



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

# CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE INCUBADORA DE NEONATOS PREMATUROS

AUTOR: JORGE LLÁCER GONZÁLEZ

TUTOR: ARNAU BAYÓN BARRACHINA

COTUTORA: MAR CAÑADA SORIANO

Curso Académico: 2018-19



## Resumen

En la actualidad, el número de neonatos prematuros nacidos en países en vías de desarrollo es muy elevado. Esto es debido sobre todo a la falta de nutrientes de la madre durante el periodo de gestación, por lo que disponer de suficientes incubadoras es algo fundamental para que los recién nacidos prematuros puedan sobrevivir y desarrollarse correctamente.

Sin embargo, las incubadoras comerciales tienen un precio demasiado excesivo así que los proyectos de incubadoras de bajo coste destinados a estos países con pocos recursos son una alternativa que puede salvar muchas vidas.

En este trabajo final de grado se ha realizado la caracterización experimental de un modelo de incubadora de neonatos prematuros de bajo coste y código abierto del proyecto In3ator. A lo largo de ella se ha ideado e implementado un sistema de medida que recoge los datos de temperatura y humedad relativa de 4 ensayos en diferentes condiciones para posteriormente, analizarlos y tratar de mejorar el diseño constructivo de la incubadora.



## Resum

En l'actualitat, el nombre de nounats prematurs nascuts a països en vies de desenvolupament és molt elevat. Això és degut sobretot a la manca de nutrients de la mare durant el període de gestació, de manera que disposar de prou incubadores és una cosa fonamental perquè els recent nascuts prematurs puguin sobreviure i desenvolupar-se correctament.

No obstant això, les incubadores comercials tenen un preu massa excessiu així que els projectes d'incubadores de baix cost destinats a aquests països amb pocs recursos són una alternativa que pot salvar moltes vides.

En aquest treball final de grau s'ha realitzat la caracterització experimental d'un model d'incubadora de nounats prematurs de baix cost i codi obert del projecte In3ator. Al llarg d'ella s'ha ideat i implementat un sistema de mesura que recull les dades de temperatura i humitat relativa de 4 assaigs en diferents condicions per a posteriorment, analitzar-los i tractar de millorar el disseny constructiu de la incubadora.



## Abstract

Nowadays, the number of premature infants born in developing countries is very high. This is mainly due to the lack of nutrients from the mother during the gestation period, so having enough incubators is essential for premature newborns to survive and develop properly.

However, commercial incubators are too expensive, so low cost incubator projects for these low-income countries are an alternative that can save many lives.

In this final grade work, it has been carried out the experimental characterization of a low cost premature infant incubator and open source model of the In3ator project. Throughout it, has been devised and implemented a measurement system that collects the temperature and relative humidity data of 4 tests under different conditions to finally analyze them and try to improve the constructive design of the incubator.

## Índice

1.	Introducción .....	1
1.1.	Objetivos .....	2
1.2.	Estructura del documento.....	2
2.	Estado del arte .....	3
2.1.	Incubadoras comerciales.....	3
2.2.	Incubadoras de bajo coste .....	3
2.2.1.	Lullaby Warmer Prime.....	3
2.2.2.	The Embrace.....	4
2.2.3.	NeoNurture .....	5
2.2.4.	Incubadora Hemel .....	5
2.2.5.	Incubadora humana .....	5
3.	Materiales y métodos .....	6
3.1.	Raspberry Pi 3 B+.....	6
3.2.	Sensor DHT11 .....	7
3.3.	Sensor DHT22 .....	8
3.4.	Breadboard y cables jumper .....	8
3.5.	Código.....	9
3.6.	Cámara termográfica Flir T1020.....	12
3.7.	Incubadora In3ator.....	14
3.8.	Ensayos.....	14
3.8.1.	Ensayo 1. Elección del sensor más adecuado para los ensayos.....	15
3.8.2.	Ensayo 2 .....	15
3.8.3.	Ensayos 3 y 4 .....	18
4.	Análisis de los resultados .....	21
4.1.	Análisis del ensayo 1 .....	21
4.2.	Análisis del ensayo 2 .....	23
4.3.	Análisis de los ensayos 3 y 4.....	26
5.	Conclusiones.....	40
6.	Trabajo futuro .....	41
7.	Bibliografía .....	42
8.	Presupuesto .....	43



## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Lullaby Warmer Prime.....	4
Ilustración 2. The Embrace.....	4
Ilustración 3. Raspberry Pi 3 B+.....	6
Ilustración 4. Sensor DHT11. ....	7
Ilustración 5. Sensor DHT22. ....	8
Ilustración 6. Cámara termográfica Flir T1020.....	13
Ilustración 7. Incubadora In3ator empleada en los ensayos. ....	14
Ilustración 8. Montaje del ensayo 1.....	15
Ilustración 10. Montaje del ensayo 2 (perfil). ....	16
Ilustración 9. Montaje del ensayo 2 (frontal).....	16
Ilustración 11. Esquema ensayo 2. Planta (medidas en milímetros). ....	17
Ilustración 12. Esquema ensayo 2. Alzado (medidas en milímetros).....	17
Ilustración 13. Montaje de los ensayos 3 y 4. ....	18
Ilustración 14. Esquema ensayos 3 y 4. Planta (medidas en milímetros). ....	19
Ilustración 15. Esquema ensayos 3 y 4. Alzado (medidas en milímetros). ....	19
Ilustración 16. Comparación de temperatura entre el sensor DHT11 y el DHT22. ....	21
Ilustración 17. Comparación de humedad relativa entre el sensor DHT11 y el DHT22.....	21
Ilustración 18. Temperatura de los sensores en el ensayo 2. ....	23
Ilustración 19. Humedad relativa de los sensores en el ensayo 2. ....	23
Ilustración 20. Situación inicial.....	24
Ilustración 21. Situación pasados 5 minutos (frontal). ....	24
Ilustración 22. Situación pasados 40 minutos (perfil izquierdo).....	25
Ilustración 23. Situación pasados 5 minutos (perfil izquierdo).....	25
Ilustración 24. Situación pasados 40 minutos (frontal). ....	25
Ilustración 25. Evolución de la temperatura en el ensayo 3.....	27
Ilustración 26. Evolución de la temperatura en el ensayo 4.....	27
Ilustración 27. Comparación de temperatura del sensor 1. ....	28
Ilustración 28. Comparación de humedad relativa del sensor 1.....	28
Ilustración 29. Comparación de temperatura del sensor 2. ....	29
Ilustración 30. Comparación de humedad relativa del sensor 2.....	29
Ilustración 31. Comparación de temperatura del sensor 3. ....	30
Ilustración 32. Comparación de humedad relativa del sensor 3.....	30
Ilustración 33. Comparación de temperatura del sensor 4. ....	31
Ilustración 34. Comparación de humedad relativa del sensor 4.....	31
Ilustración 35. Comparación de temperatura del sensor 5. ....	32
Ilustración 36. Comparación de humedad relativa del sensor 5.....	32
Ilustración 37. Comparación de temperatura del sensor 6. ....	33
Ilustración 38. Comparación de humedad relativa del sensor 6.....	33
Ilustración 39. Comparación de temperatura del sensor 7. ....	34
Ilustración 40. Comparación de humedad relativa del sensor 7.....	34
Ilustración 41. Situación inicial ensayo 3 (perfil izquierdo).....	35
Ilustración 42. Situación inicial ensayo 3 (frontal). ....	35
Ilustración 43. Situación ensayo 3 pasados 20 minutos (perfil izquierdo).....	36
Ilustración 44. Situación ensayo 3 pasados 20 minutos (frontal). ....	36
Ilustración 45. Situación ensayo 3 pasados 30 minutos (perfil izquierdo).....	36
Ilustración 46. Situación ensayo 3 pasados 30 minutos (frontal). ....	36

Ilustración 47. Situación ensayo 3 pasados 40 minutos (frontal). .....	36
Ilustración 48. Situación ensayo 3 pasados 40 minutos (perfil izquierdo).....	36
Ilustración 49. Situación ensayo 3 pasados 50 minutos (frontal). .....	37
Ilustración 50. Situación ensayo 3 pasados 50 minutos (perfil izquierdo).....	37
Ilustración 51. Situación inicial ensayo 4 (frontal). .....	37
Ilustración 52. Situación inicial ensayo 4 (perfil izquierdo).....	37
Ilustración 53. Situación ensayo 4 pasados 15 minutos (perfil izquierdo).....	37
Ilustración 54. Situación ensayo 4 pasados 15 minutos (frontal). .....	37
Ilustración 55. Situación ensayo 4 pasados 25 minutos (frontal). .....	38
Ilustración 56. Situación ensayo 4 pasados 25 minutos (perfil izquierdo).....	38
Ilustración 57. Situación ensayo 4 pasados 35 minutos (frontal). .....	38
Ilustración 58. Situación ensayo 4 pasados 35 minutos (perfil izquierdo).....	38
Ilustración 59. Situación ensayo 4 pasados 45 minutos (frontal). .....	38
Ilustración 60. Situación ensayo 4 pasados 45 minutos (perfil izquierdo).....	38

## 1. Introducción

Cada año nacen más de 20 millones de bebés prematuros o con bajo peso, y aproximadamente 450 de ellos mueren cada hora, aunque la mayoría de estas muertes podrían evitarse manteniendo únicamente el calor, por lo que la disponibilidad de incubadoras es fundamental en cualquier hospital del mundo.

A mediados del siglo XX, con la llegada de las incubadoras modernas, las cuales incorporaron terapia de oxigenación y demás avances científicos y médicos, la tasa de mortalidad infantil disminuyó un 75% entre 1950 y 1988. Desde entonces las incubadoras han continuado mejorando, incorporando sensores y materiales de alta calidad cada vez más sofisticados. Debido a la elevada precisión y fiabilidad de las incubadoras actuales su precio de venta es muy elevado, pudiendo alcanzar los 50000 €.

Los hospitales de los países del tercer mundo no pueden permitirse este tipo de aparatos para tratar a los neonatos prematuros por lo que suelen recibir incubadoras usadas o nuevas que son donadas por otros países más desarrollados. Sin embargo, esto presenta diversos inconvenientes, pues para que puedan ser usadas es necesario disponer de personal médico cualificado que las use correctamente. El coste de instruir nuevo personal para que maneje este tipo de dispositivos se estima que es aproximadamente 3500 € por persona. La otra alternativa sería enviar personal capacitado desde países del primer mundo, pero también resulta muy costoso y, además, crea relaciones de dependencia que agravan la falta de autosuficiencia económica, social, política, etc. de estos países.

A esto se suma que, en caso de avería, al ser incubadoras muy avanzadas tecnológicamente, repararlas es muy complejo debido a los conocimientos requeridos y a que los materiales y componentes necesarios son muy difíciles de conseguir.

Por último, está el problema del clima, el cual puede causar una reducción considerable de la vida de la incubadora a causa del polvo y la arena en el ambiente y de las elevadas variaciones de temperatura a lo largo del día, entre otros factores.

Por todos estos motivos, es muy importante investigar y desarrollar incubadoras de bajo coste que sean sencillas de utilizar y fáciles de construir y reparar con los materiales y herramientas locales.

Este es el objetivo que persigue el proyecto In3ator, un proyecto multidisciplinar donde se enmarca este trabajo y que surgió con la idea de poner fin a todos los problemas mencionados anteriormente. Consiste en el desarrollo de una incubadora de bajo coste y código abierto de forma que pueda ser fabricada de forma autónoma en zonas con pocos recursos a partir de los materiales que haya disponibles. Para ello, únicamente hay que descargar los planos y especificaciones que son distribuidos libremente.

## 1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo final de grado es la caracterización experimental de la incubadora In3ator realizando medidas de temperatura y humedad relativa. Dicho objetivo se divide en los siguientes:

- Diseñar e implementar un sistema de medida para efectuar la toma de datos de la incubadora y realizar de esta forma el posterior análisis de dichos parámetros.
- Realizar medidas de los parámetros que mejor caracterizan la incubadora en diferentes situaciones para poder observar cómo se distribuyen a lo largo del tiempo.
- Analizar los parámetros y con los resultados obtenidos proponer mejoras para el proceso de rediseño de la incubadora.

## 1.2. Estructura del documento

El presente documento se encuentra estructurado en 8 capítulos:

- El capítulo 1 sirve de introducción al problema existente de los neonatos prematuros en países tercermundistas y también se exponen los objetivos de este proyecto.
- En el capítulo 2 se repasa el estado del arte y se realiza un estudio de mercado de las incubadoras.
- En el capítulo 3 se describen todos los materiales empleados en esta caracterización experimental, así como una explicación detallada de los ensayos realizados en la misma.
- A lo largo del capítulo 4 se analizan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos por medio de gráficas e imágenes térmicas.
- El capítulo 5 sirve de conclusión del proyecto y en el capítulo 6 se propone una línea de trabajo futura.
- Por último, el capítulo 7 es una bibliografía en la que se citan todos los recursos consultados para la redacción de la memoria de este TFG y el capítulo 8 es un presupuesto del proyecto.

## 2. Estado del arte

Este capítulo consiste en una revisión del estado del arte y en un estudio de mercado de las incubadoras, diferenciando entre incubadoras comerciales destinadas a centros hospitalarios de alto poder adquisitivo e incubadoras de bajo coste enfocadas a lugares en los que es muy complicado acceder a esta tecnología.

### 2.1. Incubadoras comerciales

En la actualidad, gran parte de las empresas biomédicas desarrollan incubadoras destinadas a neonatos prematuros. Sin embargo, este tipo de incubadoras son muy caras puesto que van a ser empleadas en hospitales durante muchos años y tienen una precisión muy elevada (aproximadamente variaciones de 0,1 °C y 5% de humedad relativa). Es por esto que los precios de las incubadoras comerciales pueden llegar a alcanzar los 50000 €.

Debido al elevado precio inicial y al también elevado coste de reparación en caso de avería a causa del uso de materiales de alta calidad, solo son empleadas en países desarrollados.

### 2.2. Incubadoras de bajo coste

Debido a la importancia de que el recién nacido tenga una correcta temperatura, (sobre todo si se trata de un neonato prematuro pues estos, al tener muy poca grasa corporal, no pueden regular la temperatura por sí mismos) la mayor parte de las incubadoras de bajo coste se han centrado básicamente en mantener unos valores adecuados de temperatura y humedad dentro de ella. Al centrarse en lo fundamental, se ha reducido de forma considerable el precio de la incubadora.

A continuación, se analizan algunos de los proyectos más importantes de incubadoras de bajo coste hasta el momento.

#### 2.2.1. Lullaby Warmer Prime

Desarrollada en 2009 por GE Healthcare, cuesta 2700 € y consume un 60 % menos de energía que incubadoras tradicionales. Ha sido diseñada con advertencias y códigos de colores de forma que pueda ser usada por alguien que no sabe leer o habla otro idioma.

