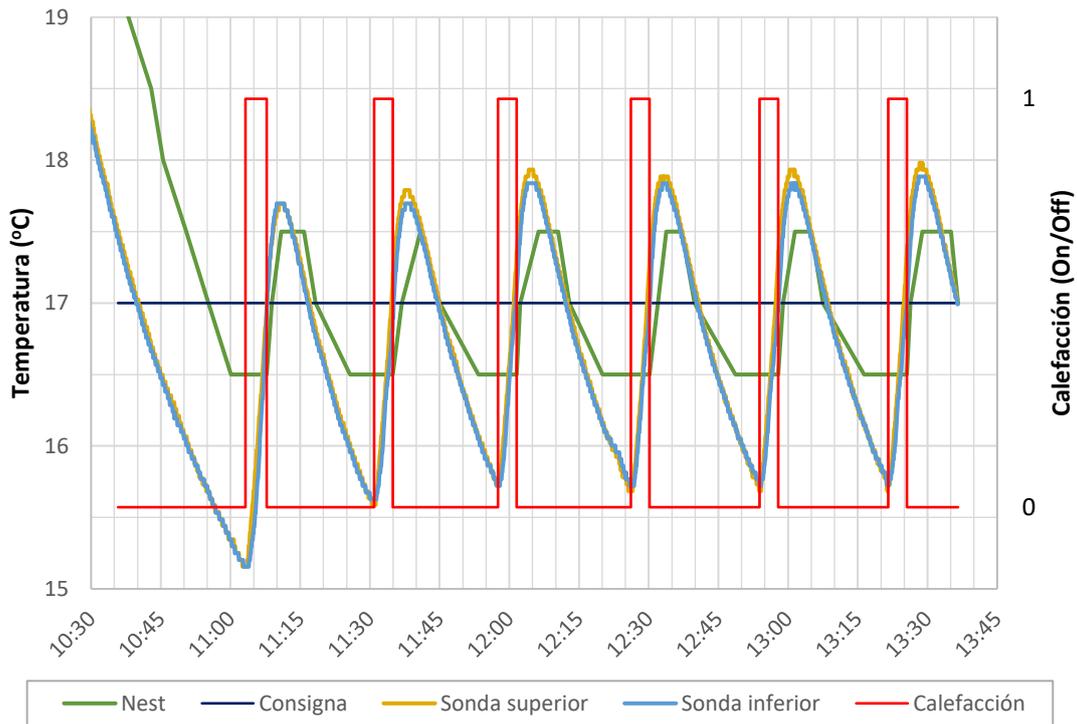


Figura 5.12. Termostato Nest manteniendo la temperatura de consigna a 17 °C. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.13 nos encontramos al termostato Nest manteniendo la temperatura de consigna en 16 °C, su comportamiento es exactamente igual al de la figura 5.12, manteniendo el mismo problema de precisión en el momento de apagar el sistema de calefacción.

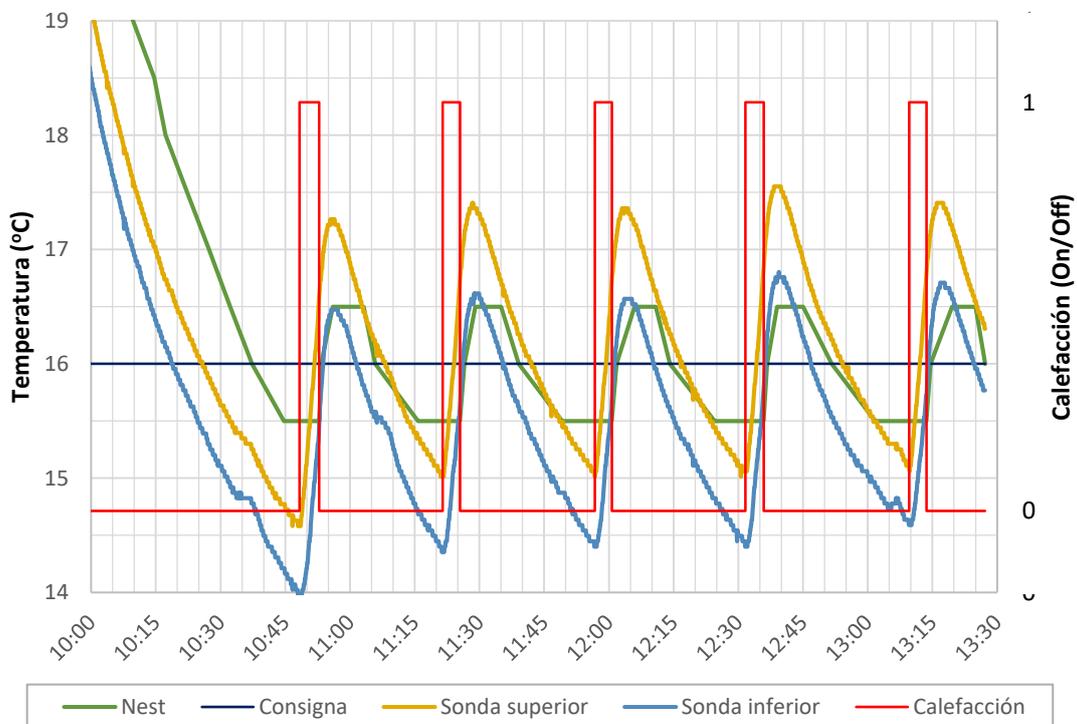


Figura 5.13. Termostato Nest manteniendo la temperatura de consigna a 16 °C. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Conclusiones

A continuación, se pueden observar los datos más importantes comentados en los apartados anteriores. Estos datos, recogidos en la tabla 5.1, se presentan a modo de comparativa entre los datos obtenidos en los ensayos a los termostatos.

En primer lugar, nos encontramos con las temperaturas máximas y mínimas que han detectado los sensores de cada uno de los termostatos al mantener las temperaturas de consigna, una vez que se han estabilizado. A continuación, se encuentran las temperaturas máximas y mínimas de las sondas Pt100 de cada caso ensayado, en las mismas condiciones que las anteriores.

En las cuatro últimas columnas se muestran, agrupadas dos a dos, la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas de los termostatos y las sondas, y la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas de las sondas y la temperatura de consigna establecida para cada caso.

Con estas diferencias, nos podemos hacer una idea de la diferencia de temperatura entre la que está midiendo cada termostato, y la que realmente existe, y la diferencia de temperatura que se llega a conseguir con respecto a la temperatura de consigna establecida.

Tabla 5.1. Resultados de los ensayos para mantener la temperatura de consigna. Fuente: Elaboración propia.

Termostato		T ^a ensayo (°C)	T ^a Termostato (°C)		T ^a Sondas Pt100 (Real) (°C)		ΔT ^a (Real-Termostato) (°C)		ΔT ^a (Real-Consigna) (°C)	
			Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Netatmo	Algoritmo de Histéresis	19	19,90	18,70	21,75	17,41	1,85	-1,29	2,75	-1,59
		17	18,00	16,80	19,51	15,54	1,51	-1,26	2,51	-1,46
		16	17,20	15,80	18,70	14,15	1,50	-1,65	2,70	-1,85
	Algoritmo Avanzado o PID	19	19,60	18,20	21,42	16,55	1,82	-1,65	2,42	-2,45
		17	17,60	16,40	19,13	15,20	1,53	-1,20	2,13	-1,80
		16	17,00	15,30	19,08	14,20	2,08	-1,10	3,08	-1,80
Momit		19	21,40	18,20	25,32	17,37	3,92	-0,83	6,32	-1,63
		17	19,70	16,20	23,56	15,39	3,86	-0,81	6,56	-1,61
		16	18,00	15,20	21,04	15,01	3,04	-0,19	5,04	-0,99
Tado°		19	19,80	19,20	20,13	18,84	0,33	-0,36	1,13	-0,16
		17	17,80	17,20	17,93	16,33	0,13	-0,87	0,93	-0,67
		16	17,10	16,40	17,22	15,44	0,12	-0,96	1,22	-0,56
Nest		19	19,50	18,50	20,23	17,74	0,73	-0,76	1,23	-1,26
		17	17,50	16,50	17,98	15,59	0,48	-0,91	0,98	-1,41
		16	16,50	15,50	17,55	14,35	1,05	-1,15	1,55	-1,65

A la vista de estos datos, se pueden obtener varias conclusiones, el termostato con el sensor de temperatura más preciso es tado°, que tiene una diferencia entre la temperatura real y la medida por su sensor, entre 0,12 y 0,33 °C cuando se encuentra por encima de la temperatura de consigna, y entre 0,36 y 0,96 °C cuando está por debajo. Seguido muy de cerca, se encuentra el termostato Nest, en el que la diferencia de temperatura se encuentra entre 0,48 y 1,05 °C en el primer caso, y entre 0,76 y 1,15 °C en el segundo.

Los otros dos termostatos, Netatmo y Momit, se distancian más en sus medidas. Netatmo obtiene una diferencia entre 1,5 y 2,08 °C por encima de la de consigna y 1,1 y 1,65 °C por debajo, mientras que Momit se aleja un poco más por encima, entre 3,04 y 3,92 °C, y disminuye por debajo, entre 0,19 y 0,83 °C, mejorando incluso los valores del termostato tado°.

La segunda conclusión es, que el termostato que mejor ajusta la temperatura de consigna fijada es tado°, seguido muy de cerca por Nest. El termostato tado° mantiene la temperatura real entre 0,93 y 1,22 °C por encima y entre 0,16 y 0,67 °C por debajo de la de consigna, los resultados de Nest se asemejan mucho a los de tado° cuando la temperatura es superior a la de consigna, estando entre 0,98 y 1,55 °C, la diferencia se aprecia en la parte inferior, obteniendo entre 1,26 y 1,65 °C de diferencia.

Netatmo y Momit, como en el caso anterior, se alejan más de tado° y Nest, llegando en alguna ocasión a una diferencia de 3,08 °C en el caso de Netatmo, y de 6,56 °C en el caso de Momit.

5.2. COMPORTAMIENTO DE LOS TERMOSTATOS DURANTE UN DÍA COMPLETO DE FUNCIONAMIENTO

5.2.1. Termostatos

5.2.1.1. Netatmo

Como en el apartado anterior, en los ensayos realizados con el termostato Netatmo, se han utilizado los dos algoritmos que posee, primero con el algoritmo de Histéresis y después con el algoritmo Avanzado o PID.

5.2.1.1.1. Netatmo: Algoritmo de Histéresis

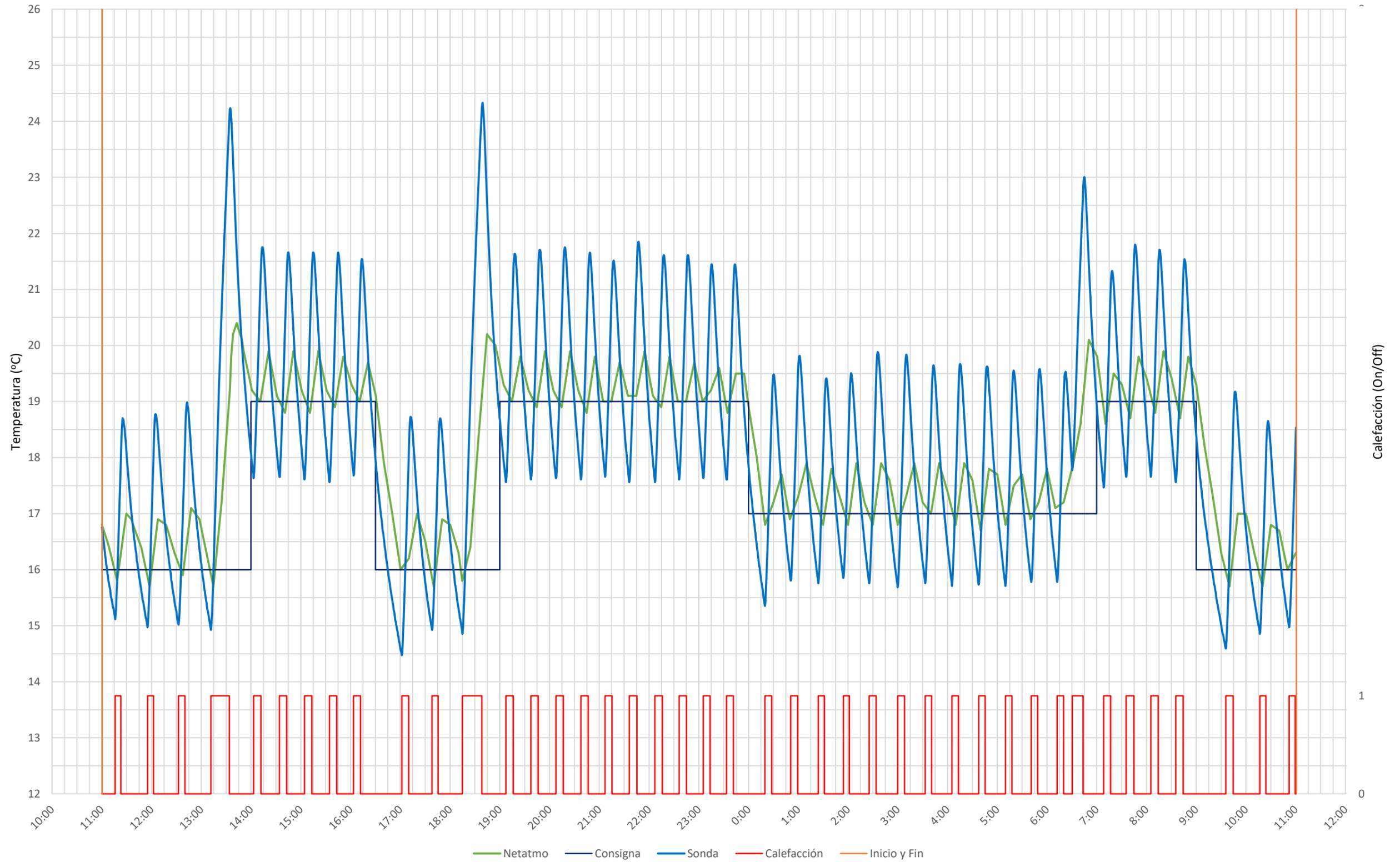


Figura 5.14. Termostato Netatmo a lo largo de un día de funcionamiento con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.14 se observa la variación de temperatura que se produce durante un día de funcionamiento del sistema con el termostato Netatmo y su algoritmo de Histéresis.