Se comenzó a usar sobre todo en India debido a que el 70 % de la población vive en áreas rurales sin acceso a hospitales o a equipo médico, pero actualmente esta incubadora se comercializa en más de 80 países. <sup>[1]</sup>

A pesar de todo, el precio de la incubadora sigue siendo demasiado elevado en comparación con otras incubadoras de bajo coste.



*Ilustración 1. Lullaby Warmer Prime.*

#### 2.2.2. The Embrace

No es una incubadora como tal, sino que se trata de un saco de dormir en el que se coloca al neonato para mantener el calor corporal. Consta de una bolsa térmica hecha de materiales de cambio de fase (PCM) la cual se retira cada 4 horas para volver a calentarla en agua hirviendo en un calentador portátil.

Fue diseñada por alumnos graduados de la universidad de Stanford y tiene un coste de producción de 180 €. <sup>[2]</sup>

Sin embargo, tiene unas capacidades muy limitadas debido a que no es posible regular la temperatura en función de las necesidades del recién nacido.



*Ilustración 2. The Embrace.*

### 2.2.3. NeoNurture

Desarrollada por la organización *Design that matters*, utiliza partes de coches en países en desarrollo para construirla. Emplea los faros como elemento emisor de calor, las luces de emergencia como alarmas y la batería y el mechero como almacenamiento de energía durante el transporte de la incubadora o cuando haya un corte de luz. <sup>[3]</sup>

### 2.2.4. Incubadora Hemel

Incubadora de bajo coste diseñada por el ginecólogo Oscar van Hemel y tiene un precio de venta de 325 €. Tiene capacidad de regulación de humedad, una proliferación de bacterias menor que en una incubadora convencional al no reutilizar el aire y además es muy sencilla de montar. La temperatura se puede regular encendiendo o apagando las bombillas incandescentes, las cuales son la única fuente de calor.

En los 4 años de vida de la organización se han producido unas 300 incubadoras, empleadas en países como Kenia, Tanzania, Filipinas o Camboya. <sup>[4]</sup>

### 2.2.5. Incubadora humana

A finales de la década de los 70 en Bogotá, Colombia, muchas mujeres pobres daban a luz, lo que llevó a una falta de recursos médicos. Tal fue la escasez de recursos que las incubadoras se tenían que compartir, llegando a haber hasta 3 recién nacidos en una misma incubadora.

Doctores del departamento de pediatría observaron que el objetivo principal de una incubadora es mantener al bebé prematuro caliente y oxigenado, simulando las condiciones del útero materno. Finalmente llegaron a la conclusión de un mecanismo similar el cual consistía en colocar al neonato sobre el pecho al descubierto de su madre.

La madre, al estar en contacto físico con su bebé, regula la temperatura de su pecho en función de lo que necesite el neonato, manteniéndolo a una temperatura adecuada en todo momento. Además, este método ayuda a que el recién nacido establezca su corazón y su frecuencia respiratoria al sentir los latidos y la respiración de su madre.

Sin embargo, la eficacia y fiabilidad de este método no está completamente probada (únicamente se ha comprobado su efectividad en ensayos controlados aleatorios) por lo que sólo es recomendable emplear este método cuando es la única opción. <sup>[5]</sup>

### 3. Materiales y métodos

En este capítulo se describen todos los elementos utilizados para realizar la presente caracterización experimental, así como los ensayos realizados en la misma.

#### 3.1. Raspberry Pi 3 B+

Una Raspberry Pi es un ordenador de bajo coste de placa reducida el cual ha sido desarrollado para fomentar la enseñanza de informática. El software es de código abierto y su sistema operativo oficial es una versión adaptada de Debian (S.O. basado en Linux), llamada Raspbian. [6] Es la encargada de tomar los datos de temperatura y humedad de la incubadora y almacenarlos en un archivo de texto para su posterior análisis.



Ilustración 3. Raspberry Pi 3 B+.

La Raspberry Pi 3 B+ tiene las siguientes especificaciones técnicas: [7]

- Procesador Cortex-A53 de cuatro núcleos que funciona a 1,4 GHz.
- 1 GB de memoria RAM.
- WiFi y Bluetooth 4.2.
- Almacenamiento por medio de tarjeta Micro-SD.
- 4 puertos USB 2.0.
- Conexiones HDMI y Ethernet.
- 40 pines GPIO (General Purpose Input/Output).
- Alimentación 5 V/2,5 A

Se decidió emplear una Raspberry para la realización de los ensayos por diferentes motivos, entre ellos: su bajo coste (35 € aproximadamente), su potencia más que suficiente para el propósito de este proyecto, por la posibilidad de utilización sin necesidad de tener conectado un monitor, teclado y ratón (modo *headless*), lo que facilita en gran medida la toma de datos dentro de la incubadora y sobre todo por los pines GPIO, los cuales permiten



conectar todo tipo de dispositivos de forma rudimentaria, evitando así tener que adquirir otros elementos con interfaz, lo que aumentaría sensiblemente su coste. Además, se elimina la dependencia del software del distribuidor el cual puede provocar problemas de compatibilidad debido al formato en el que se generan los datos al emplearlos en otro programa.

Para poder utilizar la Raspberry en modo *headless*, basta con permitir el acceso SSH y VNC. Una vez hecho esto, y habiéndole conectado una batería portátil, ya se puede controlar remotamente desde otro ordenador por medio del programa VNC Viewer introduciendo su IP.

### 3.2. Sensor DHT11

El sensor digital DHT11 presenta las siguientes especificaciones técnicas: <sup>[8]</sup>

- Rango de medida de temperatura: 0 – 50 °C.
- Rango de medida de humedad relativa: 20 – 90%.
- Precisión de la medida de temperatura: 1 °C.
- Precisión de la medida de humedad relativa: 1%.

Dicho sensor es el encargado de medir la temperatura y humedad relativa dentro de la incubadora. Para calcular la humedad y temperatura del aire, el sensor emplea dos micro sensores calibrados. Posteriormente se convierten los resultados a formato digital por medio de un chip que se encuentra en el propio sensor. Los sensores se conectan a los pines GPIO de la Raspberry por medio de cables puente.

El sensor consta de 3 pines: uno para conectarlo a tierra, otro para suministrarle la tensión necesaria y el último para transferir los datos del sensor a la Raspberry.

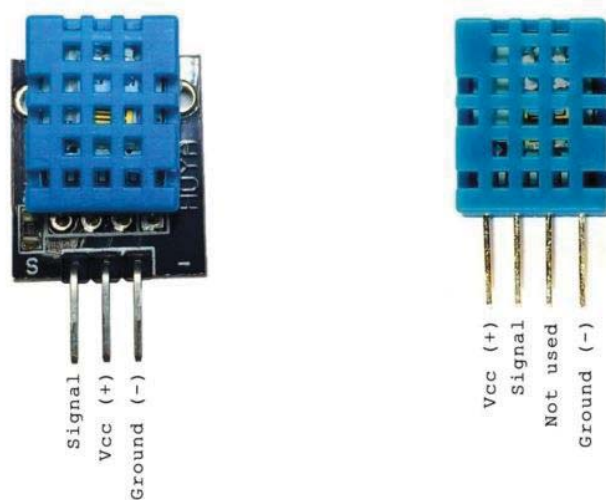


Ilustración 4. Sensor DHT11.

Este sensor es muy económico (tiene un precio de 0,89 €) y es de un tamaño relativamente reducido (15,5mm x 12mm x 5,5mm).

### 3.3. Sensor DHT22

El sensor de temperatura y humedad DHT22 funciona de la misma forma que el sensor DHT11 y al igual que este, está formado por 3 pines. Tiene las siguientes especificaciones técnicas: <sup>[9]</sup>

- Rango de medida de temperatura: -40 – 80 °C.
- Rango de medida de humedad relativa: 0 – 100%.
- Precisión de la medida de temperatura: 0,1 °C.
- Precisión de la medida de humedad relativa: 0,1%.

Este sensor tiene un precio más elevado que el del DHT11 (2,60 €) y un tamaño ligeramente superior (15,1mm x 25mm x 7,7mm del DHT22), pero tiene la ventaja de ser más preciso que este. En el primer ensayo se comparan ambos sensores para determinar cuál de ellos es el más adecuado para realizar los ensayos.

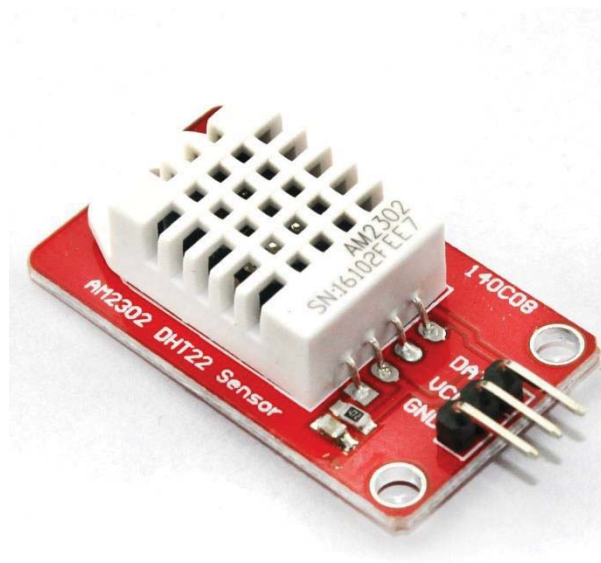


Ilustración 5. Sensor DHT22.

### 3.4. Breadboard y cables jumper

Debido a que la Raspberry sólo tiene 2 pines GPIO de 3,3 V, si se quiere conectar más de 2 sensores será necesario utilizar una placa de pruebas o *Breadboard*.

Una *breadboard* es una placa con orificios que están conectados eléctricamente entre sí por láminas de una aleación de cobre, estaño y fósforo en los cuales se insertan los cables

puente o *jumpers*. Para la realización de los ensayos se emplearon cables puente con terminales aislados macho – macho y hembra – hembra.

### 3.5. Código

Para la realización del código se empleó Python, un lenguaje de programación multiparadigma. Un lenguaje multiparadigma es aquel que permite programar de diferentes formas, en este caso permite la programación orientada a objetos, la programación funcional (con módulos y funciones) y la programación imperativa (con sentencias de bucle).

El código sirve para iniciar los sensores DHT11 y que estos comiencen a tomar datos y almacenar estos resultados en un archivo de texto, sólo si son válidos. Dicho código es el siguiente:

```
1. import RPi.GPIO as GPIO
2. import dht11
3. import time
4. import datetime
5. import matplotlib.pyplot as plt
6. import shutil
7. import os
8.
9.
10. # initialize GPIO:
11.
12. GPIO.setwarnings(False)
13. GPIO.setmode(GPIO.BCM)
14. GPIO.cleanup()
15.
16. # Sensor pin number(s):
17.
18. sensors=[18,23,25]
19. numberSensors=len(sensors)
20.
21. symbols = ['k-', 'r-', 'b-', 'g-']
22.
23. # create result directory:
24.
25. savePath = './results/'
26. if os.path.isdir(savePath):
27.     shutil.rmtree(savePath)
28. os.makedirs(savePath)
29.
30. # write results header:
```

```
31.
32. fileW = open(savePath + 'results_DHT11_T', 'w')
33. fileW.write("Time (s)   ")
34. for i in range(numberSensors):
35.     fileW.write("P. #" + str(i) + " (°C) ")
36. fileW.write("\n")
37. fileW.close()
38.
39. fileW = open(savePath + 'results_DHT11_HR', 'w')
40. fileW.write("Time (s)   ")
41. for i in range(numberSensors):
42.     fileW.write("P. #" + str(i) + " (%) ")
43. fileW.write("\n")
44. fileW.close()
45.
46. # create lists:
47. startTime = time.time()
48. timeLog = [[] for p in range(numberSensors)]
49. temperatureLog = [[] for p in range(numberSensors)]
50. humidityLog = [[] for p in range(numberSensors)]
51. instance = []
52.
53.
54. for i in range(numberSensors):
55.     instance.append(dht11.DHT11(pin=sensors[i]))
56.
57.
58. while True:
59.
60.     timeStep = time.time() - startTime
61.
62.     fileW = open(savePath + 'results_DHT11_T', 'a')
63.     fileW.write("%8.2f" % timeStep)
64.     fileW.close()
65.
66.     fileW = open(savePath + 'results_DHT11_HR', 'a')
67.     fileW.write("%8.2f" % timeStep)
68.     fileW.close()
69.
70.     for i in range(numberSensors):
71.         result = []
72.         result = instance[i].read()
73.         if result.is_valid():
74.             temperatureLog[i].append(result.temperature)
75.             humidityLog[i].append(result.humidity)
76.             timeLog[i].append(timeStep)
```

```

77.         print("* Sensor " + str(i) + ": t=" + str(round(timeLog[i][-1])) + "s,
           T=" + str(temperatureLog[i][-1]) + "°C, HR=" + str(humidityLog[i][-1]) + "%")
78.
79.         # Write (if result):
80.
81.         fileW = open(savePath + 'results_DHT11_T', 'a')
82.         fileW.write("%12.2f " % result.temperature)
83.         fileW.close()
84.
85.         fileW = open(savePath + 'results_DHT11_HR', 'a')
86.         fileW.write("%11.2f " % result.humidity)
87.         fileW.close()
88.
89.         # Plot:
90.         """
91.         plt.plot(timeLog[i], temperatureLog[i], symbols[i])
92.         plt.title("Probe DHT11")
93.         plt.xlabel("t (s)")
94.         plt.ylabel("T (°C)")
95.         plt.pause(0.01)
96.         plt.plot(timeLog[i], humidityLog[i], symbols[i])
97.         plt.title("Probe DHT11")
98.         plt.xlabel("t (s)")
99.         plt.ylabel("HR (%)")
100.        plt.pause(0.01)
101.        """
102.
103.        time.sleep(2)
104.
105.    else:
106.        # Write:
107.
108.        fileW = open(savePath + 'results_DHT11_T', 'a')
109.        fileW.write("    - ")
110.        fileW.close()
111.
112.        fileW = open(savePath + 'results_DHT11_HR', 'a')
113.        fileW.write("    - ")
114.        fileW.close()
115.
116.        fileW = open(savePath + 'results_DHT11_T', 'a')
117.        fileW.write("\n")
118.        fileW.close()
119.
120.        fileW = open(savePath + 'results_DHT11_HR', 'a')
121.        fileW.write("\n")
122.        fileW.close()

```

La línea 2 del código debe incluirse porque el módulo de estos sensores no está integrado en las versiones oficiales de Python, sino que las desarrollan los laboratorios que diseñan o comercializan los sensores, por lo que debe añadirse para que puedan ser utilizados.

Para cada nuevo ensayo, únicamente hay que cambiar la línea 18 en función del pin GPIO al que se encuentre conectado cada sensor.

### 3.6. Cámara termográfica Flir T1020

La termografía infrarroja es una técnica de ensayos no destructivos con la que se obtienen imágenes térmicas a partir de la radiación infrarroja emitida por un objeto. Como la radiación es una función de la temperatura de la superficie del objeto, la cámara puede calcular y visualizar esa temperatura. Esta técnica tiene como características principales:

- Técnica sin contacto. Lo que proporciona seguridad al operador pues en aplicaciones eléctricas, por ejemplo, las inspecciones han de hacerse en carga.
- No intrusiva. Por lo que no interfiere en la medida que se realiza sobre el objeto.
- Bidimensional. La imagen muestra únicamente la temperatura de la superficie del material.
- En tiempo real.

La termografía puede aplicarse de dos formas: cualitativa y cuantitativa. La termografía cualitativa se basa en el análisis de la imagen térmica para detectar y localizar defectos. Las temperaturas con las que trabaja son aparentes (medidas con emisividad (capacidad de un cuerpo para emitir radiación) = 1) por lo que no están compensadas. Normalmente se emplea para analizar patrones y determinar la existencia de anomalías. Por otro lado, en la termografía cuantitativa se realiza la compensación de los parámetros de emisividad, temperatura aparente reflejada, distancia, temperatura atmosférica y humedad relativa para obtener la temperatura del objeto de estudio con precisión. Para la realización de los ensayos de esta caracterización experimental, va aplicarse la termografía de forma cualitativa.

Para realizar las fotografías se empleó la cámara Flir T1020, la cual tiene las características siguientes: <sup>[10]</sup>

- Resolución: 1024 x 768 (número de píxeles en horizontal x número de píxeles en vertical).
- Precisión de la medida de temperatura: Indica el valor absoluto de error en la medida de temperatura para un cuerpo negro. Un cuerpo negro es un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación que recibe, independientemente de la dirección y de la longitud de onda. Su precisión es de  $\pm 1$  °C ó  $\pm 1\%$  a 25 °C para temperaturas entre 5 °C y 150 °C y de  $\pm 2$  °C ó  $\pm 2\%$  a 25 °C para temperaturas de hasta 1200 °C.
- Sensibilidad térmica o NETD: cuantifica la capacidad que posee la cámara para medir pequeñas diferencias de temperatura entre dos píxeles. Especifica la

cantidad de radiación necesaria para producir una señal de salida igual o mayor al ruido producido por el propio sistema. Su NETD es  $< 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (20mK).

- Rango espectral: indica la banda del espectro electromagnético para el que se ha diseñado el equipo. Su rango va de  $7,5$  a  $14 \text{ } \mu\text{m}$ .
- Rango de temperaturas: temperaturas máximas y mínimas que la cámara de infrarrojos es capaz de medir. Su rango va de  $-40$  a  $2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



*Ilustración 6. Cámara termográfica Flir T1020.*

La radiación saliente de un cuerpo tiene las siguientes componentes:

- Emisividad: capacidad de un cuerpo para emitir radiación.
- Reflectividad: capacidad de un cuerpo para reflejar radiación.
- Transmisividad: capacidad de un cuerpo para transmitir radiación.

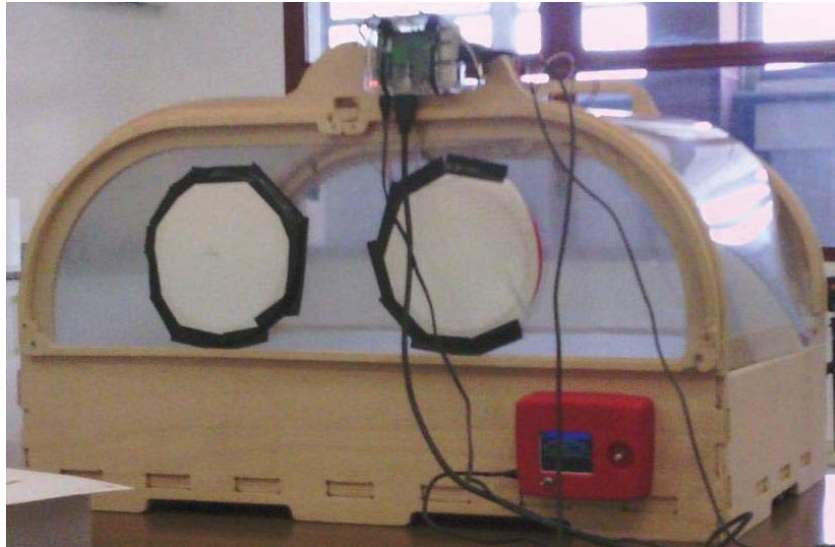
La radiación que llega a la cámara es la que sale por la superficie de las paredes de la incubadora.

Por último, mencionar que, aunque en el espectro visible las paredes de la incubadora son transparentes, en el espectro infrarrojo son opacas por la longitud de onda en la que trabaja la cámara.

La razón por la cual se decidió emplear una cámara termográfica fue para observar la distribución de la temperatura del aire en la superficie exterior de la incubadora y obtener de esta forma conclusiones más fiables que si únicamente se empleasen los sensores de temperatura, así como para facilitar la búsqueda de una mejora del diseño de la incubadora.

### 3.7. Incubadora In3ator

La incubadora empleada en la caracterización experimental es la siguiente:



*Ilustración 7. Incubadora In3ator empleada en los ensayos.*

La incubadora fue construida principalmente a partir de los siguientes elementos:

- Madera contrachapada.
- Plástico transparente y polietileno de alta densidad.
- Sensor de temperatura y humedad.
- Calefactor.
- Ventilador.
- Disipador.
- *Display*, con el cual se puede variar la temperatura del calefactor, la potencia del ventilador (en porcentaje) y fijar la temperatura objetivo.

Adicionalmente también se emplearon otros materiales para su construcción tales como: cables, tornillos, resistencias, diodos, condensadores, etc. Para la fabricación de algunas partes de la incubadora se han empleado diferentes tipos de procesos como: impresión 3D para algunas piezas de unión, mecanizado por control numérico para la estructura de la incubadora y las patas y moldeo para piezas con un diseño más complejo. El precio de la incubadora ronda los 200 €. <sup>[11]</sup>

### 3.8. Ensayos

Para la correcta caracterización de la incubadora se realizaron un total de 4 ensayos: un ensayo comparativo entre el sensor DHT11 y el DHT22 para determinar cuál de los dos es más apto para la realización del resto de ensayos y 3 ensayos sobre la incubadora en



diversas condiciones. A continuación, se va a explicar y a describir cada uno de ellos, sus objetivos y la forma en la que se realizó el montaje.

### 3.8.1. Ensayo 1. Elección del sensor más adecuado para los ensayos

Este ensayo tiene por objetivo elegir el sensor más adecuado para la realización del resto de ensayos. El montaje consta de un sensor DHT11 y un sensor DHT22 conectados por medio de cables puente a la Raspberry, la cual está conectada a una batería portátil y funcionando en modo *headless*.

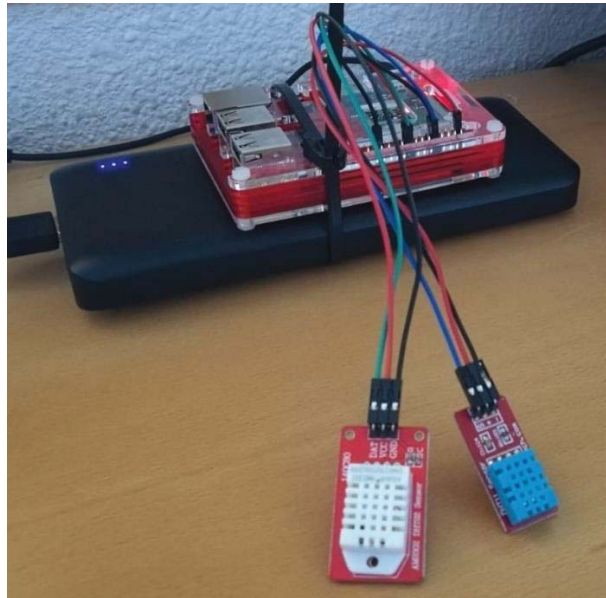


Ilustración 8. Montaje del ensayo 1.

Para la realización de este ensayo se comenzaron a tomar datos a temperatura ambiente y al cabo de unos minutos, se introdujeron los sensores en un frigorífico para comprobar de esta forma como reaccionaban a cambios bruscos de temperatura y observar como es la evolución de la temperatura de cada uno de ellos. Pasados unos minutos se extrajeron y se dejaron otra vez a temperatura ambiente.

La duración del ensayo fue de aproximadamente 24,5 minutos.

### 3.8.2. Ensayo 2

Para la realización del segundo ensayo, al ser la primera vez que se trabajaba con esta incubadora, se decidió emplear únicamente 5 sensores con el objetivo de sacar unas primeras conclusiones y conocer si existe la necesidad de realizar algún tipo de modificación para los otros 2 ensayos. En el *display* de la incubadora se seleccionó una

temperatura del calefactor de 70 °C, una potencia del ventilador del 70% y se eligió una temperatura objetivo de 37 °C porque es la temperatura a la que debe encontrarse un recién nacido (normalmente esta temperatura se sitúa entre los 35 y los 37,5 °C).

El montaje del ensayo es el siguiente:



*Ilustración 9. Montaje del ensayo 2 (frontal).*



*Ilustración 10. Montaje del ensayo 2 (perfil).*

Si se observa la Ilustración 9 izquierda, el calefactor se encuentra situado en la zona inferior de la incubadora, en la parte de la izquierda.

Los sensores se colocaron formando una cruz de la siguiente forma: uno en el centro de la incubadora (sensor 1), otro en la dirección longitudinal de la incubadora, en el sentido del calefactor y a 15 cm del sensor 1 (sensor 2), otro colocado a 15 cm del centro, en la misma dirección que el sensor 2, pero en sentido contrario (sensor 3), otro situado en la dirección transversal de la incubadora, en el sentido en el que se encuentran los orificios para introducir los brazos y a 10 cm del centro (sensor 4) y el último colocado también a 10 cm del centro y en la misma dirección que el sensor 4 pero en sentido opuesto (sensor 5).

Los sensores 1, 4 y 5 se encuentran colgando una longitud de 7,5 cm, mientras que los sensores 2 y 3 están colgando 3 cm.

## Caracterización experimental de un prototipo de incubadora de neonatos prematuros

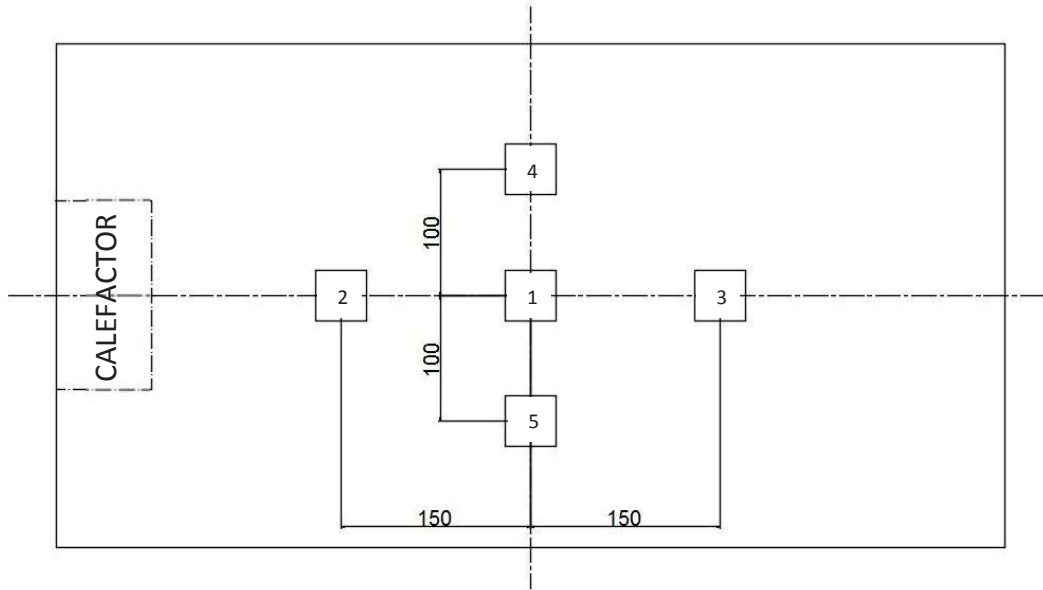


Ilustración 11. Esquema ensayo 2. Planta (medidas en milímetros).

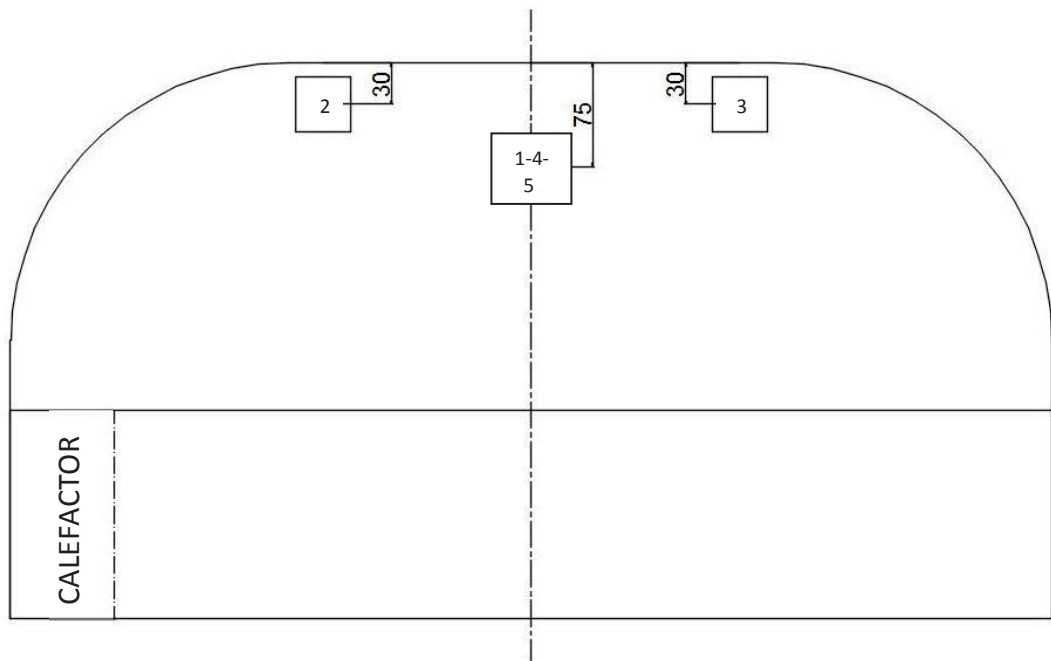


Ilustración 12. Esquema ensayo 2. Alzado (medidas en milímetros).