El comportamiento del termostato, una vez que se estabiliza la temperatura en los distintos periodos, es el mismo que en el apartado anterior. El comportamiento varía en el cambio de periodo en el que tiene que aumentar la temperatura en la cámara, ya que anticipa entre 30 y 46 minutos el encendido del sistema de calefacción para que la temperatura al inicio del periodo sea la deseada.

Esta anticipación del tiempo de encendido del sistema de calefacción genera unos picos de temperatura en los periodos correspondientes a 16 y 17 °C (8,33 y 7 °C de más, comparado con la temperatura de consigna, respectivamente), como se puede apreciar tanto en la figura 5.14 como en la tabla 5.2.

Sin tener en cuenta estos picos, las desviaciones de temperatura real en todos los periodos a lo largo del día, son muy similares a las que se han explicado en el apartado 5.1.2.

Tabla 5.2. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Netatmo con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas máximas y mínimas (°C)					
Tª Consigna 16°C		Tª Consigna 17°C		Tª Consigna 19°C	
<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
24,33	14,47	23,00	15,35	21,85	17,47

En la tabla 5.3 se puede ver el tiempo que ha estado encendida la calefacción durante los periodos del día comentados anteriormente, y el tiempo total de encendido, que ha sido de 6 horas y 20 minutos, el 26,43% del día.

Tabla 5.3. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Netatmo con el Algoritmo de Histéresis. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo de Calefacción en los distintos periodos del día (hh: mm: ss)						Tiempo total de Calefacción (hh: mm: ss)
<i>00:00 - 07:00</i>	<i>07:00 - 09:00</i>	<i>09:00 - 14:00</i>	<i>14:00 - 16:30</i>	<i>16:30 - 19:00</i>	<i>19:00 - 00:00</i>	
1:47:36	0:35:21	1:07:36	0:43:40	0:39:00	1:27:22	6:20:35

5.2.1.1.2. Netatmo: Algoritmo Avanzado o PID

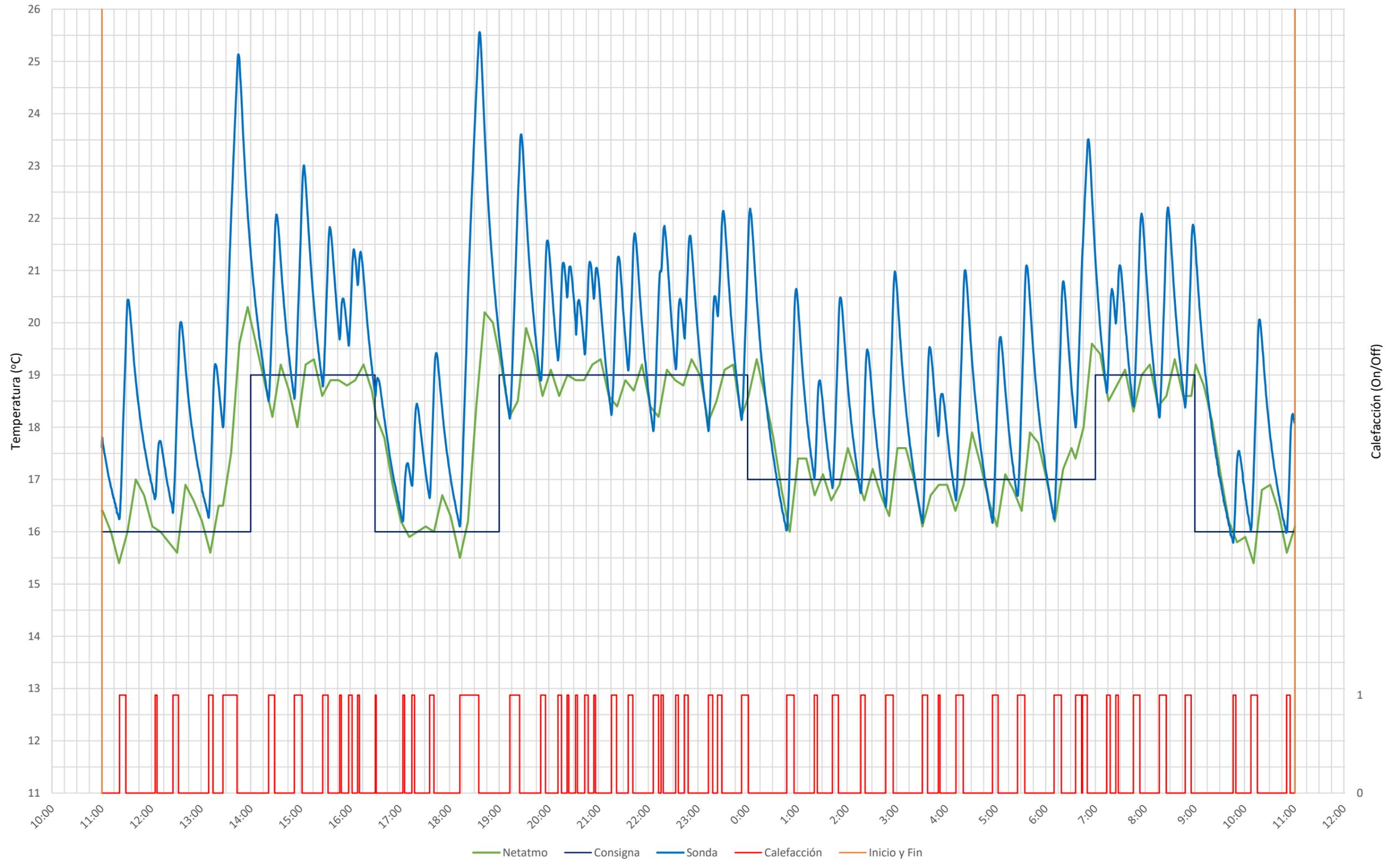


Figura 5.15. Termostato Netatmo a lo largo de un día de funcionamiento con el Algoritmo Avanzado o PID. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 5.15, el termostato Netatmo con el algoritmo Avanzado enciende y apaga el sistema de calefacción sin ningún orden, variando los tiempos de encendido y apagado con respecto al algoritmo de Histéresis.

También se aprecia como realiza una anticipación de temperatura, de entre 20 y 45 minutos, cuando se acercan los periodos de 19 °C, estas anticipaciones conllevan una desviación de la temperatura de entre 9,11 y 9,56 °C en el periodo de 16 °C, y de 6,51 °C en el de 17 °C.

Sin tener en cuenta estos picos de temperatura, comparando esta figura con las obtenidas en los ensayos de consigna (figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5), se podría decir que el termostato Netatmo ha aprendida las características del sistema, y ha mejorado su algoritmo, ya que la temperatura inferior en cualquiera de los periodos del día ha aumentado y se acerca más a la temperatura de consigna del periodo.

Tabla 5.4. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Netatmo con el Algoritmo Avanzado. Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas máximas y mínimas (°C)					
Tª Consigna 16°C		Tª Consigna 17°C		Tª Consigna 19°C	
<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
25,56	15,79	23,51	16,03	23,60	17,92

Teniendo el algoritmo Avanzado activo, el termostato Netatmo ha encendido el sistema de calefacción durante menos tiempo que con el algoritmo de Histéresis en todos los periodos del día, rebajando el tiempo total de encendido en más de una hora. La calefacción ha estado encendida el 22,09% del día, 5 horas y 18 minutos.

Tabla 5.5. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Netatmo con el Algoritmo Avanzado. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo de Calefacción en los distintos periodos del día (hh: mm: ss)						Tiempo total de Calefacción (hh: mm: ss)
<i>00:00 - 07:00</i>	<i>07:00 - 09:00</i>	<i>09:00 - 14:00</i>	<i>14:00 - 16:30</i>	<i>16:30 - 19:00</i>	<i>19:00 - 00:00</i>	
1:28:23	0:30:40	0:54:05	0:31:11	0:34:19	1:19:32	5:18:10

5.2.1.2. Momit

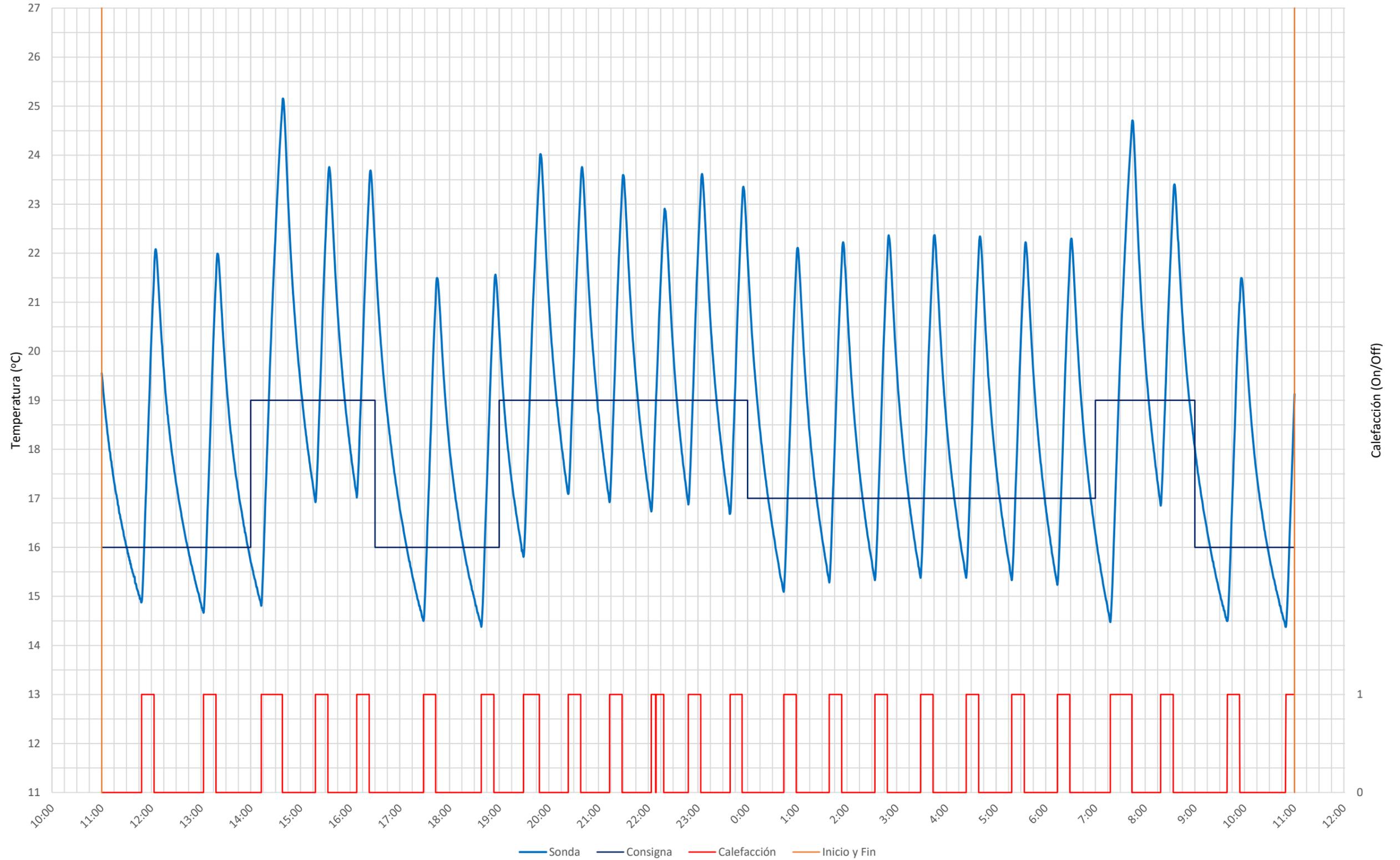


Figura 5.16. Termostato Momit a lo largo de un día de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.16 se observa la variación de temperatura que se produce durante un día de funcionamiento del sistema con el termostato Momit. El comportamiento del termostato, una vez que se estabiliza la temperatura en los distintos periodos, es el mismo que en el apartado anterior.

El comportamiento de Momit varía en el cambio de periodo en el que tiene que aumentar la temperatura en la cámara a 19 °C, ya que parece que, en alguno de los casos, el termostato no enciende el sistema de calefacción cuando debiera, y entonces se produce una desviación de temperatura de hasta 4,5 °C.

En la tabla 5.6 se puede observar como en los periodos de la misma temperatura de consigna, la temperatura máxima es muy elevada con respecto a la que se quiere conseguir, esta diferencia llega a ser de hasta 6 °C, en uno de los periodos de 16 °C de temperatura de consigna.

*Tabla 5.6. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Momit.
Fuente: Elaboración propia.*

Temperaturas máximas y mínimas (°C)					
Tª Consigna 16°C		Tª Consigna 17°C		Tª Consigna 19°C	
<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
22,03	14,38	22,37	15,09	25,15	14,47

En la tabla 5.7 se puede ver el tiempo que ha estado encendida la calefacción durante los periodos del día y el tiempo total de encendido, que ha sido de 6 horas y 21 minutos, el 26,46% del día. Estos tiempos son muy parecidos a los del termostato Netatmo con el algoritmo de Histéresis.

Tabla 5.7. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Momit. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo de Calefacción en los distintos periodos del día (hh: mm: ss)						Tiempo total de Calefacción (hh: mm: ss)
<i>00:00 - 07:00</i>	<i>07:00 - 09:00</i>	<i>09:00 - 14:00</i>	<i>14:00 - 16:30</i>	<i>16:30 - 19:00</i>	<i>19:00 - 00:00</i>	
1:45:31	0:41:03	0:55:38	0:55:37	0:29:38	1:33:33	6:21:00

5.2.1.3. Tado°

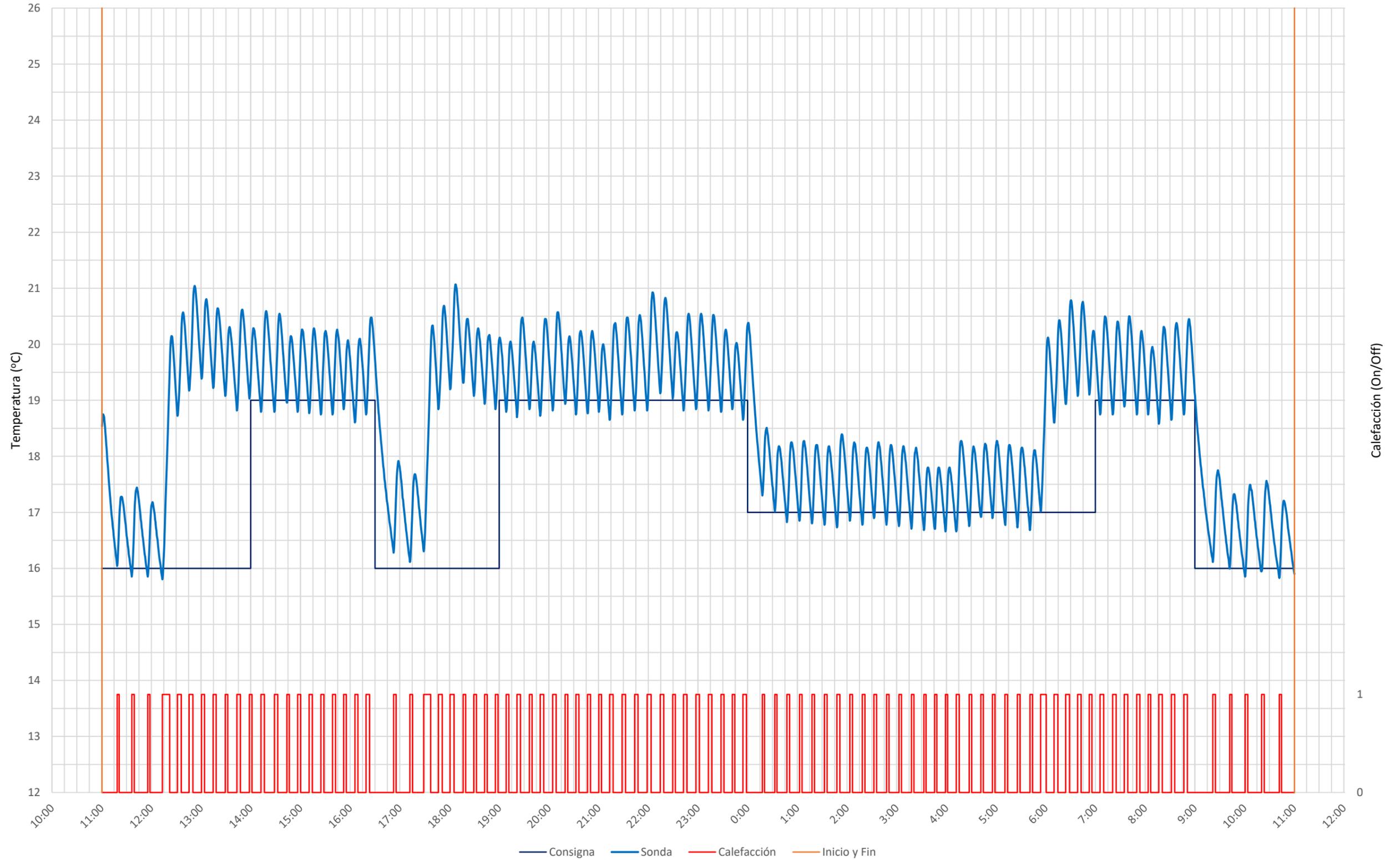


Figura 5.17. Termostato tadoo a lo largo de un día de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.17 se observa el comportamiento del termostato tado^o durante un día de funcionamiento. Su tiempo de anticipación, cuando se acerca el periodo de 19 °C, está entre 60 y 105 minutos, a la vista de la figura, este tiempo de anticipación es demasiado amplio, ya que consigue mantenerse en 19 °C durante mucho tiempo antes, es necesario seguir estudiando este comportamiento, para ver si el termostato reduce este tiempo de anticipación por medio del aprendizaje o, si, por el contrario, este tiempo se mantiene y no varía.

Por otro lado, debido al tiempo de anticipación comentado en el párrafo anterior, la temperatura máxima en los periodos de 16 y 17 °C se ve afectada en los tramos previos a conseguir 19 °C; 5,07 y 3,78 °C respectivamente.

Sin tener en cuenta los tiempos de anticipación, el termostato se comporta de la misma manera que en la figura 5.9 y en la Figura 5.10, manteniendo la temperatura casi siempre por encima de la de consigna.

Tabla 5.8. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato tado^o. Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas máximas y mínimas (°C)					
Tª Consigna 16°C		Tª Consigna 17°C		Tª Consigna 19°C	
<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
21,07	15,80	20,78	16,66	20,92	18,58

A continuación, en la tabla 5.9, se observan los tiempos de encendido del sistema de calefacción en cada uno de los periodos establecidos, obteniendo un total de tiempo de encendido de 5 horas y 37 minutos, que supone el 23,45% del día.

Tabla 5.9. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato tado^o. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo de Calefacción en los distintos periodos del día (hh: mm: ss)						Tiempo total de Calefacción (hh: mm: ss)
<i>00:00 - 07:00</i>	<i>07:00 - 09:00</i>	<i>09:00 - 14:00</i>	<i>14:00 - 16:30</i>	<i>16:30 - 19:00</i>	<i>19:00 - 00:00</i>	
1:33:34	0:31:50	0:55:36	0:40:00	0:36:28	1:20:13	5:37:41

5.2.1.4. Nest

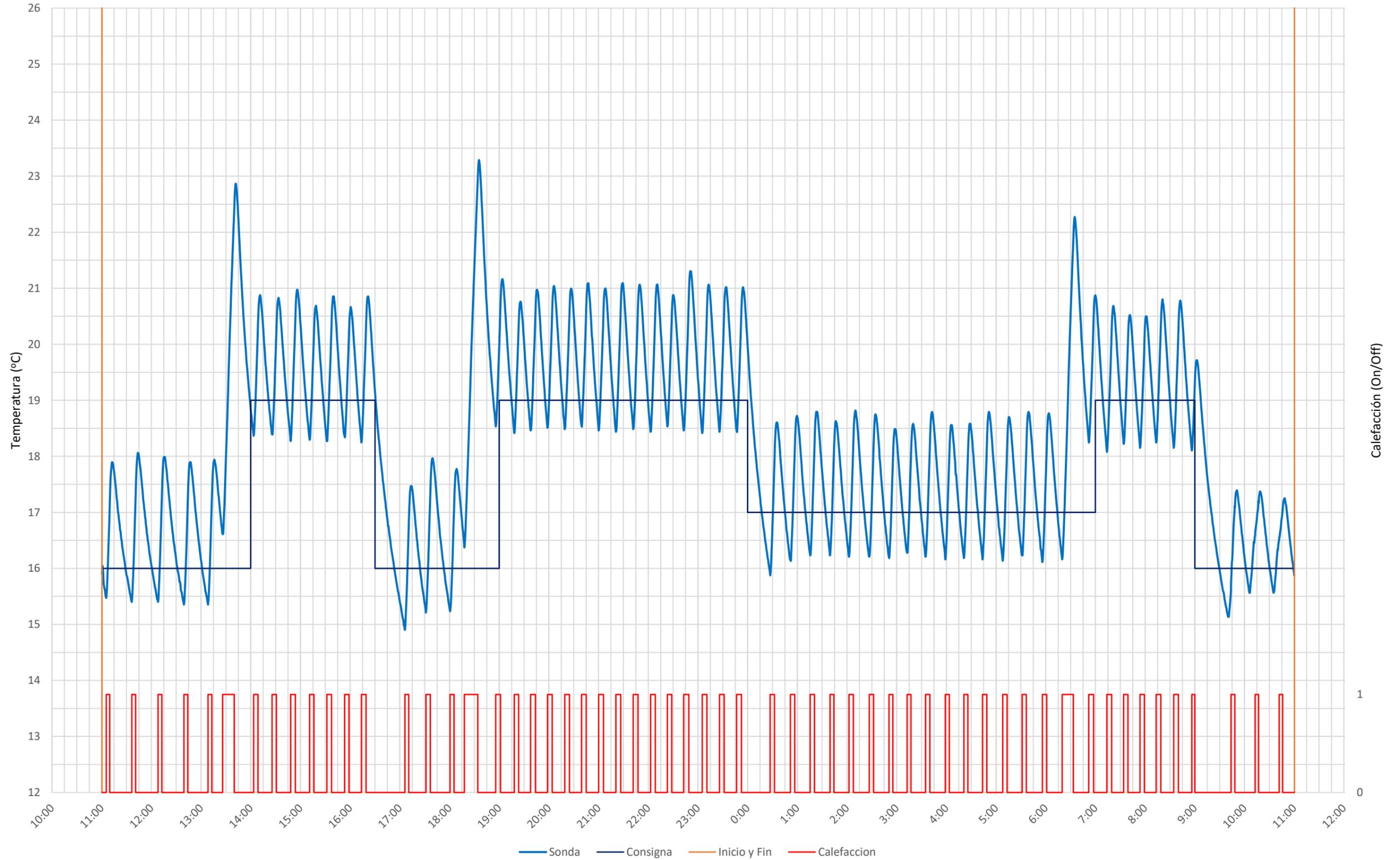


Figura 5.18. Termostato Nest a lo largo de un día de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del termostato Nest, que se puede observar en la Figura 5.18, es una mezcla de comportamiento entre el termostato Netatmo con el algoritmo de Histéresis (Figura 5.14) y el termostato tado° (Figura 5.17). Del primero posee los picos de temperatura antes de los periodos de 19 °C, y del segundo tiene la capacidad de ajustar la temperatura por debajo de la de consigna, de manera que esta no se desvíe más de 1,12 °C en el peor de los casos.

Debido a los picos de temperatura, la temperatura se llega a desviar hasta 7,29 °C durante uno de los periodos de 16 °C, y 5,27 °C en el periodo de 17 °C. el resto del tiempo, la temperatura se mantiene, como máximo, en 2,3 °C por encima de la de consigna.

Tabla 5.10. Temperaturas máximas y mínimas obtenidas durante el ensayo del termostato Nest. Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas máximas y mínimas (°C)					
Tª Consigna 16°C		Tª Consigna 17°C		Tª Consigna 19°C	
<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>
23,29	14,90	22,27	15,88	21,30	18,08

En cuanto al tiempo de encendido del sistema de calefacción, se parece mucho a los tiempos conseguidos por el termostato tado° en todos los periodos, consiguiendo un tiempo total de encendido de 5 horas y 30 minutos, lo que supone que ha estado en funcionamiento el 22,92% del día.

Tabla 5.11. Tiempos de encendido parciales y total del sistema de calefacción controlado por el termostato Nest. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo de Calefacción en los distintos periodos del día (hh: mm: ss)						Tiempo total de Calefacción (hh: mm: ss)
<i>00:00 - 07:00</i>	<i>07:00 - 09:00</i>	<i>09:00 - 14:00</i>	<i>14:00 - 16:30</i>	<i>16:30 - 19:00</i>	<i>19:00 - 00:00</i>	
1:34:43	0:31:12	0:50:04	0:37:54	0:30:47	1:25:20	5:30:00

5.2.2. Conclusiones

En la tabla 5.12, se reúnen todos los datos de temperaturas máximas y mínimas que se han comentado anteriormente en cada uno de los apartados de los termostatos. Comparándolos entre ellos, se puede observar que en el termostato tado°, teniendo en cuenta los tiempos de anticipación, las temperaturas que presenta son las que menos se desvían de las de consigna establecidas, el segundo mejor termostato es Nest, cuyas desviaciones de temperatura están más próximas a tado° que a los otros dos termostatos.

Si no tenemos en cuenta las temperaturas en los periodos de anticipación, éstas son muy parecidas a las obtenidas en los ensayos para mantener las temperaturas de consigna, reunidos en la tabla 5.1, permaneciendo el termostato tado° como el mejor en este aspecto, seguido, como en el caso anterior, por Nest.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

Tabla 5.12. Resultados de temperaturas máximas y mínimas reales de los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.

Termostato		Temperaturas máximas y mínimas (°C)					
		Tª Consigna 16°C		Tª Consigna 17°C		Tª Consigna 19°C	
		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Netatmo	Algoritmo de Histéresis	24,33	14,47	23,00	15,35	21,85	17,47
	Algoritmo Avanzado o PID	25,56	15,79	23,51	16,03	23,60	17,92
Momit		22,03	14,38	22,37	15,09	25,15	14,47
Tado°		21,07	15,80	20,78	16,66	20,92	18,58
Nest		23,29	14,90	22,27	15,88	21,30	18,08

En la tabla 5.13 se han unido todos los datos de tiempo de encendido parcial y total del sistema de calefacción. Se puede apreciar como los tiempos de encendido obtenidos por los termostatos Netatmo (Algoritmo Avanzado), tado° y Nest, son muy parecidos, quedando en primer lugar Netatmo, con un tiempo total de 5h18', frente a 5h37' y 5h30' que han obtenido los otros dos termostatos respectivamente.

Netatmo (Algoritmo de Histéresis) y Momit poseen unos tiempos de encendido mayores, superando las 6 horas de encendido al día en ambos casos.

Tabla 5.13. Resultados de tiempos de encendido del sistema de calefacción parciales y totales de los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.

Termostato		Tiempo de encendido del sistema de calefacción en los distintos periodos del día (hh: mm: ss)						Tiempo total de encendido del sistema de calefacción (hh: mm: ss)
		00:00 - 07:00	07:00 - 09:00	09:00 - 14:00	14:00 - 16:30	16:30 - 19:00	19:00 - 00:00	
Netatmo	Algoritmo de Histéresis	1:47:36	0:35:21	1:07:36	0:43:40	0:39:00	1:27:22	6:20:35
	Algoritmo Avanzado o PID	1:28:23	0:30:40	0:54:05	0:31:11	0:34:19	1:19:32	5:18:10
Momit		1:45:31	0:41:03	0:55:38	0:55:37	0:29:38	1:33:33	6:21:00
Tado°		1:33:34	0:31:50	0:55:36	0:40:00	0:36:28	1:20:13	5:37:41
Nest		1:34:43	0:31:12	0:50:04	0:37:54	0:30:47	1:25:20	5:30:00

Tabla 5.14. Resultados de porcentajes de tiempo parciales en los que la temperatura ha sido superior o inferior a la temperatura de consigna en los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.