Una vez colocado todo el sistema de medición dio comienzo el ensayo, el cual duró aproximadamente 43 minutos.

### 3.8.3. Ensayos 3 y 4

El tercer ensayo consistió en tomar datos de los sensores de la misma forma que en el segundo ensayo, pero en una situación más cercana a la realidad al colocar una réplica de un bebé que se emplea en investigación por la similitud de sus propiedades físicas con las de un recién nacido (aunque el modelo es ligeramente superior al de un neonato prematuro). El modelo se colocó de forma que la cabeza del bebé se situase en la parte del calefactor. No se introdujo ninguna modificación en la incubadora con respecto al anterior ensayo.

El cuarto ensayo es igual al tercero, pero incluyendo un ventilador que funciona como recirculador de aire, centrado en la parte opuesta a donde se encuentra el calefactor, con el objetivo de comprobar si al añadir este elemento, el aire caliente se distribuye de una forma óptima dentro de la incubadora.

Además, para la realización de ambos ensayos se colocaron 7 sensores en lugar de 5 y se seleccionaron los mismos valores en el *display* que en el segundo ensayo (temperatura del calefactor de 70 °C, potencia del ventilador del 70% y temperatura objetivo de 37 °C).

El montaje empleado en ambos ensayos es el siguiente:

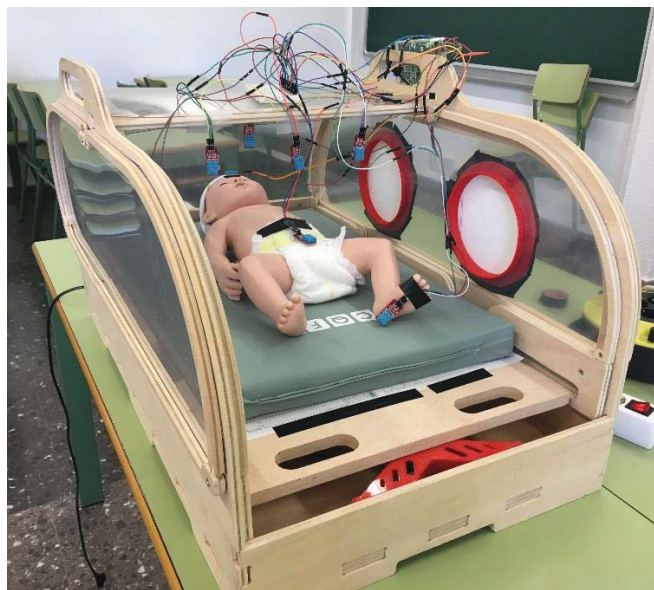


Ilustración 13. Montaje de los ensayos 3 y 4.

De los 7 sensores utilizados, 4 se han colocado en la parte superior de la incubadora y los otros 3 se han colocado sobre el modelo del recién nacido. La disposición de los sensores es la siguiente:

- Los sensores 1, 2, 4 y 5 del anterior ensayo se colocaron en las mismas posiciones y a la misma altura en estos 2 ensayos por lo que se llamaron de la misma forma. Por otro lado, el sensor 3 del anterior ensayo no se ha colocado en la misma posición

por 2 motivos: porque es un punto demasiado complejo para colocarlo correctamente al ser de difícil acceso, pues se encuentra situado en la parte de la incubadora que se retira para colocar al bebé y porque es de mayor utilidad conocer la temperatura en un punto del neonato que en uno que se encuentra a 10 cm por encima de él. En su lugar, el sensor 3 se ha colocado en la frente del bebé.

- Finalmente, se ha colocado un sensor en el abdomen del bebé (sensor 6) y el último se ha puesto en la planta de su pie izquierdo (sensor 7).

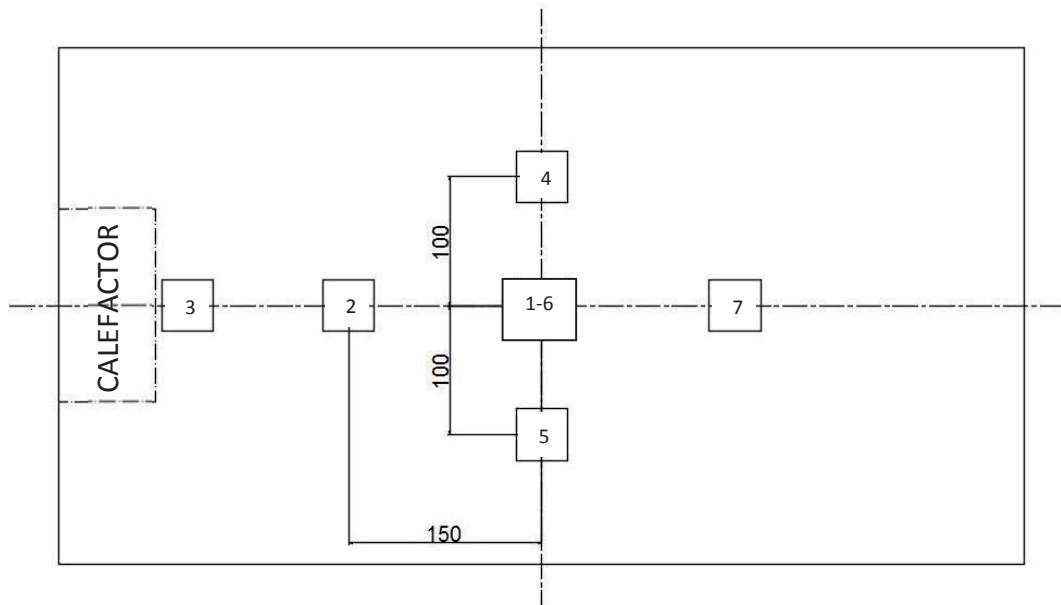


Ilustración 14. Esquema ensayos 3 y 4. Planta (medidas en milímetros).

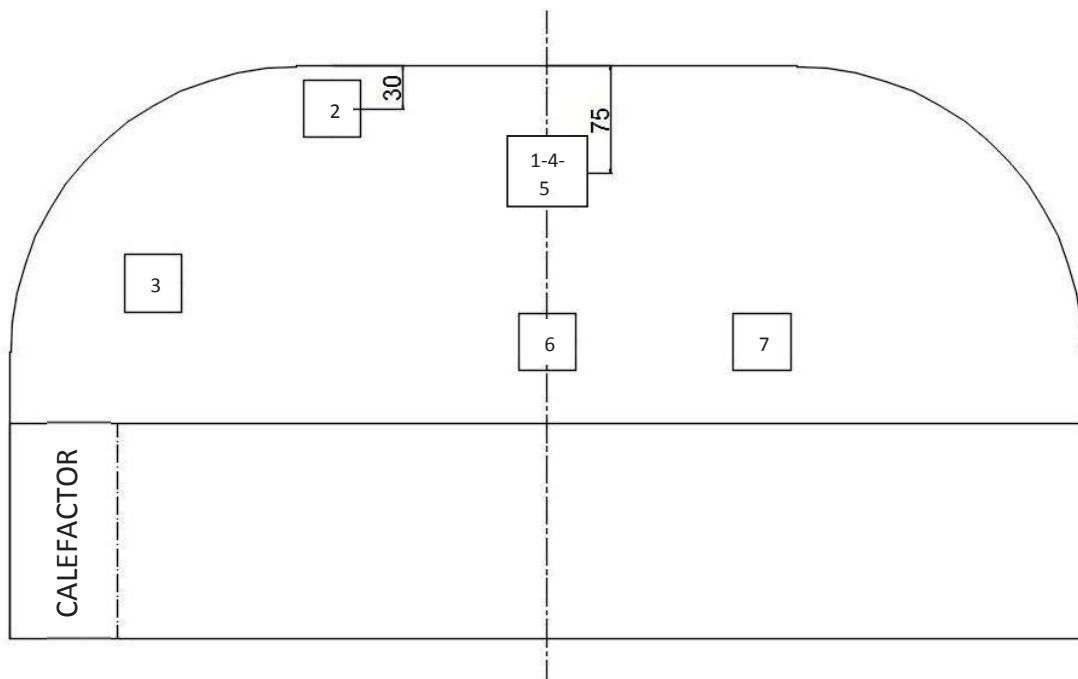


Ilustración 15. Esquema ensayos 3 y 4. Alzado (medidas en milímetros).

Caracterización experimental de un prototipo de incubadora de neonatos prematuros

La duración de ambos ensayos fue de 52 minutos.

## 4. Análisis de los resultados

A lo largo de este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos en los anteriores ensayos en forma de gráficas e imágenes obtenidas por la cámara termográfica y van a ser analizados para obtener de esta forma unas conclusiones que nos lleven a una mejora de la incubadora.

### 4.1. Análisis del ensayo 1

Los datos recogidos por los sensores se representaron en un gráfico de dispersión, obteniéndose las siguientes gráficas de temperatura y humedad relativa:

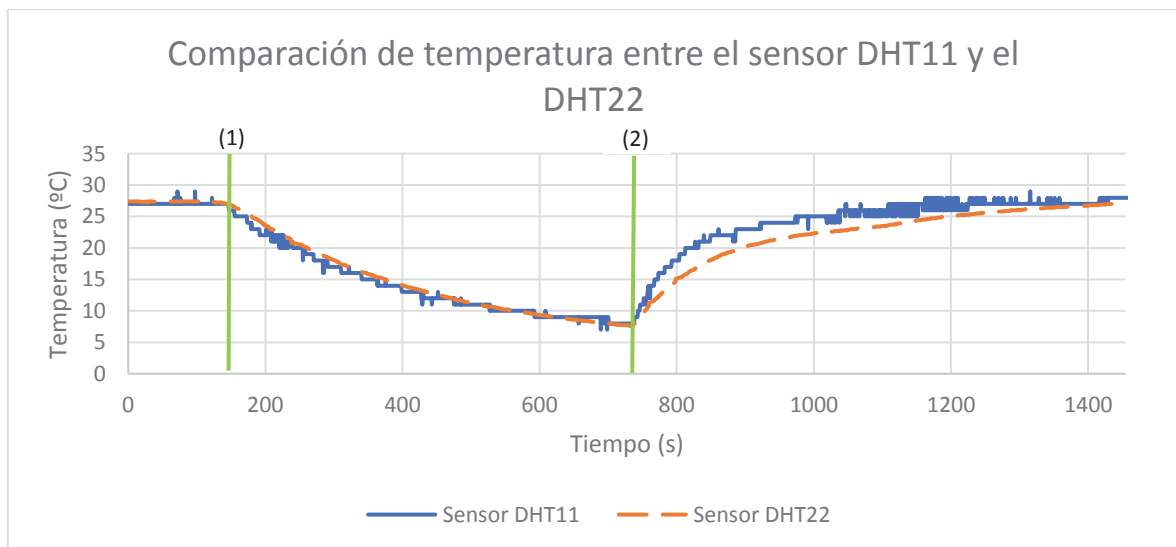


Ilustración 16. Comparación de temperatura entre el sensor DHT11 y el DHT22.

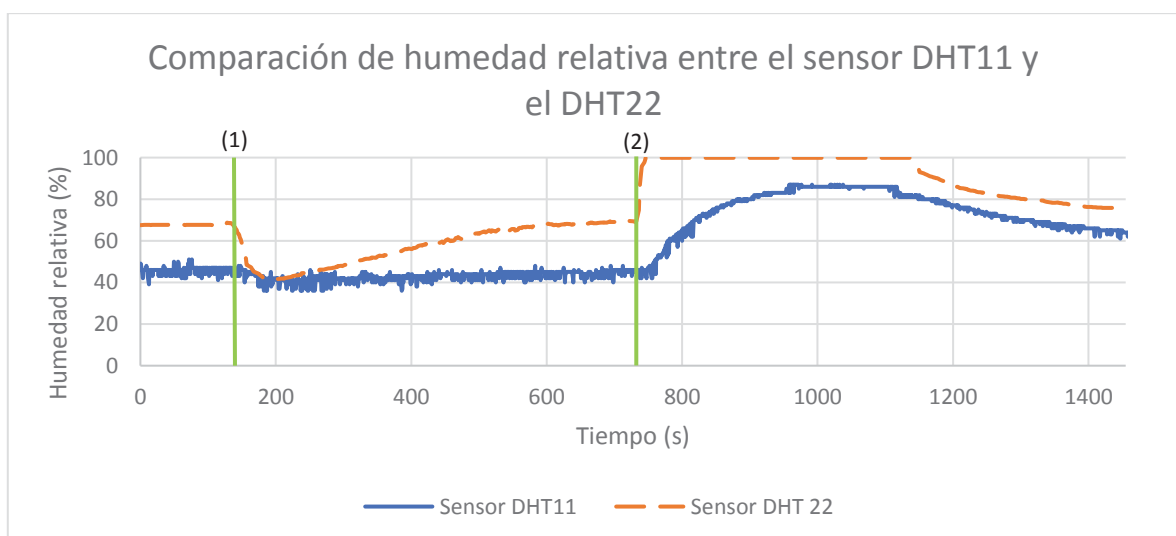


Ilustración 17. Comparación de humedad relativa entre el sensor DHT11 y el DHT22.

En la Ilustración 16 y en la 17, el número 1 indica la entrada de los sensores en el frigorífico, mientras que el 2 señala su salida del mismo.

A la vista de los resultados, se puede observar que la evolución de la temperatura es muy similar en ambos sensores durante casi todo el ensayo, sin embargo, en el momento en el que se extraen los sensores del frigorífico (en el segundo 740 aproximadamente), el sensor DHT11 tiene una inercia inferior, a pesar de tener una menor precisión, pues se ve que reacciona más rápidamente al cambio de temperatura y finalmente, alcanza la temperatura ambiente (27,5 °C) unos 200 segundos antes que el sensor DHT22.

Se aprecian diferencias bastante notables en las medidas de humedad relativa entre ambos sensores: antes y después de entrar al frigorífico la humedad era la misma y sin embargo los sensores registraron valores muy diferentes por lo que hay una falta de precisión evidente. También puede verse que el DHT22 es más sensible a los cambios de humedad, siendo estos captados de forma casi instantánea por el sensor. La diferencia de humedad en el momento en el que se sacan los sensores del frigorífico radica en que el sensor DHT11 mide humedades relativas del 90% como máximo, mientras que el DHT22 mide humedades de hasta el 100%.

A pesar de obtener resultados de la humedad relativa con los sensores, estos pasarán a tener una menor importancia debido a que la humedad relativa de la incubadora no se puede modificar, por lo que en los siguientes ensayos nos centraremos principalmente en observar cómo evoluciona la temperatura. Por tanto, la falta de precisión de los sensores existente al medir la humedad pasa a ser un problema secundario.