Termostato	Porcentaje de tiempo en el que la temperatura ha sido superior o inferior a la de consigna en cada periodo (%)																							
	00:00 - 07:00				07:00 - 09:00				09:00 - 14:00				14:00 - 16:30				16:30 - 19:00				19:00 - 00:00			
	Sup.		Inf.		Sup.		Inf.		Sup.		Inf.		Sup.		Inf.		Sup.		Inf.		Sup.		Inf.	
	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$\Delta T^a > 1^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	$1^\circ C > \Delta T^a > 0^\circ C$	
Netatmo: Histéresis	62,6%		37,4%		58,5%		41,5%		65,6%		34,4%		60,3%		39,7%		67,5%		32,5%		58,9%		41,1%	
	41,1%	21,5%	26,5%	10,9%	37,3%	21,2%	27,5%	14,0%	43,9%	21,7%	30,2%	4,2%	39,1%	21,2%	26,3%	13,4%	48,7%	18,9%	24,3%	8,2%	38,1%	20,8%	26,3%	14,7%
Netatmo: Avanzado o PID	82,3%		17,7%		77,9%		22,1%		98,4%		1,6%		87,5%		12,5%		100,0%		0,0%		82,4%		17,6%	
	57,4%	24,9%	18%	0,0%	51,0%	27,0%	22%	0,0%	69,5%	29,0%	2%	0,0%	59,4%	28,1%	13%	0,0%	77,4%	22,6%	0,0%	0,0%	55,8%	26,6%	16,5%	1,0%
Momit	65,55%		34,45%		54,56%		45,44%		67,14%		32,86%		58,98%		41,02%		66,73%		65,55%		34,45%		54,56%	
	49,3%	16,2%	18,5%	16,0%	42,4%	12,1%	14,0%	31,4%	46,7%	20,4%	22,1%	10,8%	47,6%	11,4%	12,8%	28,2%	50,8%	15,9%	19,1%	14,2%	42,1%	13,5%	15,9%	28,4%
Tado°	86,9%		13,1%		82,3%		17,7%		94,7%		5,3%		83,7%		16,3%		100,0%		0,0%		85,8%		14,2%	
	38,1%	48,8%	13%	0,0%	29,9%	52,4%	18%	0,0%	59,8%	35,0%	5%	0,0%	31,5%	52,2%	16%	0,0%	82,7%	17,3%	0,0%	0,0%	32,1%	53,7%	14%	0,0%
Nest	66,1%		33,9%		63,6%		36,4%		74,5%		25,5%		69,6%		30,4%		76,3%		23,7%		76,4%		23,6%	
	36,7%	29,4%	33,4%	0,5%	30,7%	32,9%	36%	0,0%	41,5%	33,0%	26%	0,0%	36,5%	33,1%	30%	0,0%	52,4%	23,9%	22,3%	1,4%	44,0%	32,4%	24%	0,0%

En la tabla 5.14 se muestran los porcentajes de tiempo en cada periodo, en los que la temperatura ha sido superior o inferior a la de consigna, además, se ha creído conveniente mostrar el porcentaje de tiempo en el que la temperatura se ha desviado por encima o por debajo, más de 1 °C en cada uno de ellos.

Los termostatos Netatmo (Algoritmo Avanzado), tado° y Nest, mantienen el porcentaje de desviación mayor de 1 °C por debajo, casi en el 0% en la mayoría de periodos, esto significa que, por ejemplo, al tener 16 °C de temperatura de consigna, los termostatos han hecho que la temperatura no disminuya por debajo de 15 °C en la mayoría del tiempo del periodo correspondiente.

En cuanto a la desviación de la temperatura por encima de la de consigna, los termostatos que mejor porcentaje poseen, son tado° y Nest, aun teniendo en cuenta el tiempo de anticipación, que hace que la temperatura se desvíe más de 1 °C por encima en varios periodos a lo largo del día.

En la tabla 5.15 se pueden ver el tiempo total y el porcentaje del día en el que la temperatura ha sido superior e inferior a la de consigna, y también, los tiempos y porcentajes en los que la temperatura se ha encontrado en una desviación mayor y menor a 1 °C, tanto por encima, como por debajo de la temperatura de consigna.

Los termostatos Netatmo (Algoritmo Avanzado) y tado°, son los que más tiempo se encuentran por encima de la temperatura de consigna, esto es un buen indicador, pero, como se verá a continuación en la tabla 5.16, no es el mejor indicador para establecer que termostato es el mejor en cuanto a confort. El termostato Nest se encuentra a continuación, 17 horas y 5 minutos es el tiempo en el que la temperatura se ha encontrado por encima de la de consigna.

Teniendo en cuenta el tiempo en el que la temperatura se ha encontrado por debajo de la de consigna, obviamente los termostatos Netatmo (Algoritmo Avanzado) y tado°, seguidos por Nest, son los que mejores tiempos tienen, pero si nos fijamos en el porcentaje parcial de la desviación mayor a 1 °C, observamos que el termostato tado° posee un 0% en este apartado, esto significa que ha mantenido siempre la temperatura con una desviación menor a 1 °C. Nest y Netatmo (Algoritmo Avanzado) están muy cerca, teniendo un 0,29 y un 0,22% respectivamente.

Tabla 5.15. Resultados de tiempos y porcentajes totales en los que la temperatura ha sido superior o inferior a la temperatura de consigna en los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.

Termostato		Tiempo y Porcentaje Total en el que la temperatura ha sido superior o inferior a la de consigna (hh: mm: ss) (%)			
		Superior a la Tª de consigna		Inferior a la Tª de consigna	
		Desviación mayor de 1 °C	Desviación menor de 1 °C	Desviación menor de 1 °C	Desviación mayor de 1 °C
Netatmo	Algoritmo de Histéresis	14:58:36 62,40%		9:01:24 37,60%	
		9:55:14 41,34%	5:03:22 21,07%	6:29:36 27,06%	2:31:48 10,54%
		21:03:00 87,71%		2:57:00 12,29%	
	Algoritmo Avanzado o PID	14:43:27 61,35%	6:19:33 26,36%	2:53:53 12,08%	0:03:07 0,22%
		15:23:03 62,34%		8:36:57 37,66%	
		11:12:16 46,69%	3:45:26 15,66%	4:16:23 17,80%	4:45:55 19,86%
Tado°	21:20:41 88,94%		2:39:19 11,06%		
	10:42:56 44,65%	10:37:45 44,29%	2:39:19 11,06%	0:00:00 0,00%	
	17:05:16 71,20%		6:54:44 28,80%		
Nest	9:40:51 40,34%	7:24:25 30,86%	6:50:35 28,51%	0:04:09 0,29%	

A modo de explicar de manera más visual las dos tablas anteriores (tabla 5.14 y tabla 5.15), se ha generado la figura 5.19, en la que se pueden observar las campanas de Gauss creadas a partir de los datos de temperatura de los periodos con una misma temperatura de consigna, y también, a partir de las desviaciones de temperatura que se observan a lo largo del día de funcionamiento de cada termostato.

La campana de Gauss muestra cómo se distribuye la probabilidad de una variable continua, en este caso, la temperatura y la desviación de la misma en cada ensayo de los termostatos. Esta distribución muestra como los valores más comunes aparecen en el centro de la campana y los menos frecuentes, en los extremos.

Las campanas de los termostatos tado° y Nest son más estrechas y alargadas que las del resto, esto indica que el mayor porcentaje de su desviación se encuentra en un rango muy pequeño, mientras que, en los otros tres ensayos, los de los termostatos Netatmo (Histéresis y Avanzado) y Momit, sus campanas son menos alargadas y más anchas, por lo que el rango de temperatura de sus desviaciones es mucho mayor.

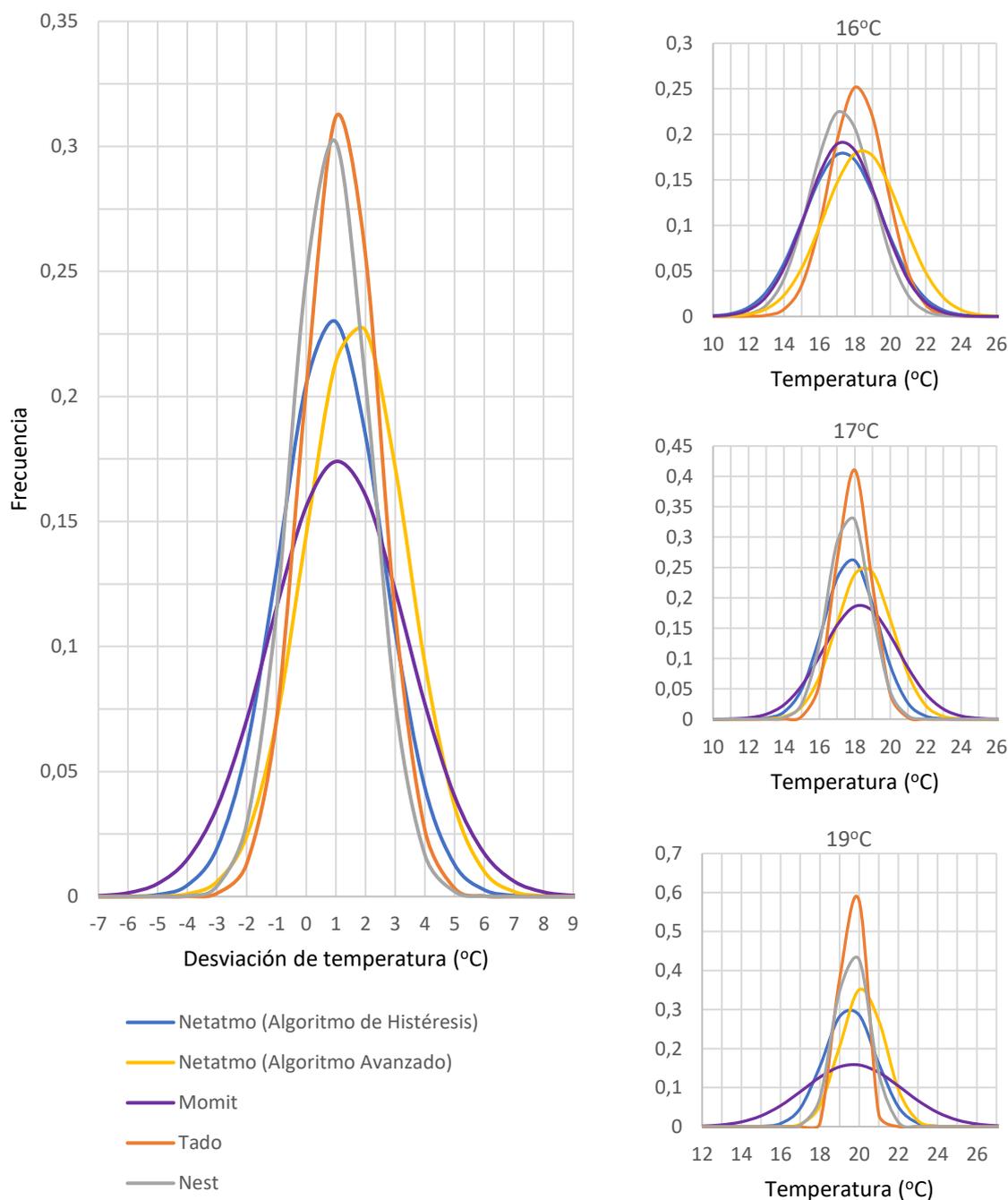


Figura 5.19. Campana de Gauss de la desviación de la temperatura con respecto a las temperaturas de consigna durante los ensayos de un día de funcionamiento y desviación de la temperatura en cada uno de los casos de temperatura de consigna establecidas (16, 17 y 19 oC). Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.20 se recogen los histogramas de la desviación de temperatura durante los ensayos realizados, en los que se representa gráficamente la desviación en forma de barras donde el tamaño de cada barra es proporcional a la frecuencia del valor representado. Netatmo (Algoritmo Avanzado), tado° y Nest tienen las mayores frecuencias en las desviaciones más próximas a 0 °C, como era de esperar. En el histograma de tado° las frecuencias de la desviación entre 3 y 5 °C aumentan, esto es debido a la anticipación del encendido de la temperatura como ya se ha comentado anteriormente.