En algunos casos las medidas tomadas por el sensor DHT11 varían en  $\pm 1$  °C y en  $\pm 5\%$  de humedad de una medida a otra, mientras que este fenómeno no sucede con las medidas tomadas por el sensor DHT22, lo cual puede atribuirse a que el tiempo de recogida de datos es demasiado reducido, el cual se estableció en aproximadamente medio segundo.

Además, gracias a catálogos de incubadoras comerciales de empresas como General Electric o Dräger, se ha podido obtener un primer orden de magnitud de los rangos de valores de temperatura y humedad relativa entre los que puede variar el flujo de aire dentro de la incubadora para garantizar que la temperatura corporal del neonato prematuro sea la óptima para su desarrollo (esta temperatura suele estar comprendida entre los 35 y los 37,5 °C). La temperatura de estas incubadoras se puede controlar en un rango de valores de 20 a 39 °C en incrementos de 0,1 °C y la humedad relativa se puede modificar en un rango del 30 al 95% en incrementos del 5%.

A la vista de estos datos y de lo expuesto anteriormente, junto con el hecho de que el sensor DHT11 tiene un menor precio y un tamaño más reducido que el DHT22 y que en los siguientes ensayos se tomaron datos cada más tiempo (lo que provocó que las variaciones en los datos de una medida a otra se redujesen de manera significativa), hizo que se eligiera el sensor DHT11 para la realización de los 3 ensayos restantes.



#### 4.2. Análisis del ensayo 2

Una vez finalizado el ensayo, se representaron nuevamente los datos recogidos por los sensores en un gráfico de dispersión al igual que el ensayo anterior. Las gráficas obtenidas son las siguientes:

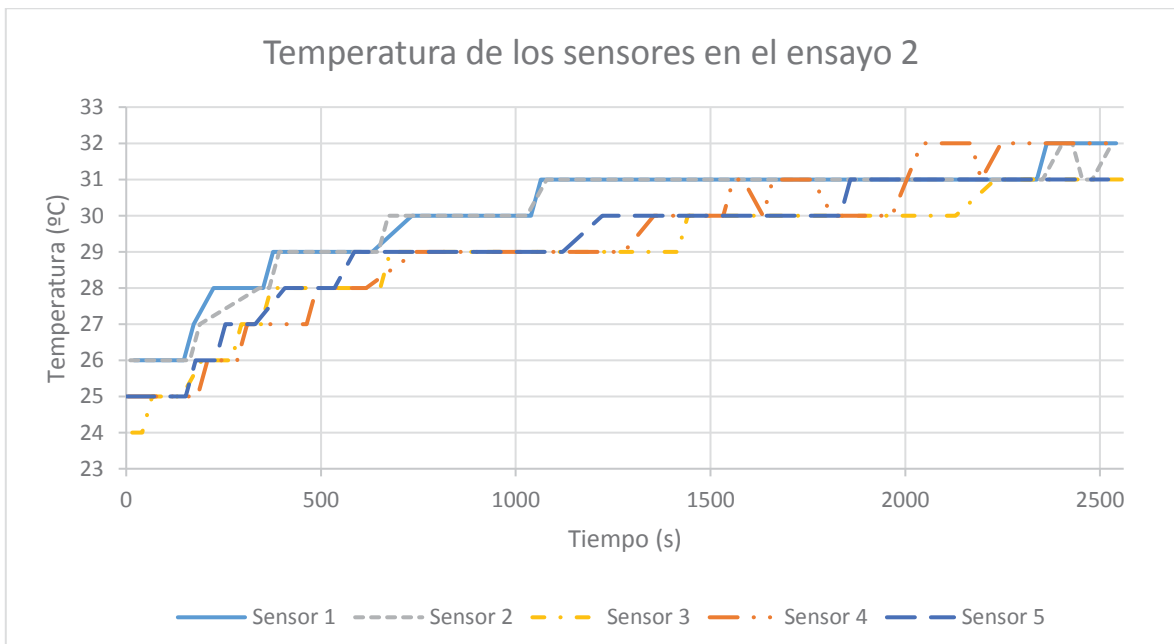


Ilustración 18. Temperatura de los sensores en el ensayo 2.

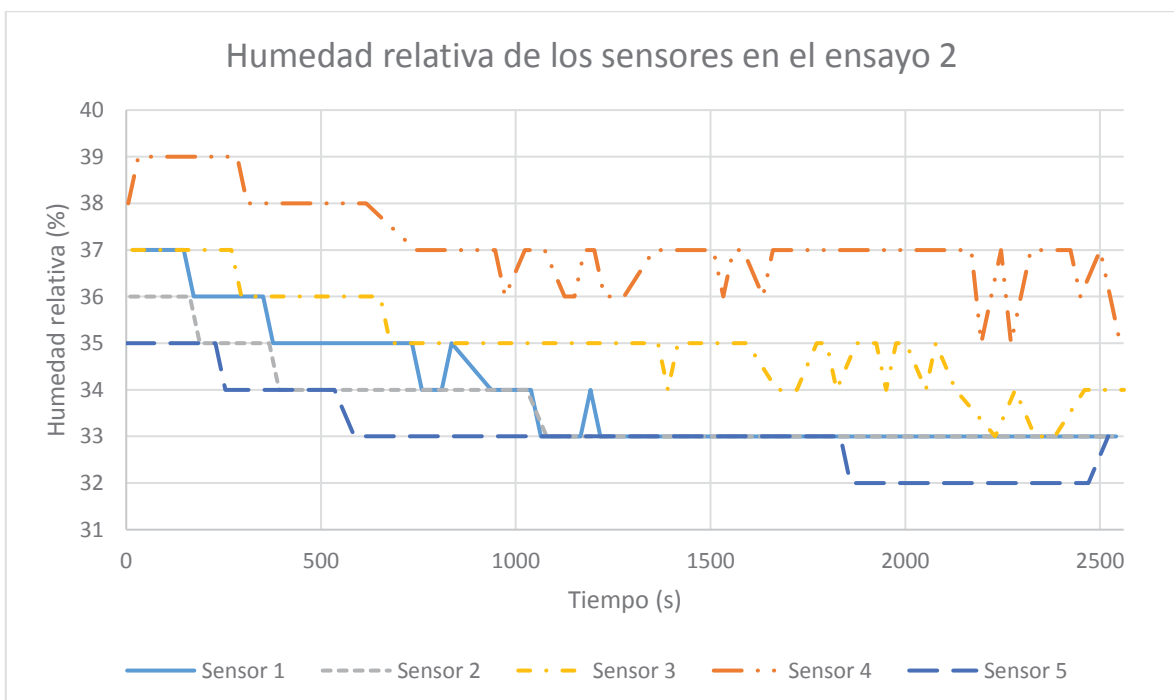


Ilustración 19. Humedad relativa de los sensores en el ensayo 2.

Observando la Ilustración 18 se puede ver lo siguiente:

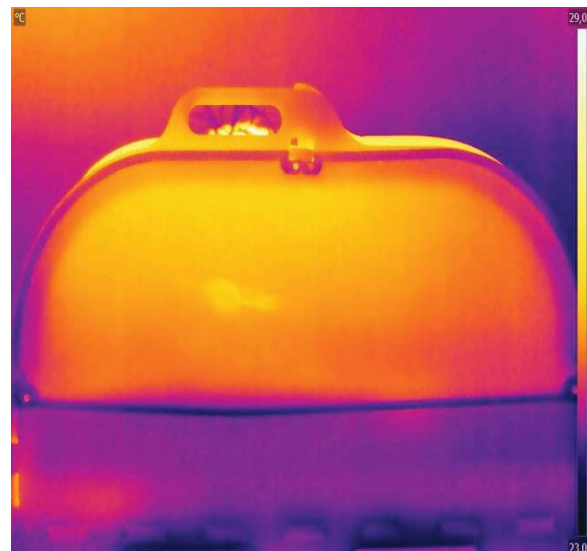
- El sensor 1 es el que tiene una temperatura mayor durante prácticamente todo el ensayo junto con el sensor 2. Esto se debe a que el sensor 2 se encuentra situado muy próximo al calefactor y a que el sensor 1 se encuentra en el centro de la incubadora y colgando más abajo que el sensor 2, por lo que no hay ningún elemento que obstaculice la llegada del flujo de calor.
- El sensor 3, al ser el que se encuentra más alejado del calefactor, es el que tiene una menor temperatura inicial y es el sensor que más tarda en aumentarla.
- Inicialmente, los sensores 4 y 5, al estar situados simétricamente respecto al centro de la incubadora, miden la misma temperatura. Sin embargo, a medida que va desarrollándose el ensayo, se observa que ambos sensores evolucionan de forma diferente y es al final del ensayo donde las diferencias son más notables. Finalmente, el sensor 4 acaba alcanzando una temperatura un grado superior a la del sensor 5 y es el que primero alcanza la máxima temperatura de todo el ensayo (32 °C), antes incluso que los sensores 1 y 2.

A partir de la Ilustración 19 se puede comprobar que conforme la temperatura va aumentando, la humedad relativa va decreciendo. Esto es debido a que cuando se incrementa la temperatura, el aire puede contener una mayor cantidad de vapor de agua.

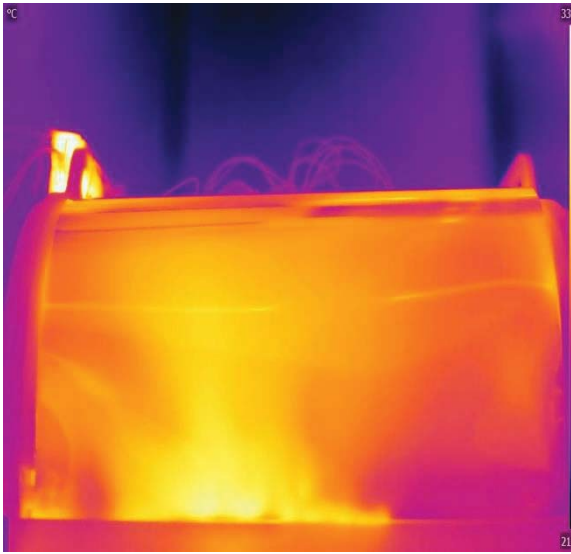
Adicionalmente, durante el ensayo se realizaron imágenes con la cámara termográfica que complementan la información aportada por las gráficas anteriores, además de ayudar a comprender como se comporta el aire dentro de la incubadora y conocer cuál es la distribución que sigue la temperatura en la superficie exterior de las paredes a lo largo del tiempo. Las imágenes más importantes son las siguientes:



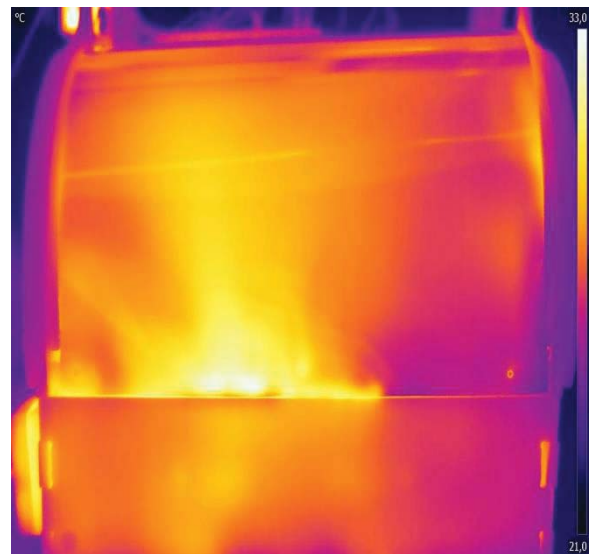
*Ilustración 20. Situación inicial.*



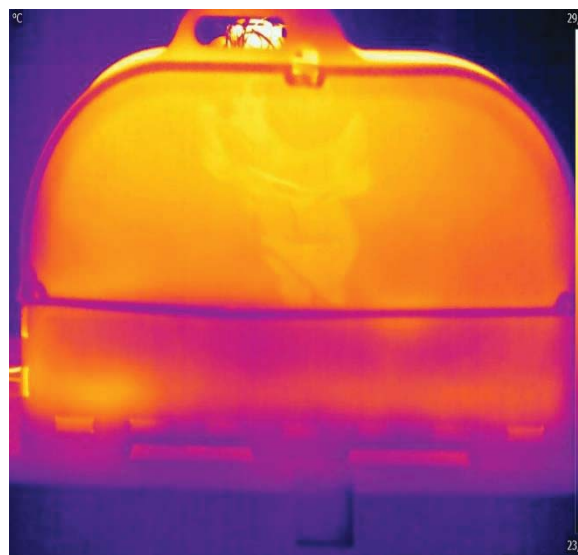
*Ilustración 21. Situación pasados 5 minutos (frontal).*



*Ilustración 23. Situación pasados 5 minutos (perfil izquierdo)*



*Ilustración 22. Situación pasados 40 minutos (perfil izquierdo).*



*Ilustración 24. Situación pasados 40 minutos (frontal).*

Gracias a las Ilustraciones 18 y 19 se puede confirmar que tal y como se intuía con la gráfica de temperatura, existe una clara falta de simetría puesto que el flujo de calor proveniente del calefactor se encuentra significativamente desplazado a la izquierda. Esto provoca que, tal y como puede verse en el lado derecho de la incubadora en dichas ilustraciones, no exista homogeneidad de temperatura dentro de la incubadora. Adicionalmente, se puede ver que la parte derecha de la incubadora en la Ilustración 23 en comparación con la misma parte en la Ilustración 22, la temperatura es menos uniforme, sobre todo en la parte superior derecha. Esto indica que conforme avanza el ensayo, la asimetría existente entre la parte izquierda y derecha de la incubadora es más acusada, lo que también puede observarse en la Ilustración 18.

En la Ilustración 24 se ve que las temperaturas en la parte superior de la incubadora son superiores a las que hay en la parte inferior debido a la forma curva que tiene la incubadora y al transporte advectivo, es decir, que el calefactor está colocado de forma que el aire caliente es expulsado hacia arriba. Además, como es lógico, la parte derecha de la incubadora es la que tiene las temperaturas más bajas debido a que es la parte más alejada del calefactor.

Aunque en las imágenes no se aprecia correctamente, la incubadora poseía diversas fugas en los laterales debido a que fue construida con medios modestos, motivo por el cual el aire caliente salía continuamente al exterior. Por esta razón, a pesar de haber establecido una temperatura objetivo de 37 °C en el *display* al inicio del ensayo, debido a esta falta de estanqueidad cada vez es necesario más tiempo para seguir aumentando la temperatura por lo que el tiempo que habría tardado en alcanzar dicha temperatura habría sido excesivo. Es por esto que el ensayo finalizó a los 43 minutos, habiéndose alcanzado una temperatura dentro de la incubadora de 32 °C en casi todos los puntos de la misma.