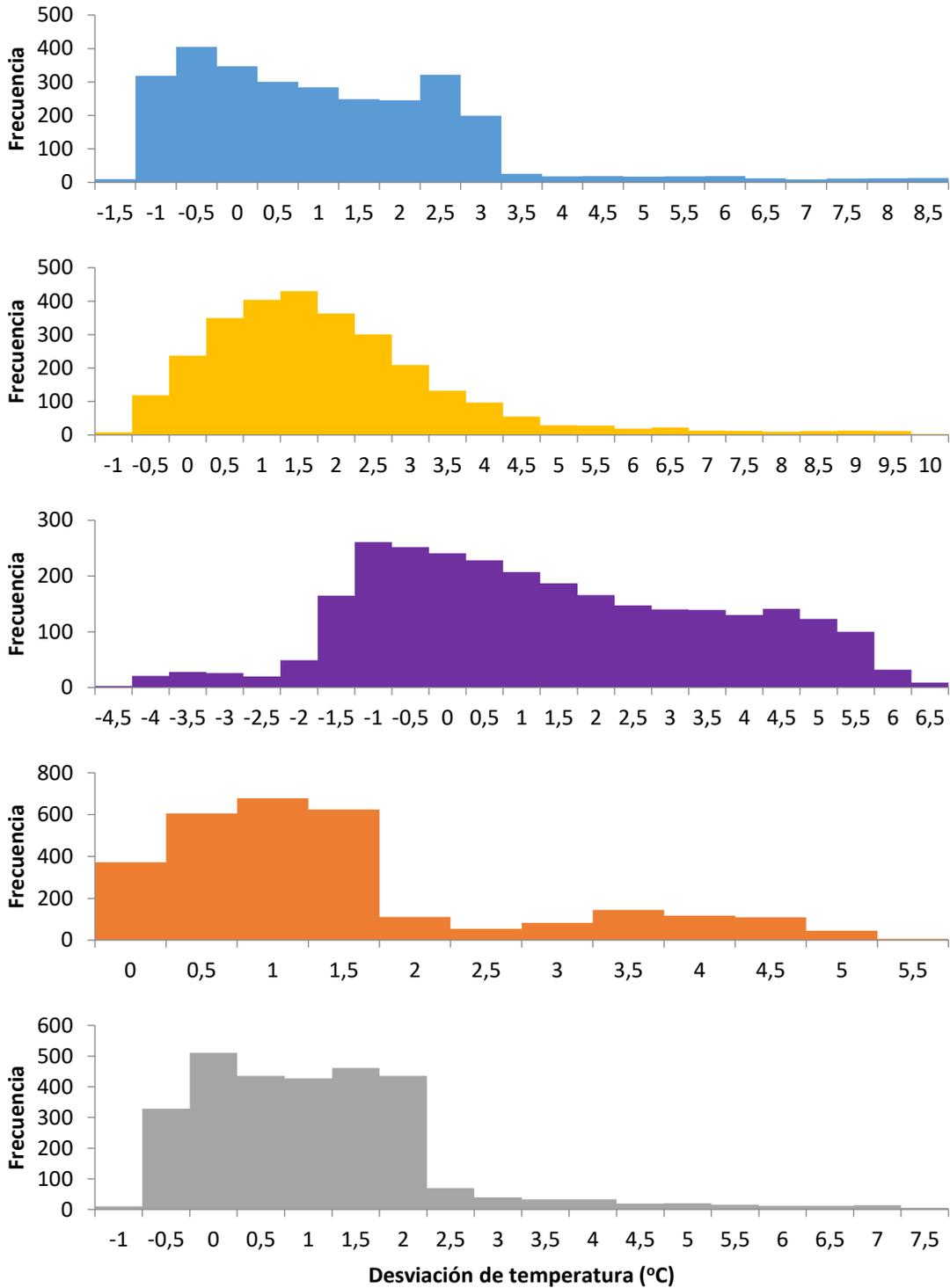


Figura 5.20. Histogramas de la desviación de temperatura durante los ensayos realizados (Netatmo Histeresis, Netatmo Avanzado, Momit, Tado° y Nest). Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5.16, se han unido en una sola las columnas centrales de la tabla 5.15, estas dos columnas mostraban el tiempo y el porcentaje de tiempo en el que la temperatura se desviaba menos de 1 °C tanto por encima como por debajo de la temperatura de consigna establecida en cada periodo, con lo que la suma de estas dos columnas nos indica cuanto tiempo ha permanecido la temperatura en un rango que, podríamos decir, es el más confortable en cada periodo, ni mucho frío, ni mucho calor.

En este caso, el mejor termostato es Nest, que ha permanecido 14 horas y 13 minutos en el rango de confort, el 59,29% del día. El termostato que lo sigue es tado°, con 13 horas y 17 minutos (55,35%). Netatmo, con sus dos algoritmos, tiene menos del 50% del tiempo en el rango de confort en ambos casos, mejorando el algoritmo de Histéresis al Avanzado, 11 horas y 32 minutos frente a 9 horas y 13 minutos. Momit por su parte, mantiene la temperatura en este rango el 33,46% del día, lo que le hace el peor de los cuatro termostatos en cuanto a confort.

Tabla 5.16. Resultados de tiempo y porcentaje en los que la temperatura se ha encontrado en un rango de ± 1 °C de la temperatura de consigna en los ensayos de un día completo de funcionamiento de los termostatos. Fuente: Elaboración propia.

Termostato		Tiempo y Porcentaje en el que la temperatura se ha encontrado en un rango de ± 1 °C de la temperatura de consigna (hh: mm: ss) (%)
Netatmo	Algoritmo de Histéresis	11:32:58 48,12%
	Algoritmo Avanzado o PID	9:13:26 38,43%
Momit		8:01:49 33,46%
Tado°		13:17:04 55,35%
Nest		14:15:00 59,38%

En la figura 5.21 se puede observar una gráfica comparativa del tiempo en el que la temperatura ha permanecido en un rango de -1 a 1 °C de la temperatura de consigna establecida para cada periodo. Se puede ver como Nest y tado° son los que mayor tiempo han estado en este rango, seguidos de cerca por Netatmo con su algoritmo Avanzado, mientras que Netatmo con el algoritmo de Histéresis y Momit se alejan mucho de estos tiempos.

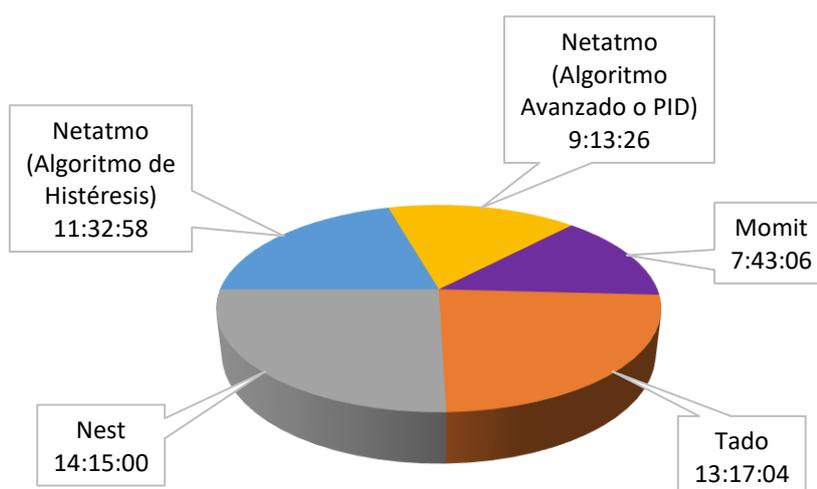


Figura 5.21. Gráfico comparativo de tiempo en el que la temperatura ha permanecido en un rango de -1 a 1 °C de la temperatura de consigna. Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES FINALES

En este trabajo se han utilizado cuatro termostatos inteligentes para comprobar sus principales características. Para conseguirlo, se construyó una cámara de ensayos térmicos para recrear el calentamiento y refrigeración de una vivienda y para trazar y registrar los datos.

A partir de los datos obtenidos de la cámara de ensayos térmicos, y su posterior tratamiento, se han podido conseguir las tablas y figuras anteriores, de las mismas, se ha realizado una evaluación comparativa de los termostatos. Esta evaluación, no deja de ser una valoración de los termostatos en una situación muy específica en el laboratorio, por lo que el alcance de las conclusiones es limitado.



Figura 6.1. Termostatos sujetos a evaluación: Netatmo, Momit, tado° y Nest. Fuente: Fabricantes de los termostatos.

De la evaluación comparativa realizada, se observó claramente que los termostatos **tado°** y **Nest** fueron los que obtuvieron los mejores resultados en las pruebas realizadas. Cada uno de ellos es ligeramente mejor que el otro en cierto sentido. Por ejemplo, tado° es mucho más preciso en cuanto a mostrar la temperatura real y, por otro lado, Nest mantiene la temperatura en un rango mucho más próximo a la temperatura de consigna.

En tercer lugar, se encuentra el termostato **Netatmo**, que una vez que aprende las características de la vivienda (en este caso la cámara de ensayos térmicos) y utiliza el algoritmo Avanzado, obtiene unos resultados muy próximos a los de tado° y Nest.

En último lugar se encuentra el termostato **Momit**, cuyos resultados han estado siempre muy alejados de los idóneos. El carecer de anticipación de temperatura, como el resto de termostatos, y poseer un tiempo de recogida de datos de temperatura bastante grande (cada 5 minutos), le ha perjudicado seriamente en los ensayos.

El aprendizaje de los termostatos en cuanto a los hábitos y preferencias de los usuarios, no ha sido demostrado debido a la mínima interacción con el mismo, ya que siempre trabajó con las pautas establecidas. En cuanto al modo de anticipación, ha quedado demostrado que los termostatos no mejoraron o aprendieron en este aspecto, ya que no mejoraron los tiempos de arranque del sistema de calefacción, con el consecuente aumento del consumo de energía.

A partir del diseño y construcción del banco de pruebas, y el estudio acerca de la capacidad de ahorro y la eficiencia de los termostatos inteligentes, se está elaborando un artículo para una revista científica, que será publicado en los próximos meses.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aarish, C., y otros. 2015. *Evaluation of 2013-2014 Smart Thermostat Pilots: Home Energy Monitoring, Automatic Temperature Control, Demand Response.* Evansville, Indiana : Prepared by Cadmus Group, Inc. for National Grid, 2015.

Aarish, C., y otros. 2015. *Evaluation of the 2013–2014 Programmable and Smart Thermostat Program.* Evansville, Indiana : Prepared by Cadmus Group, Inc. for Northern Indiana Public Service Company (NIPSCO), 2015.

Aarish, C., y otros. 2015. *Evaluation of the 2013–2014 Programmable and Smart Thermostat Program.* Evansville, Indiana : Prepared by Cadmus Group, Inc. for Vectren Corporation, 2015.

Aarish, C., y otros. 2012. *Wi-Fi Programmable Controllable Thermostat Pilot Program Evaluation.* Portland, OR : Prepared by Cadmus Group, Inc. for The Electric and Gas Program Administrators of Massachusetts, 2012.

Aarish, C.; Jones, C.; Cadmus Group, Inc. 2016. *Smart Thermostats and the Triple Bottom Line: People, Planet, and Profits.* Pacific Grove, CA : ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2016.

AB electronics UK. ca. 2015. ADC Pi Plus. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] <https://www.abelectronics.co.uk/p/56/ADC-Pi-Plus-Raspberry-Pi-Analogue-to-Digital-converter>.

Apex Analytics LLC. . 2014. *Nest Thermostat Heat Pump Control - Pilot Evaluation.* Portland, OR : Prepared for Energy Trust of Oregon, 2014.

Apex Analytics, LLC. 2016. *Smart Thermostat Pilot Evaluation.* Boulder, CO : Prepared by Apex Analytics, LLC. for Energy Trust of Oregon, 2016.

Cadmus Group, Inc. 2014. *Energy Savings from Honeywell Total Connect Comfort Thermostats.* Pacific Grove, CA : Prepared by Cadmus Group, Inc. for Smart Grid Solutions Honeywell International Incorporated, 2014.

CLEARResult. 2015. *Opportunities for Home Energy Management Systems (HEMS) in Advancing Residential Energy Efficiency Programs. Appendix B: Findings from 2014 CLEARResult Home Automation Market Survey.* Austin, Texas : Prepared by CLEARResult for Northeast Energy Efficiency Partnership, Inc. (NEEP), 2015.

—. **2015.** *Smart thermostats.* Austin, Texas : Prepared by CLEARResult for Commonwealth Edison, 2015.

ENERGY STAR. 2009. *A Guide to Energy-Efficient Heating and Cooling.* s.l. : Energy Star, 2009.

Eurogas, Marcogaz, GERG. 2014. *Gas: the right choice for heating in Europe.* 2014.

EUROPEAN COMMISSION. COM (2016) 51 final. *An EU Strategy on Heating and Cooling.* Brussels : European Commission, COM (2016) 51 final.

—. **2011.** *Energy 2020 - A strategy for competitive, sustainable and secure energy.* Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2011.

—. **COM(2014) 520 final.** *Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy.* Brussels : European Commission, COM(2014) 520 final.

—. **2012.** *Energy roadmap 2050.* Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2012.

—. **2016.** *EU Reference Scenario 2016 - Energy, Transport and GHG Emissions - Trends to 2050.* Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2016.

GitHub, Inc. [US]. ca. 2015. AB Electronics Python Libraries. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] https://github.com/abelectronicsuk/ABElectronics_Python3_Libraries.

—. **ca. 2015.** Emulator for the PiFace Digital I/O board. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] <https://github.com/piface/pifacedigital-emulator>.

—. **ca. 2015.** PiFace Common's documentation. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] <https://github.com/piface/pifacecommon/>.

—. **ca. 2015.** PiFace Control and Display Python module. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] <https://github.com/piface/pifacecad>.

—. **ca. 2015.** PiFace Digital Input/Output module. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 23 de Febrero de 2017.] <https://github.com/piface/pifacedigitalio>.

IDAE. 2011. *Guía Práctica de la Energía. Consumo Eficiente y Responsable.* Madrid : IDAE, 2011.

—. **2011.** *Guía práctica sobre instalaciones individuales de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) en edificios de viviendas.* Madrid : IDAE, 2011.

—. **2011.** *Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020.* Madrid : IDAE, 2011.

Manning, M.M., y otros. 2007. *The effects of thermostat set-back and set-up on seasonal energy consumption, surface temperatures and recovery times at the CCHT Twin House Facility.* 2007. págs. 1-12.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 2011. *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020.* Madrid : Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2011.

Nest Labs, Inc. 2014. *White Paper - Enhanced Auto-Schedule.* 2014.

—. **2014.** *White Paper - Nest Learning Thermostat Efficiency Simulation for Belgium.* 2014.

—. **2012.** *White Paper - Nest Learning Thermostat Efficiency Simulation: Update Using Data from First Three Months.* 2012.

PiFace. ca. 2015. PiFace Control and Display 2. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] http://www.piface.org.uk/products/piface_control_and_display_2/.

—. **ca. 2015.** PiFace Digital 2. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] http://www.piface.org.uk/products/piface_digital_2/.

—. **ca. 2015.** PiFace Real Time Clock. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] http://www.piface.org.uk/products/piface_clock/.

—. **ca. 2015.** PiFace Real Time Clock user. [En línea] ca. 2015. [Citado el: 22 de Febrero de 2017.] http://www.piface.org.uk/assets/piface_clock/PiFaceClockguide.pdf.

Pinout.xyz. ca. 2017. Raspberry Pi Pinout. [En línea] ca. 2017. [Citado el: 21 de Febrero de 2017.] <https://pinout.xyz/>.

RASPBERRY PI FOUNDATION. ca. 2017. <https://www.raspberrypi.org/>. [En línea] ca. 2017. [Citado el: 28 de Febrero de 2017.] <https://www.raspberrypi.org/>.

RS Components, Amidata S.A. ca. 2017. RS Components. [En línea] ca. 2017. [Citado el: 20 de Diciembre de 2016.] <http://es.rs-online.com/web/>.

TEXAS INSTRUMENTS. ca. 2016. Texas Instruments, JFET-Input Operational Amplifier. [En línea] ca. 2016. [Citado el: 22 de Diciembre de 2016.] <http://www.ti.com/product/TL084?keyMatch=tl084cn&tisearch=Search-EN-Everything>.