### 4.3. Análisis de los ensayos 3 y 4

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de los datos de los ensayos, mostrando primero 2 gráficas de todos los sensores a la vez separados por ensayo y posteriormente separadas por sensores, comparando los resultados de temperatura y humedad relativa con y sin ventilador:

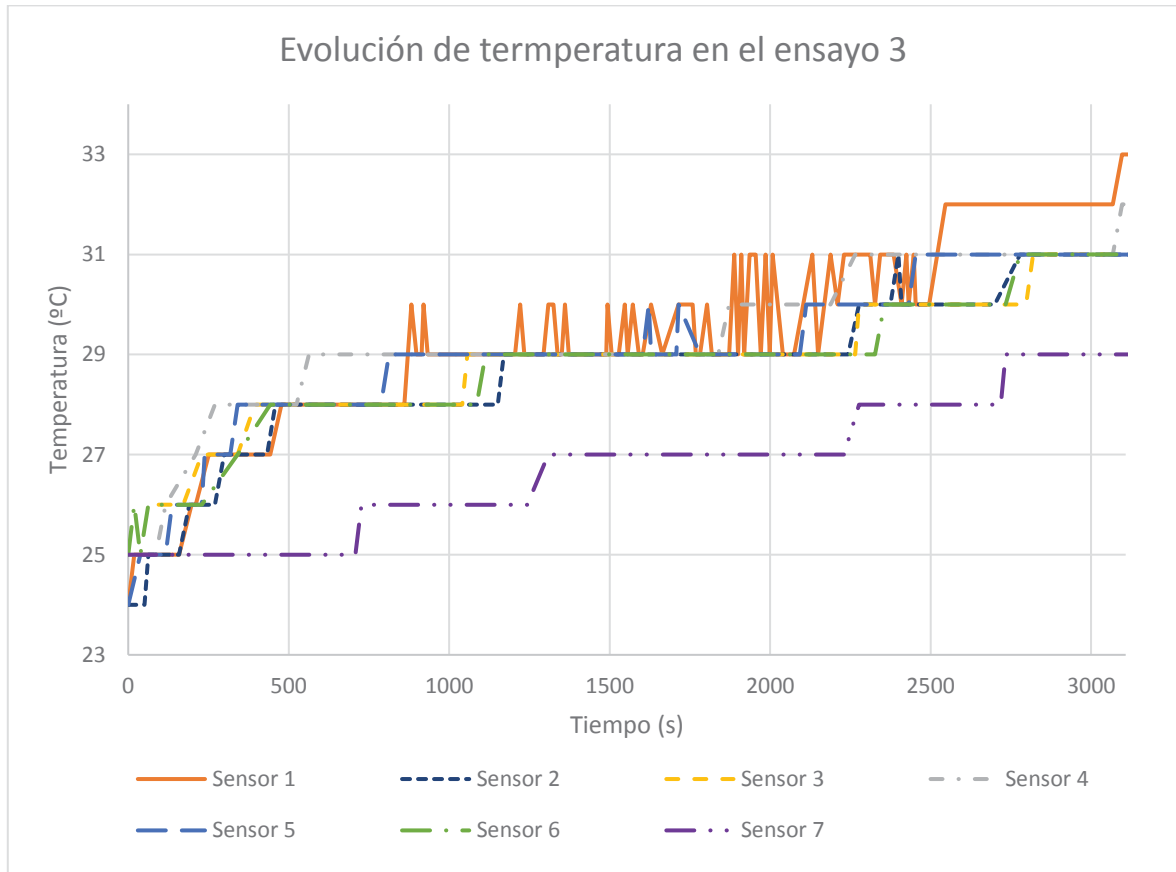


Ilustración 25. Evolución de la temperatura en el ensayo 3.

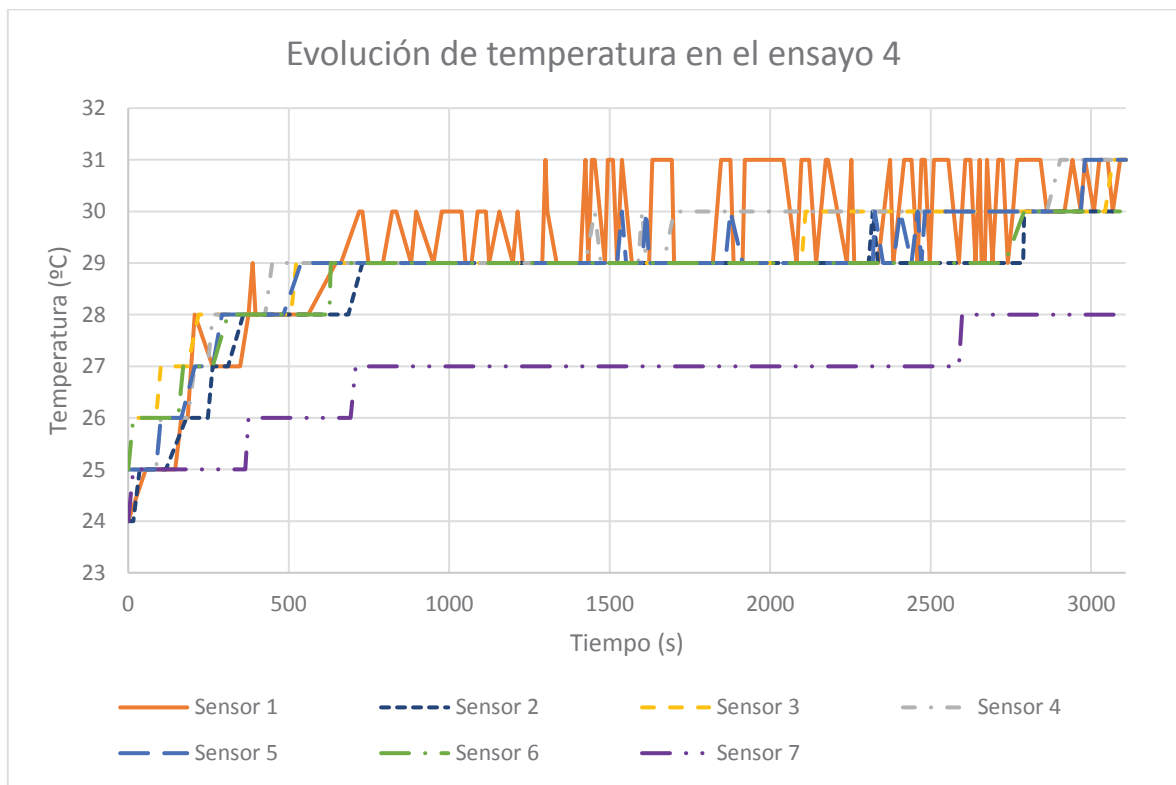


Ilustración 26. Evolución de la temperatura en el ensayo 4.

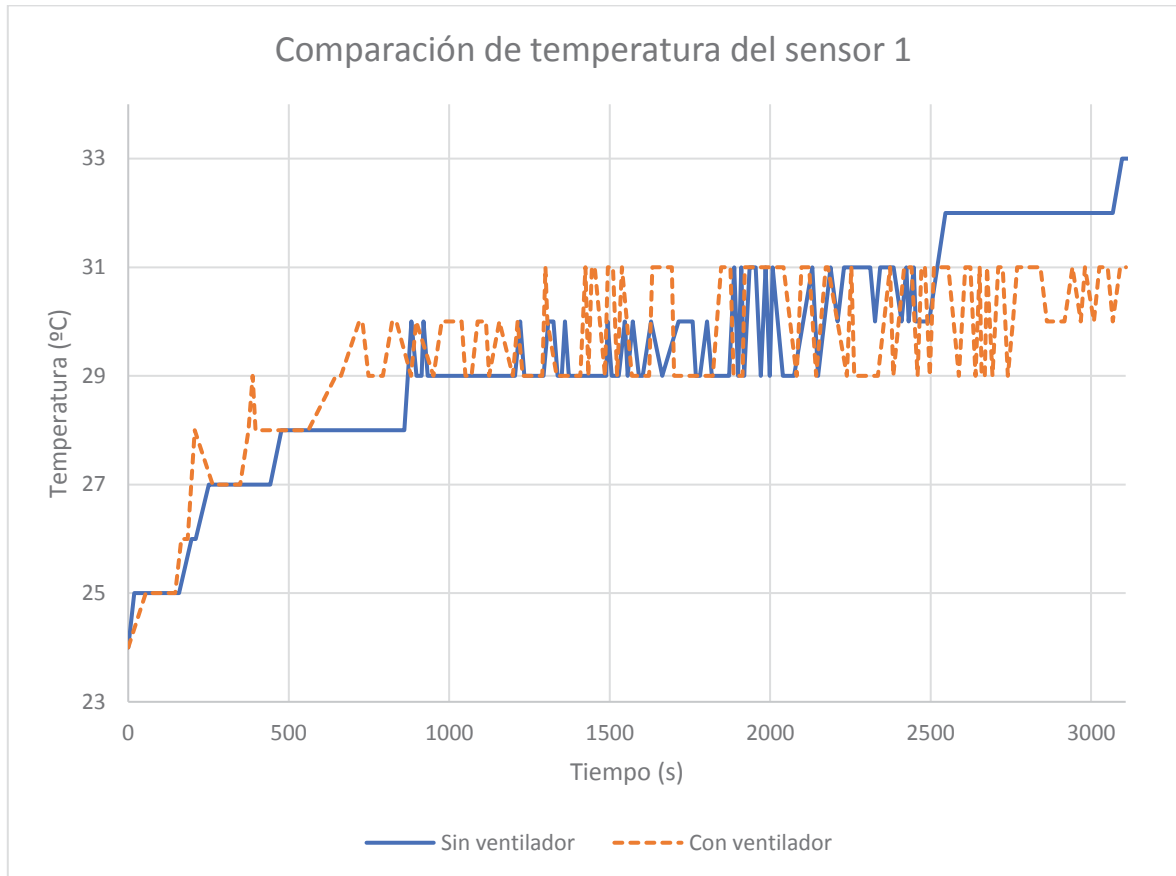


Ilustración 27. Comparación de temperatura del sensor 1.

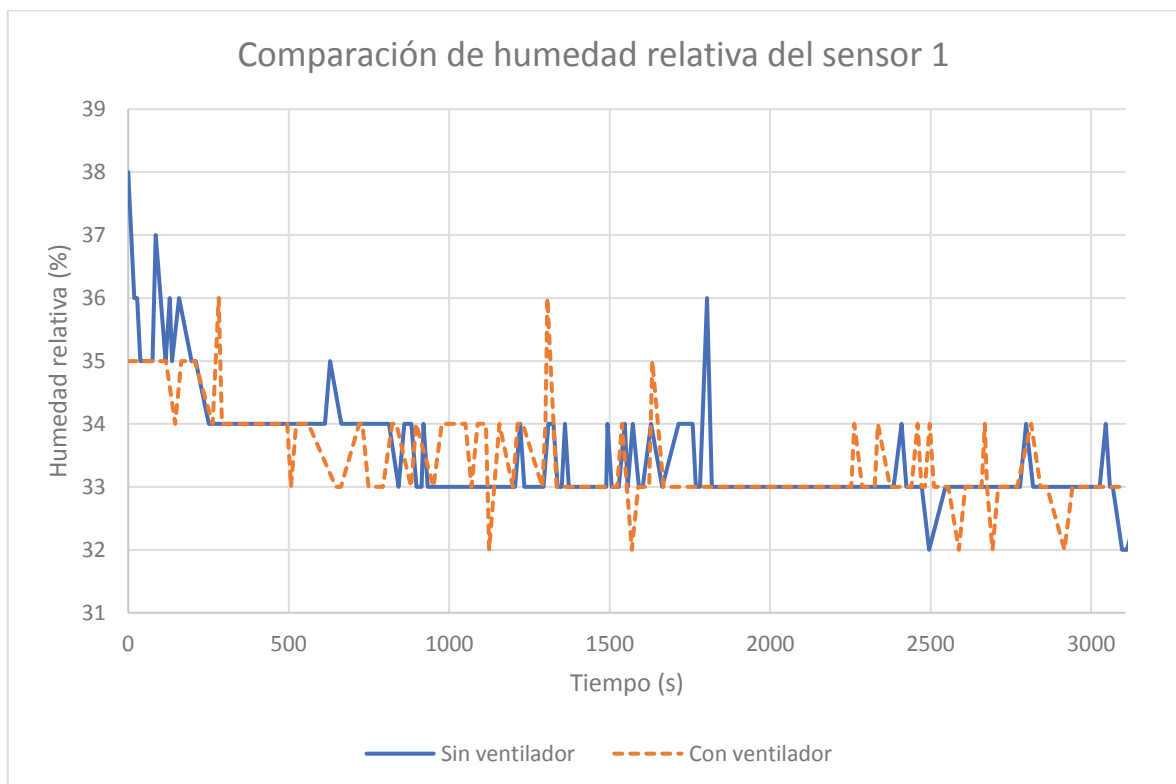


Ilustración 28. Comparación de humedad relativa del sensor 1.

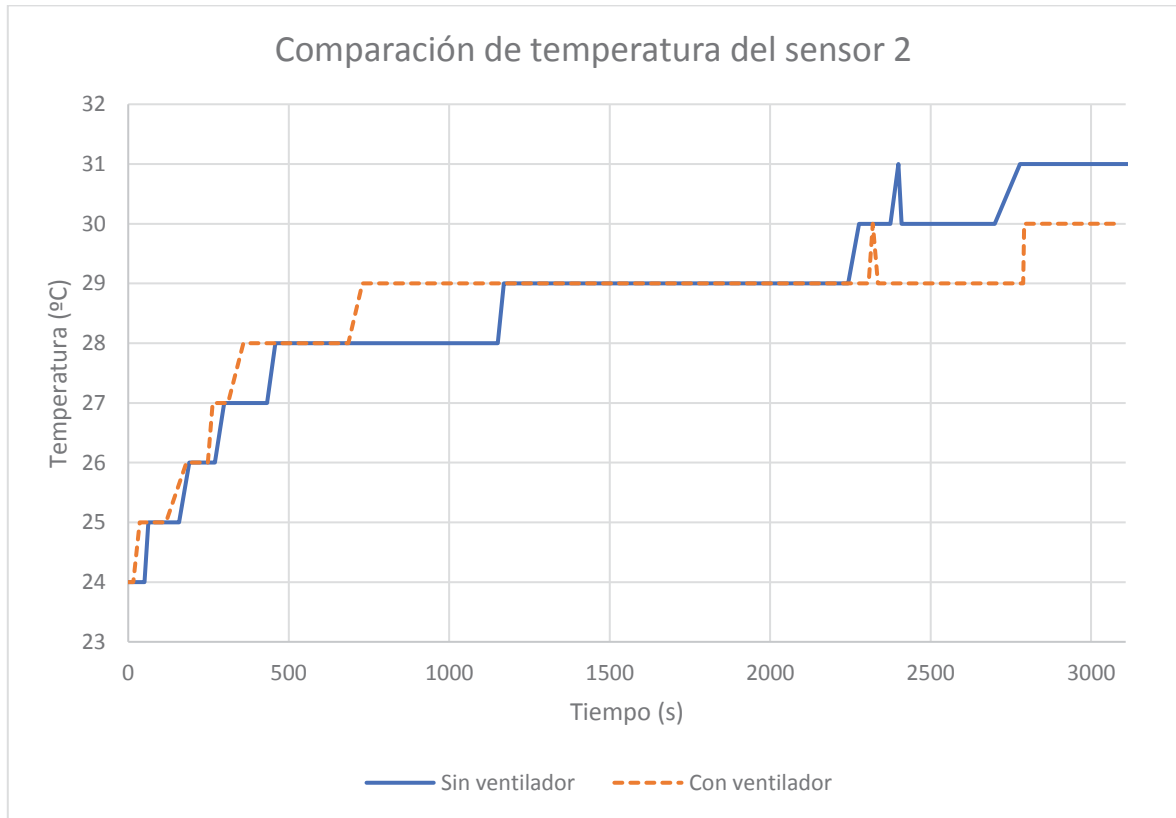


Ilustración 29. Comparación de temperatura del sensor 2.