—. **ca. 2016.** Texas Instruments, WEBENCH® Power Designer. [En línea] ca. 2016. [Citado el: 22 de Diciembre de 2016.] <https://webench.ti.com>.

Zhang, D., y otros. 2015. *An Integrative Study of Home Energy Management for Residential Energy Consumers*. Shenyang, China : The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, 2015.

8. ANEXOS

A. FICHAS TÉCNICAS DE LOS TERMOSTATOS

En este anexo, se muestran las fichas técnicas creadas de cada uno de los termostatos evaluados, en las que se agrupan las características y las especificaciones de los cuatro termostatos de manera similar.

Tabla 8.1. Ficha técnica del termostato Netatmo. Fuente: Elaboración propia.

NOMBRE DEL TERMOSTATO	NETATMO
DESCRIPCIÓN DEL TERMOSTATO	Termostato inalámbrico controlable desde el smartphone.
	
CARACTERÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Termostato de ambiente para smartphone, tableta u ordenador. • Regulación PID de gran Precisión. • Con pantalla e-paper: Ahorro de energía, sin reflejo, lectura óptima. • Gestión a distancia de la calefacción: <ul style="list-style-type: none"> ○ Modificación de la temperatura. ○ Modos Anti-helada y Ausente. ○ Seguimiento de la temperatura y la actividad de la caldera. ○ Posibilidad de añadir programas, modificar las franjas horarias o las temperaturas establecidas. ○ Número ilimitado de rangos de temperatura por día y de programas semanales. • Programa semanal en función del ritmo de vida de la familia. • Programa definido desde la primera utilización a partir de 5 preguntas sencillas. • Anticipación del inicio del periodo de calefacción para alcanzar la temperatura idónea en el momento preciso. • Regulación de la calefacción mediante algoritmo avanzado (PID). • Balance de Ahorro Energético mensual y personalizado. • Fácil instalación. • Compatible con calderas de gasoil, gas y pellets.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

ESPECIFICACIONES	Temperatura (medición):	Rango de medición: 0 °C a 50 °C
		Precisión: ± 0,5 °C
	Temperatura (ajuste):	Rango de ajuste: 5 °C a 30 °C
		Incremento: 0,5 °C
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato</u>: 83 x 83 x 22 mm. • <u>Relé</u>: 83 x 83 x 22 mm. 	
APLICACIÓN (App)	La App del termostato está disponible en el App Store, Google Play Store, Windows Phone Store, Mac y PC.	
INSTALACIÓN	2 opciones de colocación:	Termostato inalámbrico con conexión WIFI (Sin necesidad de cables añadidos).
		Termostato filar con conexión WIFI (Aprovechar los dos hilos existentes).
PRECIO	179,00 €	
ELEMENTOS ADICIONALES	<ul style="list-style-type: none"> • Cable adaptador de corriente para el Termostato Netatmo (9,00 €): permite conectar directamente el Termostato Netatmo a la red eléctrica 220 V, cuando la caldera no cuenta con ninguna salida de corriente a 220 V. 	
FICHA TÉCNICA	Enlace	

Tabla 8.2.Ficha técnica del termostato Momit. Fuente: Elaboración propia.

NOMBRE DEL TERMOSTATO	MOMIT HOME THERMOSTAT (Momit)	
DESCRIPCIÓN DEL TERMOSTATO	Kit de termostato wifi inteligente Momit Home Thermostat, inalámbrico (es necesario un accesorio, no incluido en el kit), con tecnología inteligente y un diseño innovador que cada día aprende de los hábitos de uso para que la temperatura y confort del hogar sean óptimos.	
	 <p style="text-align: center;"> <u>Gateway</u> <u>Thermostat</u> </p>	
CARACTERÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Wireless: Completamente móvil y versátil. • Presence: Detecta cuando hay gente en casa a través de sensor de movimiento. • Temperature and Humidity: Posee sensores de temperatura y humedad para realizar estadísticas eficientes y monitorización • MyBudget: Permite establecer un presupuesto energético mensual. • Geolocation: La calefacción se apaga o enciende en función de la distancia a la que el usuario se encuentre de casa. • Heat control: La temperatura se puede controlar desde un dispositivo móvil o desde el termostato. • Weather Forecast: Pronóstico del tiempo de hasta 7 días. • Visualización LED • Aplicación gratuita para control remoto desde dispositivo móvil. • Modo inteligente que aprende de las preferencias y de los hábitos de consumo. • Protocolo 6LoWPAN de comunicación entre el Gateway y termostato. • Programación de hasta 15 tramos de temperatura por día y programación de vacaciones. • 5 colores disponibles. • Calcula el tiempo promedio que toma cada hogar para alcanzar la temperatura óptima. 	
ESPECIFICACIONES	Temperatura (medición):	Rango de medición: 0 °C a 50 °C
		Precisión: ± 0,3 °C

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

	Temperatura (ajuste):	Rango de ajuste: 4 °C a 35 °C Incremento: 0,1 °C
	Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato</u>: 3 V DC (2 x pilas alcalinas 1,5 V AA). • <u>Gateway</u>: 5 V (USB).
	Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato</u>: 100 x 100 x 25 mm. • <u>Gateway</u>: 70 x 42 x 20 mm.
APLICACIÓN (App)	La App del termostato está disponible en el App Store, Google Play Store, BlackBerry App World y Windows Store.	
INSTALACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Si se reemplaza un termostato con conexión de cable</u>: Utiliza los cables existentes de la caldera para colocar el termostato en la pared. Solo hace falta conectar el Momit Gateway al router de Internet para que el termostato comunique con él. • <u>Si se reemplaza un termostato con conexión de cable y se desea que sea inalámbrico: (Es necesario el Momit Extension Kit)</u> En este caso, el Momit Extension Kit está conectado a la caldera y controla la calefacción, comunicándose a través de radio con el termostato colocado sobre su base, para llevarlo de habitación en habitación. Solo hace falta conectar el Gateway al router para que el termostato tenga salida a Internet mediante señal radio. 	
PRECIO	129,00 €	
ELEMENTOS ADICIONALES	<ul style="list-style-type: none"> • Momit Extension kit (39,00 €): Dispositivo que convierte el termostato en inalámbrico, además, aumenta la resistencia de 5A a 12A (Amperios). • Momit Home Thermostat adicional (79,00 €): Termostato adicional que permite priorizar la temperatura en distintas habitaciones a diferentes horas. 	
FICHA TÉCNICA	Enlace	

Tabla 8.3. Ficha técnica del termostato Tado. Fuente: Elaboración propia.

NOMBRE DEL TERMOSTATO	Termostato inteligente tado° – Kit de inicio (Tado°)	
DESCRIPCIÓN DEL TERMOSTATO	<p>Termostato inteligente que se encarga de gestionar la temperatura en casa en base al horario, a la presencia de personas en casa y, también, a la temperatura exterior de la casa.</p> <p>Se puede controlar a través de un teléfono móvil o desde un ordenador con conexión a internet para seleccionar la temperatura de la casa de forma manual.</p>	
	<div style="text-align: center;">  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> <u>Termostato</u> <u>Bridge</u> </div>	
CARACTERÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Más control: muestra la temperatura de la casa, cuándo la calefacción está encendida y cuánto se está ahorrando. También permite controlar la calefacción desde cualquier sitio. • Geolocalización: utiliza la ubicación de los residentes para controlar la calefacción. Ahorra cuando nadie se encuentra en la casa y calienta tan pronto alguien esté en el camino de vuelta. • Informes: Los informes muestran la temperatura y los ahorros logrados con tado° a lo largo del día. • Predicción meteorológica: utiliza el tiempo para calentar la casa de la manera más eficiente. • Fácil de Instalar: Sencillo de instalar, intuitivo y ajusta la calefacción al estilo de vida de manera automática. • Mensajes de error de calefacción: informa si existen problemas con el sistema de calefacción y ofrece ayuda directa y consejos. • Características del edificio: Cada vivienda es única y diferente, por eso tado° estudia el edificio y aprende a calentar la casa de la manera más eficiente. • Uso flexible: tado° se adapta a las necesidades, control automático de la calefacción, programaciones o control manual. • Compatibilidad: funciona con el 95 % de los sistemas de calefacción. • Función anti-congelación. 	
ESPECIFICACIONES	Temperatura (medición):	
	Temperatura (ajuste):	Rango de ajuste: 5 °C a 25 °C Incremento: 0,1 °C

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

	Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato</u>: 4,5 V DC (3xAAA pilas 1200 mA/h) • <u>Bridge</u>: 5 V (USB).
	Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato</u>: 104 x 104 x 19 mm. • <u>Bridge</u>: 89 x 52,5 x 25,5 mm.
APLICACIÓN (App)	La App del termostato está disponible en el App Store, Google Play Store y Windows Store.	
INSTALACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato de ambiente cableado</u>: se reemplaza el antiguo termostato cableado por el termostato tado°, y se conecta el Bridge al router. • <u>Termostato de ambiente inalámbrico</u> (es necesario el Kit de Extensión): el dispositivo de extensión se conecta a la caldera, lo que permite que el termostato sea inalámbrico. 	
PRECIO	249,00 €	
ELEMENTOS ADICIONALES	<ul style="list-style-type: none"> • Kit de extensión kit (99,00 €): Permite controlar el agua caliente sanitaria. Además, es necesario para conectar el Termostato Inteligente tado° al sistema de calefacción, en caso de no existir un termostato de ambiente o si el termostato de ambiente existente es uno inalámbrico. El Kit de Extensión funciona como un receptor inalámbrico en el sistema de calefacción. • Termostato Inteligente Adicional (199,00 €): Control multizonas, utiliza Termostatos Inteligentes Adicionales para controlar individualmente varias zonas, incluido la calefacción por suelo radiante. • Válvula Termostática Inteligente (79,00 €): La Válvula Termostática Inteligente utiliza la ubicación de tu teléfono móvil para controlar los radiadores. Regula la temperatura cuando nadie se encuentra en la casa y comienza a precalentarla tan pronto detecta la primera persona. 	
FICHA TÉCNICA	Enlace	

Tabla 8.4. Ficha técnica del termostato Nest. Fuente: Elaboración propia.

NOMBRE DEL TERMOSTATO	Nest Learning Thermostat (Nest)	
DESCRIPCIÓN DEL TERMOSTATO	Termostato inteligente que permite un control responsable y eficiente del consumo energético de los sistemas de refrigeración y calefacción de los hogares	
	 <p style="text-align: center;"><u>Thermostato</u> <u>Heat Link</u></p>	
CARACTERÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Auto-Away: Apaga automáticamente cuando no se está en casa. • Mando a distancia: Cambia la temperatura desde el móvil, tableta o portátil. • Informes de Historia y Energía: Monitoriza la temperatura y el uso de energía y realiza un seguimiento mes a mes. • True Radiant: Activa el calor justo a tiempo para alcanzar la temperatura que desee, cuando lo desee. • Nest Sense: Mediante una combinación de sensores, algoritmos de aprendizaje y la computación en la nube es capaz de aprender del comportamiento y preferencias de las personas. De modo que, poco a poco dispone de más información que le permite funcionar de forma autónoma, sin que apenas se deba interactuar con él para que la temperatura de la vivienda sea óptima. • Pantalla: 24-bit color LCD, 480 x 480 resolución de 229 pixel por pulgada (PPI). • Compatibilidad: Nest Learning Thermostat funciona con el 95% de los sistemas de calefacción y refrigeración, incluyendo: gas, eléctrico, bomba de calor, suelo radiante, gasoil, solar, geotérmica. 	
ESPECIFICACIONES	Temperatura (medición):	Precisión: ± 0,5 °C
	Temperatura (ajuste):	Rango de ajuste: 4 °C a 32 °C Incremento: 0,5 °C

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

	Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato</u>: Batería de iones de litio recargable a través de 12 V micro USB o a través de 12 V conectado al relé. • <u>Relé</u>: CA 230 V 50 Hz
	Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Termostato</u>: $\phi 80,4 \times 30,8$ mm. • <u>Relé</u>: 83 x 83 x 22 mm.
APLICACIÓN (App)	La App del termostato está disponible en el App Store, Google Play Store, Windows Phone Store, Mac y PC.	
INSTALACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Se conecta el Heat Link al sistema de calefacción por medio de 2 hilos, es necesario conectarlo también a la corriente, a través de la caldera o a la red mediante enchufe. • El termostato se conecta a la corriente por medio del cable USB incluido, o mediante 2 cables al Heat Link que le proporcionan los 12 V que necesita. 	
PRECIO	249,00 €	
ELEMENTOS ADICIONALES	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte para termostato Nest Learning (130,00 €): Permite colocar el termostato sobre una base en lugar de sobre la pared. 	
FICHA TÉCNICA	Enlace	

B. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO

Para poder utilizar la Raspberry Pi, es necesario instalar el sistema operativo en ella. A través de la página web raspberrypi.org se puede escoger el sistema operativo que se desea instalar. Entre la variedad de posibilidades a instalar, se ha escogido Raspbian, que es el sistema operativo oficial.

Raspbian se puede instalar en la Raspberry Pi mediante una imagen que se descarga desde la página web antes mencionada, en la siguiente figura se pueden observar las características de la versión que se va a instalar.

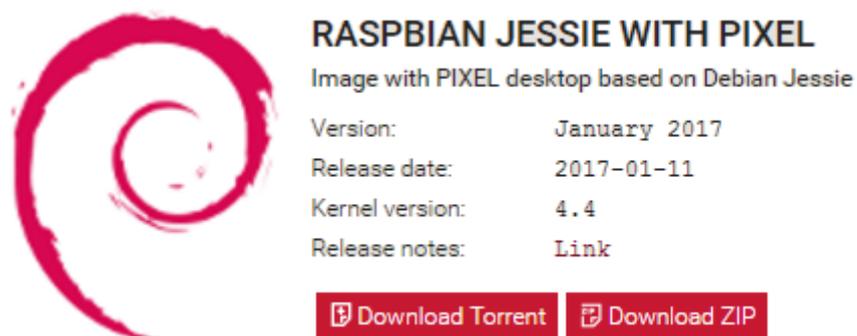


Figura 8.1. Descarga de la imagen del sistema operativo que se ha instalado en la Raspberry Pi. Fuente: Raspberrypi.org

Para poder instalarlo, es necesario utilizar el software Win32DiskImager, que se encarga de montar la imagen en una tarjeta microSD. Los pasos a seguir son muy sencillos, primero se selecciona la imagen del sistema operativo descargado anteriormente, a continuación, se selecciona la tarjeta donde se desea montar la imagen, por último, se presiona el botón Write, que monta la imagen en la microSD.