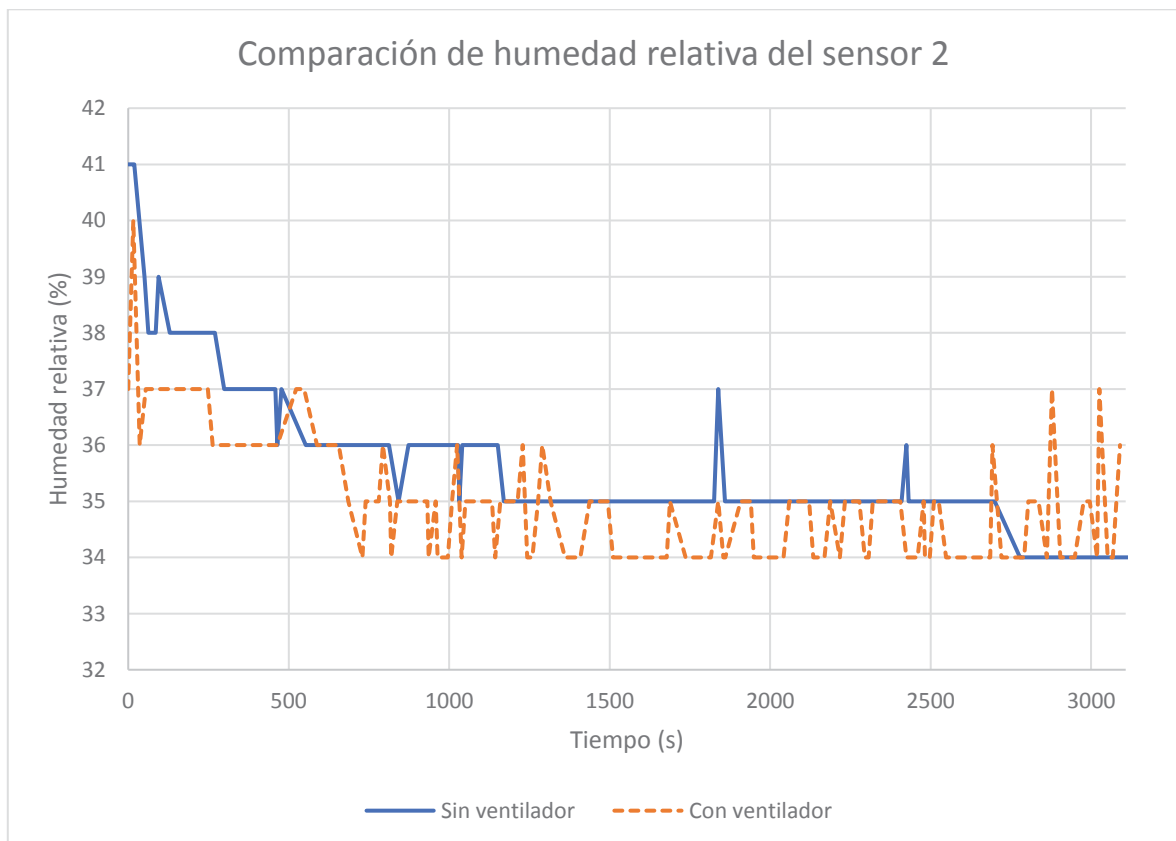


Ilustración 30. Comparación de humedad relativa del sensor 2.

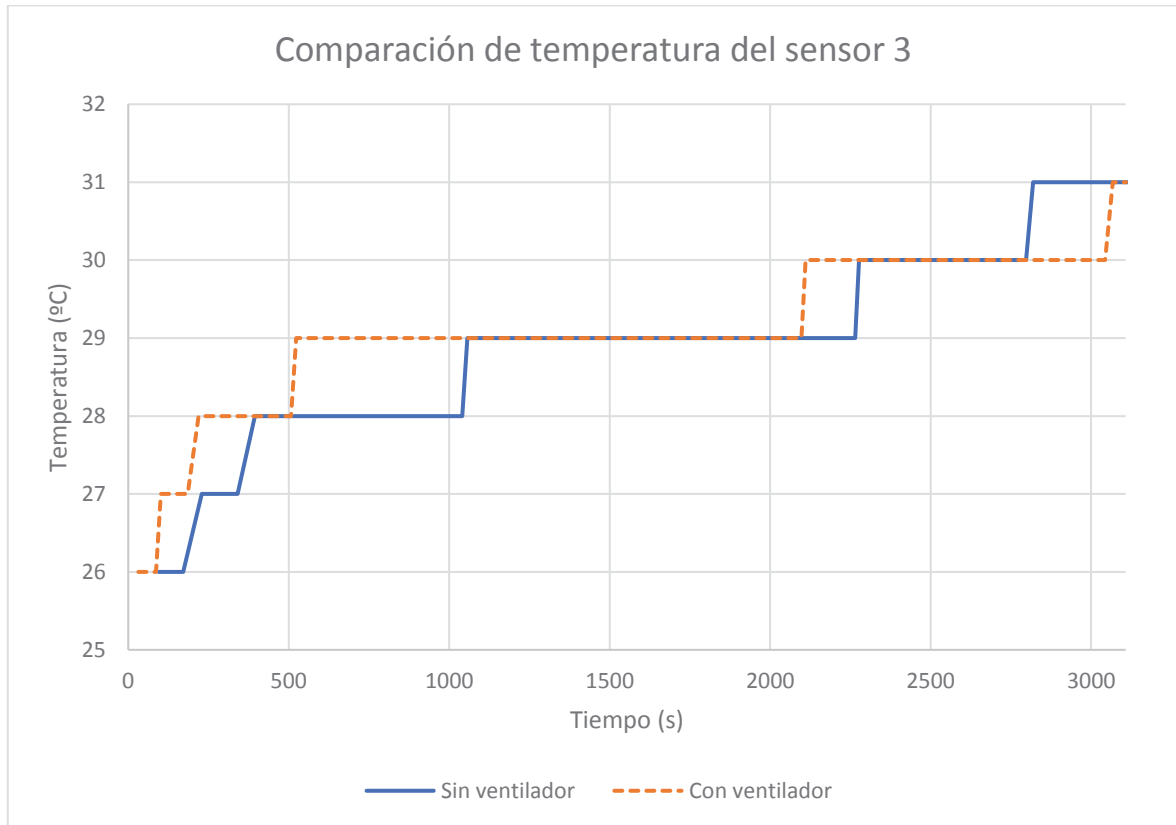


Ilustración 31. Comparación de temperatura del sensor 3.

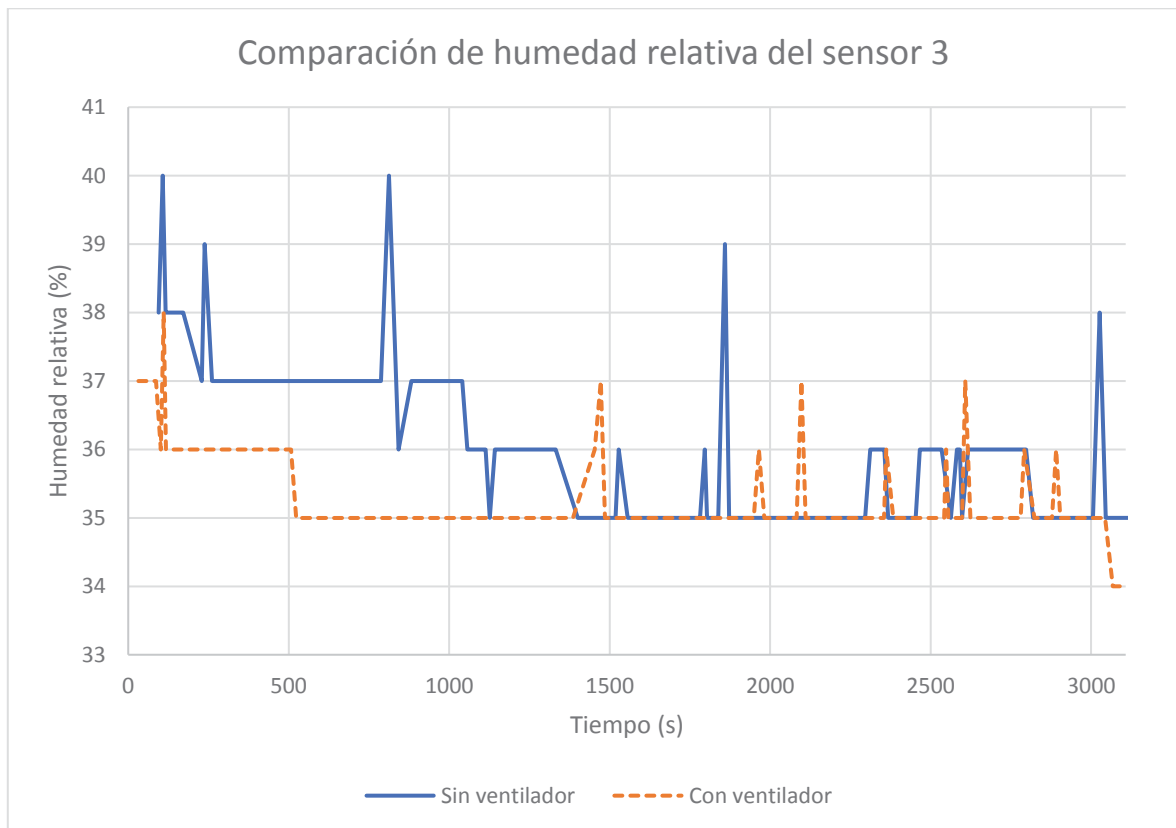


Ilustración 32. Comparación de humedad relativa del sensor 3.



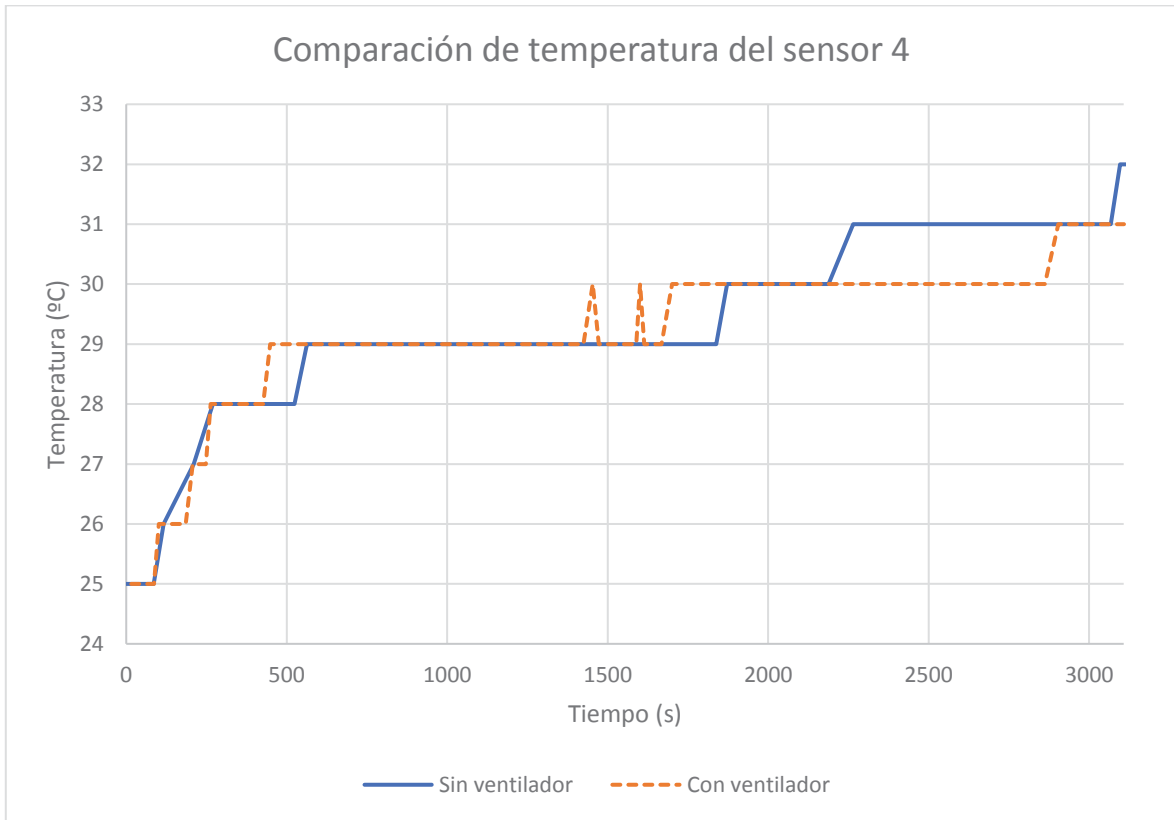


Ilustración 33. Comparación de temperatura del sensor 4.