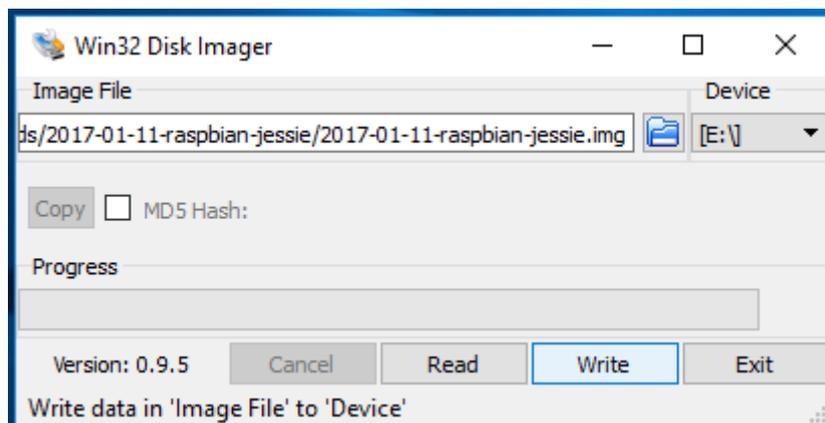


Figura 8.2. Software Win32DiskImager empleado para montar la imagen del sistema operativo en la microSD. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que ya se tiene el sistema operativo montado en la microSD, ésta se conecta en la Raspberry Pi y se enciende mediante su conexión a la red. Lo primero que se debe realizar, es el cambio de la contraseña del usuario por defecto, si no se desea crear uno nuevo, cambiar la configuración del teclado y ajustar la zona horaria. Para realizar estos cambios se va a utilizar la consola.

A continuación, se van a presentar los comandos utilizados en la consola para la puesta a punto de la Raspberry Pi.

1. Cambio de la contraseña, ajuste del teclado y de la zona horaria:

```
sudo raspi-config
```

En la ventana de herramientas que aparece en el apartado 2, se cambia la contraseña, en el 4, las opciones del teclado y se ajusta la zona horaria.

En el apartado 3, se cambian las opciones de arranque del sistema, que por seguridad se van a cambiar, ya que por defecto el sistema arrancaba sin pedir la contraseña del usuario. Otra de las opciones que se pueden cambiar, es el arranque en el escritorio o en la consola, por defecto, arranca en el escritorio, puesto que es más cómodo, se ha dejado así.

Por último, en el apartado 5, Interfacing Options, se activan las interfaces para las conexiones a través de SPI e I²C.

2. Se verifica el estado de la distribución, se realizan las actualizaciones necesarias y se asegura que todo funcione correctamente:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
sudo apt-get check
```

3. Se instalan los paquetes necesarios para el desarrollo.

- 3.1. usbmount y soporte para NTFS:

```
sudo apt-get install usbmount
sudo apt-get install ntfs-3g
```

Se configura la utilidad usbmount para que también pueda realizar el montaje automático de este tipo de particiones. Para ello se edita el archivo de configuración:

```
sudo nano /etc/usbmount/usbmount.conf
```

Se añade a la variable FILESYSTEMS el tipo NTFS.

```
FILESYSTEMS="vfat ext2 ext3 ext4 hfsplus ntfs"
```

Finalmente se completa la variable FS_MOUNTOPTIONS con las opciones de montaje y permisos para nuestro usuario.

```
FS_MOUNTOPTIONS="-fstype=vfat,gid=1001,dmask=0007,fmask=0117"
```

- 3.2. Instalación de pip y psutils para Python:

```
sudo apt-get install gcc python-dev python-pip
sudo pip install psutil
```

- 3.3. Instalación de las librerías para Python smbus y las utilidades de control del bus i2c:

```
sudo apt-get install python-smbus
sudo apt-get install i2c-tools
```

4. Instalación de los módulos adicionales de Python que permiten el manejo de los Relés, los Leds, el LCD, el conversor Analógico/Digital y el RTC.

4.1. Instalación de PiFace Digital 2:

```
sudo apt-get install python{,3}-pifacedigitalio
```

Comprobación del correcto funcionamiento del módulo, haciendo funcionar el programa `blink.py`, que hace parpadear un led en la placa:

```
sudo python3 /usr/share/doc/python3-pifacedigitalio/examples/blink.py
```

4.2. Instalación del Emulador de PiFace Digital 2:

```
sudo apt-get install python3-pifacedigital-emulator
```

Iniciar el emulador:

```
sudo pifacedigital-emulator
```

4.3. Instalación de PiFace Control & Display 2:

```
sudo apt-get install python{,3}-pifacecad
```

Comprobación del funcionamiento del módulo, haciendo funcionar el programa `sysinfo.py`, que muestra en el LCD la IP de la Raspberry Pi, la temperatura y el tanto por ciento de memoria utilizada:

```
sudo python3 /usr/share/doc/python3-pifacecad/examples/sysinfo.py
```

4.4. Instalación de PiFace Shim RTC:

```
wget https://raw.githubusercontent.com/piface/PiFace-Real-Time-Clock/master/install-piface-real-time-clock.sh && chmod +x install-piface-real-time-clock.sh && sudo ./install-piface-real-time-clock.sh
```

Los siguientes comandos hacen que el script descargado sea ejecutable al arrancar la Raspberry Pi:

```
chmod +x install-piface-real-time-clock.sh  
sudo ./install-piface-real-time-clock.sh
```

4.5. Instalación de ADC Pi Plus:

```
git clone  
https://github.com/abelectronicsuk/ABElectronics_Python_Libraries.git
```

C. SCRIPTS DESARROLLADOS

- Scripts Principales:
 - Camara.py

```
1. #!/usr/bin/env python3
2.
3. # Se importan las librerias y los scripts necesarios para poder
4. # ejecutar el codigo
5. import pifacedigitalio
6. from ABE_ADCPi import ADCPi
7. from ABE_helpers import ABEHelpers
8. import time
9. import os
10. from frio_calor import camara
11. from output_led import leds
12. from correo import correo
13. import csv
14. import sysinfo
15. from sysinfo import show_sysinfo
16. from math import sqrt
17. from backup import backup_stop, backup
18. from internet import net_is_up
19.
20. # Se activa el funcionamiento de PiFace Digital 2
21. # asignandoselo a una variable
22. pfd=pifacedigitalio.PiFaceDigital()
23.
24. # Se añade a dos variables el estado de las entradas 0 y 1
25. interruptor=pfd.input_pins[0].value
26. interruptor2=pfd.input_pins[1].value
27. encendido=True
28.
29. i2c_helper = ABEHelpers()
30. bus = i2c_helper.get_smbus()
31. adc = ADCPi(bus, 0x68, 0x69, 12)
32.
33. # Se obtiene la fecha del dia con la estructura: Año/Mes/Dia
34. date=time.strftime("%Y-%m-%d")
35.
36. # Se genera el nombre del archivo de datos con la ruta de
37. # guardado + la fecha del dia + .txt, y a continuación,
38. # se genera el archivo .txt
39. fileName="/home/pi/Camara_Termica/DATOS/" + date + ".txt"
40. txtfile=open(fileName, 'a')
41.
42. # Se añade el encabezamiento de cada columna en el archivo creado
43. txtfile.write('Dia;Hora;VoltajeADC1;VoltajeADC2;VoltajeREAL1;VoltajeREAL2;R1;R2;TaSinCalibrarSondaSUP;TaSinCalibrarSondaINF;TaSondaSUP;TaSondaINF;EstadoT1;EstadoT2;EstadoT3;EstadoT4;Calefaccion;Refrigeracion\n')
44.
45. # Se genera el nombre del archivo de datos con la ruta de
46. # guardado + la fecha del dia + .csv, y a continuación,
47. # se genera el archivo .csv
48. fileName2="/home/pi/Camara_Termica/DATOS/" + date + ".csv"
49. csvfile=open(fileName2, 'a')
50.
51. # Se añade el encabezamiento de cada columna en el archivo creado
```

```

52. csvfile.write('Dia;Hora;VoltajeADC1;VoltajeADC2;VoltajeREAL1;VoltajeREAL2;R1;R2;TaSinCalibrarSondaSUP;TaSinCalibrarSondaINF;TaSondaSUP;TaSondaINF;EstadoT1;EstadoT2;EstadoT3;EstadoT4;Calefaccion;Refrigeracion\n')
53.
54. # Se crean las siguientes variables que se
55. # utilizaran a lo largo del codigo
56. inicio='00:00'
57. mañana='08:00'
58. tarde='18:00'
59. noche='22:00'
60. A=3.9083E-3
61. B=-5.775E-7
62. R0=100
63. prev_cal=0
64. prev_ref=1
65. prev_term=0
66.
67. while encendido==True:
68.
69.     # Se lee el estado de las entradas 0 y 1 y se actualiza
70.     # el valor de las variables asignadas a estas entradas
71.     interruptor=pdf.input_pins[0].value
72.     interruptor2=pdf.input_pins[1].value
73.
74.     if interruptor==1:
75.
76.         # Se apaga la camara termica saliendo del bucle y copia los
77.         # archivos con los datos obtenidos en el USB
78.         encendido=False
79.         backup(date,fileName,0)
80.         backup(date,fileName2,1)
81.         txtfile.write('\n')
82.         csvfile.write('\n')
83.
84.     if interruptor2==1:
85.
86.         # Se para la camara termica y genera dos archivos con
87.         # los datos obtenidos hasta el momento en el USB
88.         pdf=pifacedigitalio.PiFaceDigital()
89.         backup_stop(date,fileName,0)
90.         backup_stop(date,fileName2,1)
91.         txtfile.write('\n')
92.         csvfile.write('\n')
93.
94.     if interruptor==0 and interruptor2==0:
95.
96.         # Se lee la fecha
97.         fecha=time.strftime("%d-%m-%Y")
98.
99.         # Se lee la hora de dos formas diferentes:
100.        hora=time.strftime("%H:%M") # Sin segundos
101.        hora2=time.strftime("%H:%M:%S") # Con segundos
102.
103.        if inicio==hora:
104.
105.            # Copia los archivos con los datos en el USB
106.            backup(date,fileName,0)
107.            backup(date,fileName2,1)
108.            txtfile.write('\n')
109.            csvfile.write('\n')

```

```
110.
111.         # Se genera un nuevo archivo llamado con la nueva
112.         # fecha.
113.         # Se lee la nueva fecha, y se la asignamos a dos
114.         # variables, añadiendoles la ruta de guardado +
115.         # .txt y .csv respectivamente
116.         date=time.strftime("%Y-%m-%d")
117.         fileName="/home/pi/Camara_Termica/DATOS/" + date
+ ".txt"
118.         fileName2="/home/pi/Camara_Termica/DATOS/" + date
+ ".csv"
119.
120.         # Se crean los dos nuevos archivos, y se añade el
121.         # encabezamiento de cada columna
122.         txtfile=open(fileName, 'a')
123.         txtfile.write('Dia;Hora;VoltajeADC1;VoltajeADC2;Volt
ajeREAL1;VoltajeREAL2;R1;R2;TaSinCalibrarSondaSUP;TaSinCalibrarS
ondaINF;TaSondaSUP;TaSondaINF;EstadoT1;EstadoT2;EstadoT3;EstadoT
4;Calefaccion;Refrigeracion\n')
124.         csvfile=open(fileName2, 'a')
125.         csvfile.write('Dia;Hora;VoltajeADC1;VoltajeADC2;Volt
ajeREAL1;VoltajeREAL2;R1;R2;TaSinCalibrarSondaSUP;TaSinCalibrarS
ondaINF;TaSondaSUP;TaSondaINF;EstadoT1;EstadoT2;EstadoT3;EstadoT
4;Calefaccion;Refrigeracion\n')
126.
127.         if tarde==hora or noche==hora or mañana==hora:
128.
129.         # Se comprueba si hay conexión a internet
130.         # Si hay conexión, el script devuelve 0
131.         xstatus=net_is_up()
132.
133.         if xstatus==0:
134.
135.         # Si hay conexión a internet, se envia un correo
136.         # todos los dias a las 08:00, 18:00 y 22:00 para
137.         # avisar que el sistema esta funcionando
138.         # correctamente
139.         correo(csvfile,fileName2,txtfile,fileName)
140.
141.         txtfile=open(fileName, 'a')
142.         csvfile=open(fileName2, 'a')
143.
144.         # Se lee el estado de los termostatos
145.         t1=pdf.input_pins[7].value
146.         t2=pdf.input_pins[6].value
147.         t3=pdf.input_pins[5].value
148.         t4=pdf.input_pins[4].value
149.
150.         # Se modifica el valor de output a 0 o 1 dependiendo
151.         # del valor de t1
152.         camara(t1)
153.         cal=pdf.output_pins[0].value
154.         ref=pdf.output_pins[1].value
155.
156.         # Se enciende el resto de leds dependiendo del
157.         # valor leído
158.         leds(2,t1)
159.         leds(3,t2)
160.         leds(4,t3)
161.         leds(5,t4)
162.
```

```

163.      # Se limpia la consola antes de empezar a obtener
164.      # los datos de la ADC Pi Plus
165.      os.system('clear')
166.
167.      # Se lee el voltaje de los canales 1 y 2 de la
168.      # ADC Pi Plus
169.      v1=adc.read_voltage(1)
170.      v2=adc.read_voltage(2)
171.
172.      # Se convierte el voltaje de los canales 1 y 2
173.      # a voltaje antes
174.      # del amplificador operacional
175.      V1=-0.0193*v1*v1+1.9926*v1-0.008
176.      V2=-0.0198*v2*v2+2.0042*v2-0.0049
177.
178.      # Se convierte el voltaje del transductor a
179.      # resistencia de las pt100
180.      R1=6E-7*V1**6-2E-5*V1**5+0.0003*V1**4-0.0017*V1**3+8E-
181.      5*V1**2+3.9106*V1+96.09
182.      R2=6E-7*V2**6-2E-5*V2**5+0.0003*V2**4-0.0017*V2**3+8E-
183.      5*V2**2+3.9106*V2+96.09
184.
185.      # Se convierte la resistencia de las pt 100
186.      # a temperatura
187.      temp1=((-(A*R0)+sqrt((A*R0)**2-4*B*R0*(R0-
188.      R1)))/(2*B*R0))
189.      temp2=((-(A*R0)+sqrt((A*R0)**2-4*B*R0*(R0-
190.      R2)))/(2*B*R0))
191.
192.      # Se aplica la calibracion a las temperaturas
193.      T1=0.9993*temp1-1.6238
194.      T2=0.9765*temp2-0.7586
195.
196.      # si el estado anterior de la calefaccion es
197.      # diferente al actual, se copia una linea con los
198.      # datos obtenidos en este momento, pero con el
199.      # estado anterior de la calefaccion, para que
200.      # sea mas sencillo realizar la grafica en Excel,
201.      # y a continuacion, se escriben los mismos datos
202.      # con el estado real de la calefaccion
203.      if prev_cal!=cal:
204.
205.          datos=str([fecha,hora2,v1,v2,V1,V2,R1,R2,temp1,temp2
206.          ,T1,T2,prev_term,t2,t3,t4,prev_cal,prev_ref])
207.          datos=datos.replace('"','')
208.          datos=datos.replace('[','')
209.          datos=datos.replace(']','')
210.          datos=datos.replace(',',';')
211.          datos=datos.replace('.',',')
212.          txtfile.write(datos + '\n')
213.          csvfile.write(datos + '\n')
214.
215.      # Se actualizan los valores para utilizarlos
216.      # en el siguiente bucle
217.      prev_cal=cal
218.      prev_ref=ref
219.      prev_term=t1
220.
221.      # Se agrupan todos los datos obtenidos y se cambian
222.      # o eliminan los caracteres innecesarios para facilitar
223.      # su importacion y tratamiento en excel

```

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AHORRO Y LA EFICIENCIA DE TERMOSTATOS INTELIGENTES

```
219.     datos=str([fecha,hora2,v1,v2,V1,V2,R1,R2,temp1,temp2,T1,
T2,t1,t2,t3,t4,cal,ref])
220.     datos=datos.replace("","'")
221.     datos=datos.replace('[','')
222.     datos=datos.replace(']','')
223.     datos=datos.replace(',',';')
224.     datos=datos.replace('.',',')
225.
226.     print (hora2,T1,T2,t1,t2,t3,t4,cal,ref)
227.
228.     # Se escriben los datos obtenidos en los
229.     # archivos del día
230.     txtfile.write(datos + '\n')
231.     csvfile.write(datos + '\n')
232.
233.     # Se genera un nuevo archivo que va a guardar
234.     # los últimos datos de temperatura de las sondas,
235.     # para utilizarlo con la pantalla LCD y mostrar
236.     # unicamente los datos mas recientes
237.     info=open('info.txt', 'w')
238.     info.write(str(T1)+'\n'+str(T2))
239.     info.close()
240.
241.     # Se cierran los archivos para guardar la información,
242.     # y a continuación se vuelven a abrir
243.     txtfile.close()
244.     csvfile.close()
245.     txtfile=open(fileName, 'a')
246.     csvfile=open(fileName2, 'a')
247.
248.     if T1>= 35 or T2>=35:
249.
250.         # Se apaga la camara termica si la temperatura es
251.         # superior a 35°C y copia los archivos con los datos
252.         # obtenidos en el USB
253.         encendido=False
254.         backup(date,fileName,0)
255.         backup(date,fileName2,1)
256.         txtfile.write('\n')
257.         csvfile.write('\n')
258.
259.         # Se espera 31 segundos y se repite el bucle de nuevo
260.         time.sleep (31)
261.
262.     # Se cierran los archivos .txt y .csv
263.     txtfile.close()
264.     csvfile.close()
265.
266.     # Se apaga la Camara Termica dejando las salidas a 0 (leds
267.     # apagados) y los relés en NC (Nevera y Manta apagados)
268.     pfd=pifacedigitalio.PiFaceDigital()
```

o pantalla_lcd.py

```
1.     #!/usr/bin/env python3
2.     import pifacecad
3.     import sysinfo
4.     import time
5.     from sysinfo import show_sysinfo
6.     from linea import linea
```

```

7.
8.     cad = pifacecad.PiFaceCAD()
9.
10.    quaver=pifacecad.LCDBitmap([14,31,14,31,14,31,14,0])
11.    cad.lcd.store_custom_bitmap(1, quaver)
12.    quaver=pifacecad.LCDBitmap([14,3,15,19,15,0,0,0])
13.    cad.lcd.store_custom_bitmap(2, quaver)
14.    quaver=pifacecad.LCDBitmap([12,18,18,12,0,0,0,0])
15.    cad.lcd.store_custom_bitmap(3, quaver)
16.    quaver=pifacecad.LCDBitmap([4,4,4,4,14,31,31,14])
17.    cad.lcd.store_custom_bitmap(4, quaver)
18.
19.
20.    lcd=1
21.
22.    while lcd==1:
23.
24.        b0=cad.switches[0].value
25.        b1=cad.switches[1].value
26.        b2=cad.switches[2].value
27.        b3=cad.switches[3].value
28.        b4=cad.switches[4].value
29.
30.        if b0==1 and b1==1 and b4==1:
31.
32.            lcd=0
33.
34.            if b0!=0 or b1!=0 or b2!=0 or b3!=0 or b4!=0:
35.
36.                d=linea()
37.                T1=d[0]
38.                T1=float(T1)
39.                T1='{0:.3f}'.format(T1)
40.                T1=str(T1)
41.
42.                T2=d[1]
43.                T2=float(T2)
44.                T2='{0:.3f}'.format(T2)
45.                T2=str(T2)
46.
47.
48.            if cad.switches[4].value==1:
49.
50.                print('Estado de la Raspberry Pi:\n -
Ip\n - Temperatura\n - Memoria Libre')
51.                cad.lcd.backlight_on()
52.                show_sysinfo()
53.                cad.lcd.blink_off()
54.                cad.lcd.cursor_off()
55.
56.            if cad.switches[1].value==1:
57.
58.                print('Temperatura de la sonda
Superior')
59.                cad.lcd.clear()
60.                cad.lcd.backlight_on()
61.                cad.lcd.write("T")
62.                cad.lcd.write_custom_bitmap(2)
63.                cad.lcd.write(" Sonda Sup.:\n")
64.                cad.lcd.write_custom_bitmap(4)
65.                cad.lcd.write(" ")

```

```
66.         cad.lcd.write(T1)
67.         cad.lcd.write_custom_bitmap(3)
68.         cad.lcd.write("C")
69.         cad.lcd.blink_off()
70.         cad.lcd.cursor_off()
71.
72.         if cad.switches[2].value==1:
73.
74.             print('Temperatura de la sonda
Inferior')
75.             cad.lcd.clear()
76.             cad.lcd.backlight_on()
77.             cad.lcd.write("T")
78.             cad.lcd.write_custom_bitmap(2)
79.             cad.lcd.write(" Sonda Inf.:\n")
80.             cad.lcd.write_custom_bitmap(4)
81.             cad.lcd.write(" ")
82.             cad.lcd.write(T2)
83.             cad.lcd.write_custom_bitmap(3)
84.             cad.lcd.write("C")
85.             cad.lcd.blink_off()
86.             cad.lcd.cursor_off()
87.
88.             if cad.switches[3].value==1:
89.
90.                 print('Temperaturas de la sondas')
91.                 cad.lcd.clear()
92.                 cad.lcd.backlight_on()
93.                 cad.lcd.write_custom_bitmap(4)
94.                 cad.lcd.write(" Sup.:")
95.                 cad.lcd.write(T1)
96.                 cad.lcd.write_custom_bitmap(3)
97.                 cad.lcd.write("C\n")
98.                 cad.lcd.write_custom_bitmap(4)
99.                 cad.lcd.write(" Inf.:")
100.                cad.lcd.write(T2)
101.                cad.lcd.write_custom_bitmap(3)
102.                cad.lcd.write("C")
103.                cad.lcd.blink_off()
104.                cad.lcd.cursor_off()
105.
106.                if cad.switches[0].value==1:
107.
108.                    print('Estado de la camara termica')
109.                    cad.lcd.clear()
110.                    cad.lcd.backlight_on()
111.                    cad.lcd.write(" Camara
Termica\n funcionando")
112.                    cad.lcd.blink_off()
113.                    cad.lcd.cursor_off()
114.
115.                    time.sleep (0.5)
116.
117. cad = pifacecad.PiFaceCAD()
```

- Scripts Secundarios:
 - Frio_calor.py

```
1. import pifacedigitalio
2.
```

```
3. pfd=pifacedigitalio.PiFaceDigital()
4.
5. def camara(t1):
6.     if t1==0:
7.         pfd.output_pins[0].value=0
8.         pfd.output_pins[1].value=1
9.
10.    else:
11.        pfd.output_pins[0].value=1
12.        pfd.output_pins[1].value=0
```

o correo.py

```
1. # Se importa la libreria smtplib
2. import smtplib
3.
4. # Se importa los modulos de email necesarios
5. from email.mime.text import MIMEText
6. from email.mime.base import MIMEBase
7. from email.mime.multipart import MIMEMultipart
8. from email import encoders
9.
10. me='*****@gmail.com'
11. you='*****@alumnos.unican.es'
12.
13. def correo(csvfile, fileName2, txtfile, fileName) :
14.
15.     csvfile.close()
16.
17.     m=MIMEMultipart()
18.     m['Subject'] = 'Archivos %s. Comprobación de que el sistema
funciona correctamente.' % fileName2
19.     # me == email emisor
20.     # you == email receptor
21.     m['From'] = me
22.     m['To'] = you
23.     body='Mensaje creado automaticamente, para comprobacion del
correcto funcionamiento del sistema\n\nUn saludo\n\nSergio
Bustamante\n'
24.     m.attach(MIMEText(body))
25.
26.     fp=open(fileName2, 'rb')
27.     msg1=MIMEBase('multipart', 'plain')
28.     msg1.set_payload(fp.read())
29.     fp.close()
30.
31.     fp2=open(fileName, 'rb')
32.     msg2=MIMEBase('multipart', 'plain')
33.     msg2.set_payload(fp2.read())
34.     fp2.close()
35.
36.     encoders.encode_base64(msg1)
37.     encoders.encode_base64(msg2)
38.     msg1.add_header('Content-
Disposition', 'attachment', filename=fileName2)
39.     msg2.add_header('Content-
Disposition', 'attachment', filename=fileName)
40.
41.     m.attach(msg1)
42.     m.attach(msg2)
```

```
43.
44.     # Envio del correo.
45.     s = smtplib.SMTP('smtp.gmail.com',587)
46.     s.ehlo()
47.     s.starttls()
48.     s.ehlo()
49.     s.login(me,"CONTRASEÑA")
50.     s.send_message(m)
51.     s.quit()
52.
53.     csvfile=open(fileName, 'a')
```

o backup.py

```
1.     import os
2.     import shutil
3.     import time
4.
5.     def backup_stop(date, fileName, n):
6.
7.         destino='/media/pi/SERGIO/DATOS/'
8.
9.         if n==0:
10.
11.             ext='.txt'
12.             shutil.copy2(fileName,destino + date + '_backup' + ext)
13.
14.         if n==1:
15.
16.             ext='.csv'
17.             shutil.copy2(fileName,destino + date + '_backup' + ext)
18.
19.
20.     def backup(date, fileName, n):
21.
22.         destino='/media/pi/SERGIO/DATOS/'
23.
24.         if n==0:
25.
26.             ext='.txt'
27.             shutil.copy2(fileName,destino + date + ext)
28.
29.         if n==1:
30.
31.             ext='.csv'
32.             shutil.copy2(fileName,destino + date + ext)
```

o internet.py

```
1.     #!/usr/local/bin/python
2.
3.     import subprocess, time
4.
5.     hosts = ('8.8.8.8', 'kernel.org', 'yahoo.com')
6.
7.     def ping(host):
8.         ret = subprocess.call(['ping', '-c', '3', '-W', '5', host],
9.             stdout=open('/dev/null', 'w'),
10.            stderr=open('/dev/null', 'w'))
```

```
11.     return ret == 0
12.
13.     def net_is_up():
14.         print ("Checking if network is up...")
15.
16.         xstatus = 1
17.
18.         for h in hosts:
19.             if ping(h):
20.                 print ("Network is up!")
21.                 xstatus = 0
22.                 break
23.
24.         if xstatus:
25.             print ("Network is down :(")
26.
27.         return xstatus
```

- línea.py

```
1.     def linea():
2.         txtfile=open('info.txt', 'r')
3.         T1=txtfile.readline().rstrip()
4.         T2=txtfile.readline().rstrip()
5.
6.         txtfile.close()
7.
8.         return T1,T2
```

- output_led.py

```
1.     import pifacedigitalio
2.
3.     pfd=pifacedigitalio.PiFaceDigital()
4.
5.     def leds(led,t):
6.         if t==0:
7.             pfd.output_pins[led].value=0
8.
9.         else:
10.            pfd.output_pins[led].value=1
```

D. INSTALACIÓN DEL SOFTWARE DE LA CÁMARA

Para la instalación del software desarrollado para controlar la cámara térmica, se efectúa la copia de todos los scripts en un directorio, el directorio escogido es /home/pi/.

A continuación, se añaden como servicios los scripts camara.py y pantalla_lcd.py, para que se ejecuten al arrancar la Raspberry Pi. Para ello, se crean dos ficheros de servicio, uno para cada uno, como el proceso es idéntico, se muestra el servicio creado para camara.py.

Para el servicio de camara.py, se genera el fichero camara.service:

```
sudo nano /lib/systemd/system/camara.service
```

Se crea el fichero con los datos del script que queremos ejecutar:

```
[Unit]
Description=Camara Termica
After=multi-user.target

[Service]
Type=simple
ExecStart=/usr/bin/python /home/pi/camara.py
Restart=on-abort

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

Se cambian los permisos al servicio y al script de destino y se procede a su activación:

```
sudo chmod 644 /lib/systemd/system/camara.service
sudo chmod +x /home/pi/camara.py
sudo systemctl enable camara.service
```

De esta manera, en el próximo arranque del sistema, el servicio ya estará disponible.

Para su verificación y control, se utiliza el comando:

```
sudo systemctl status|start|stop camara.service
```