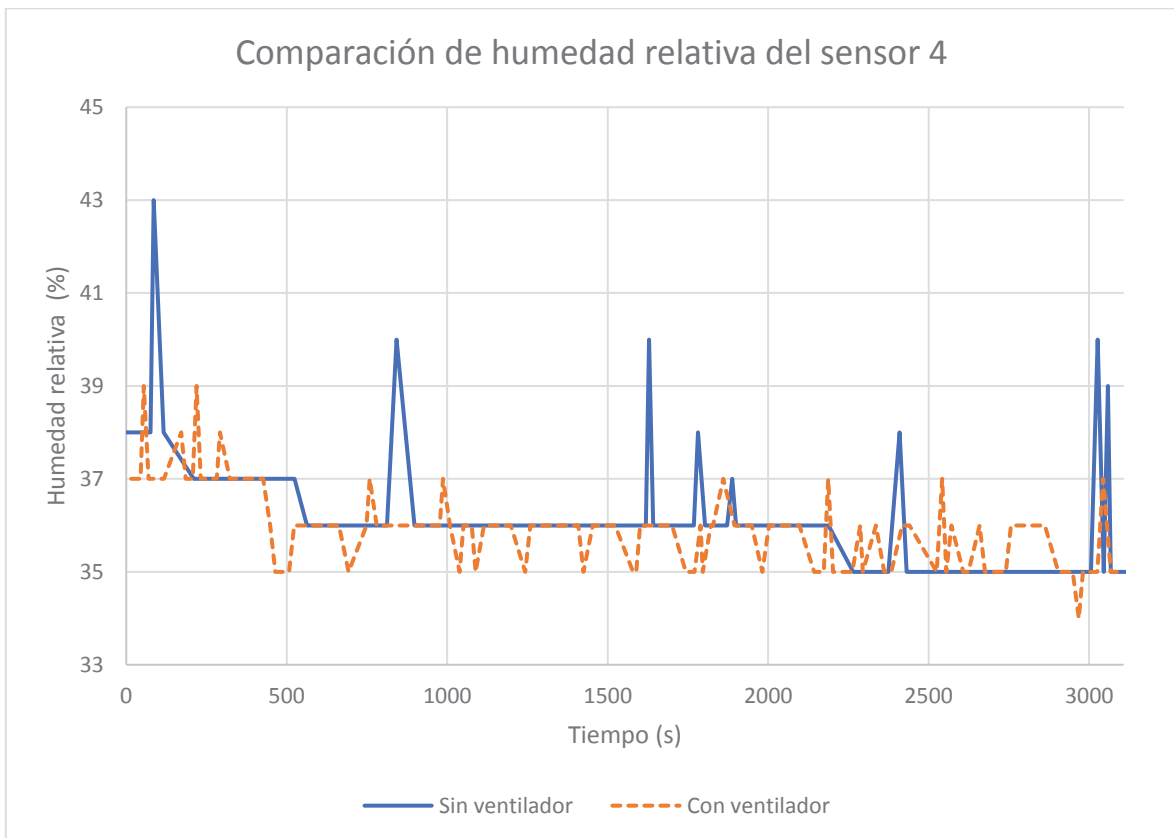


Ilustración 34. Comparación de humedad relativa del sensor 4.

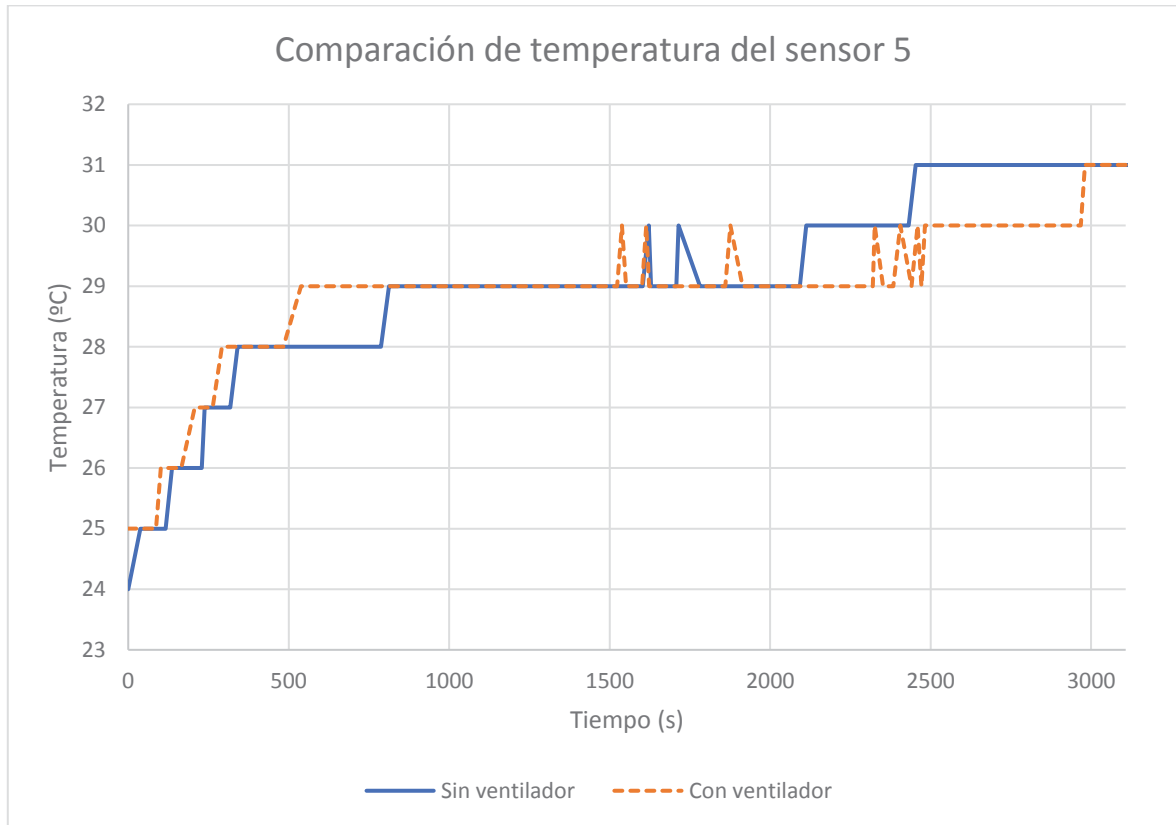


Ilustración 35. Comparación de temperatura del sensor 5.

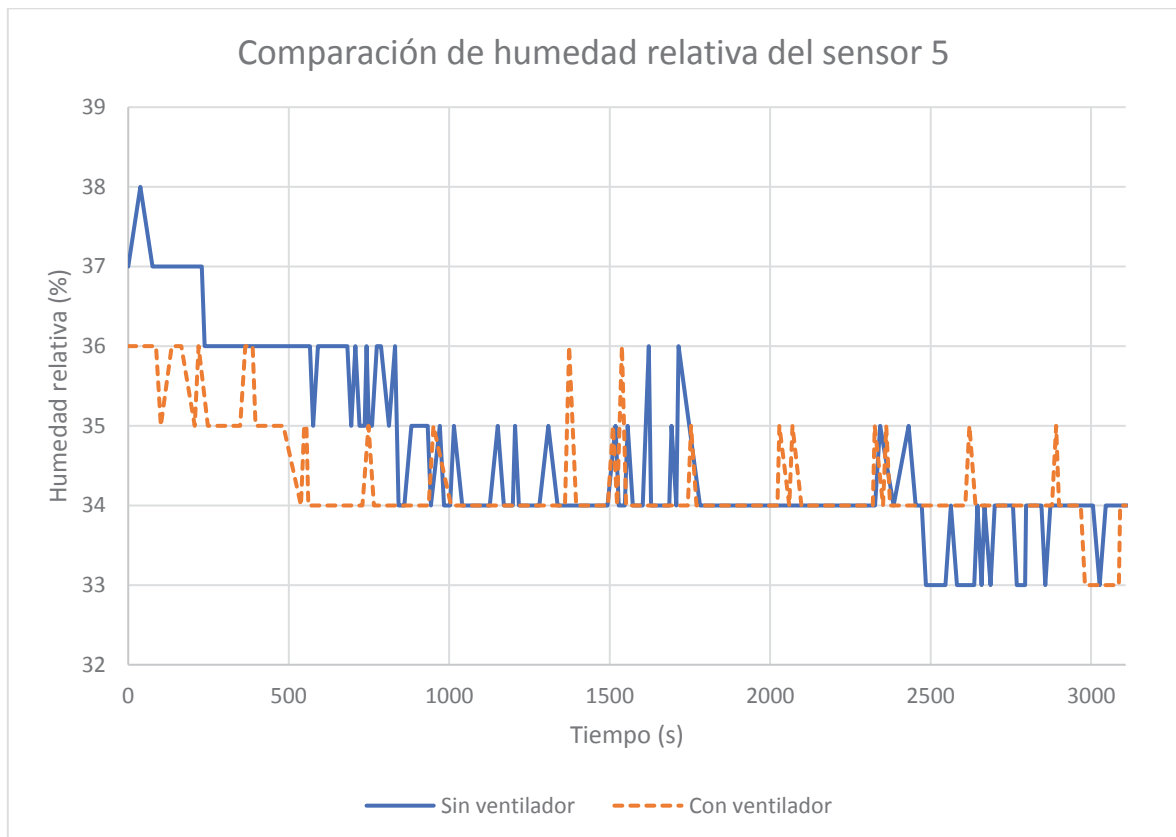


Ilustración 36. Comparación de humedad relativa del sensor 5.

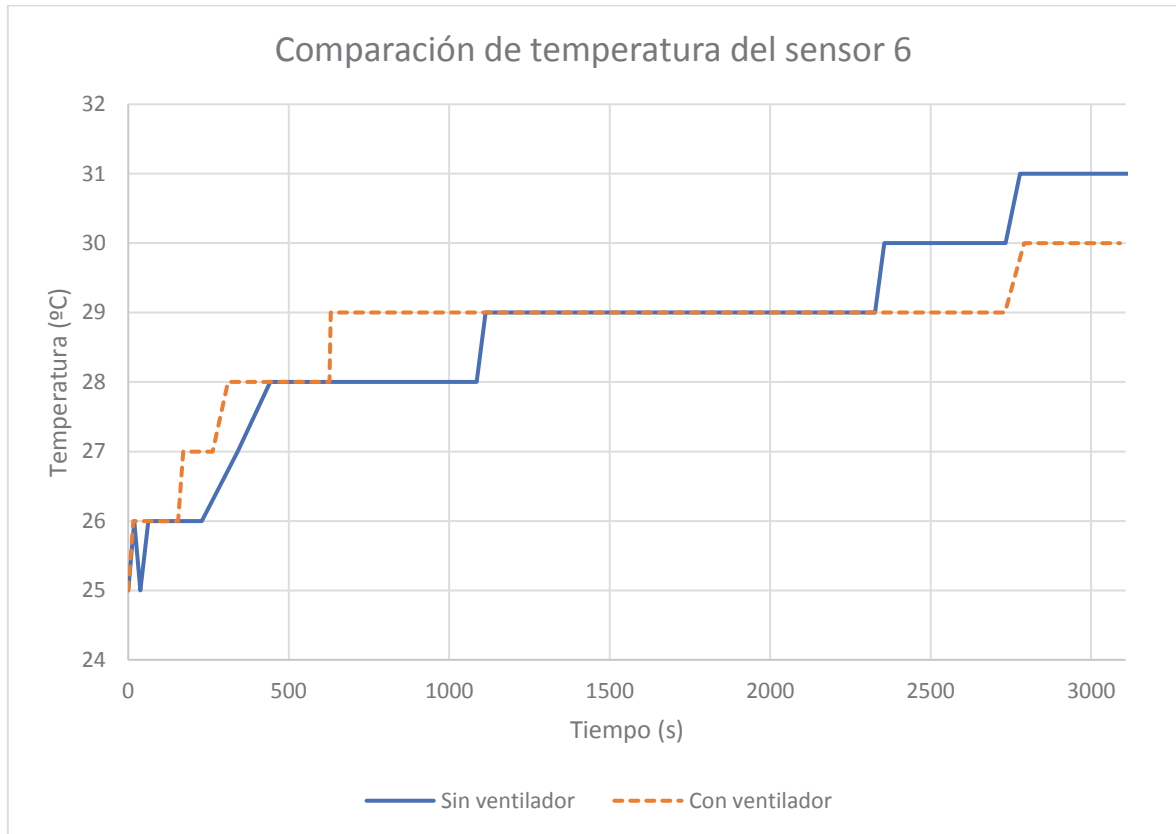


Ilustración 37. Comparación de temperatura del sensor 6.

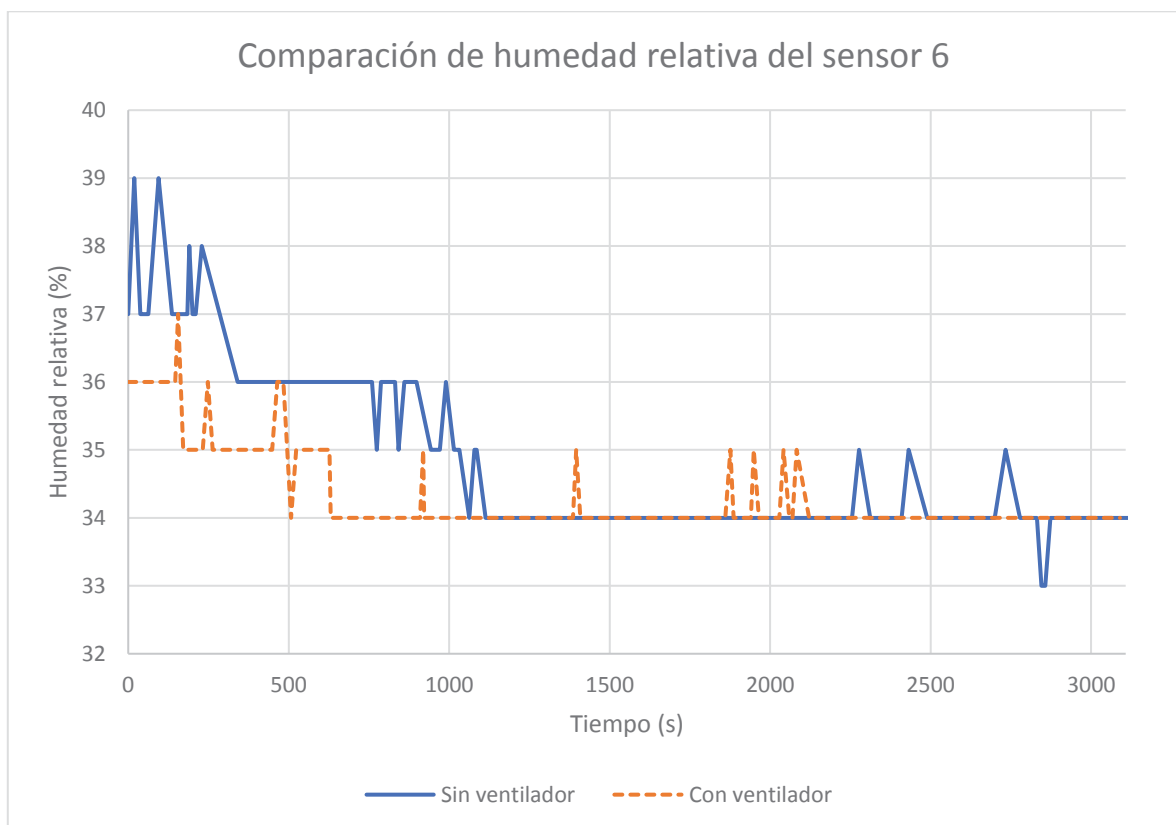


Ilustración 38. Comparación de humedad relativa del sensor 6.

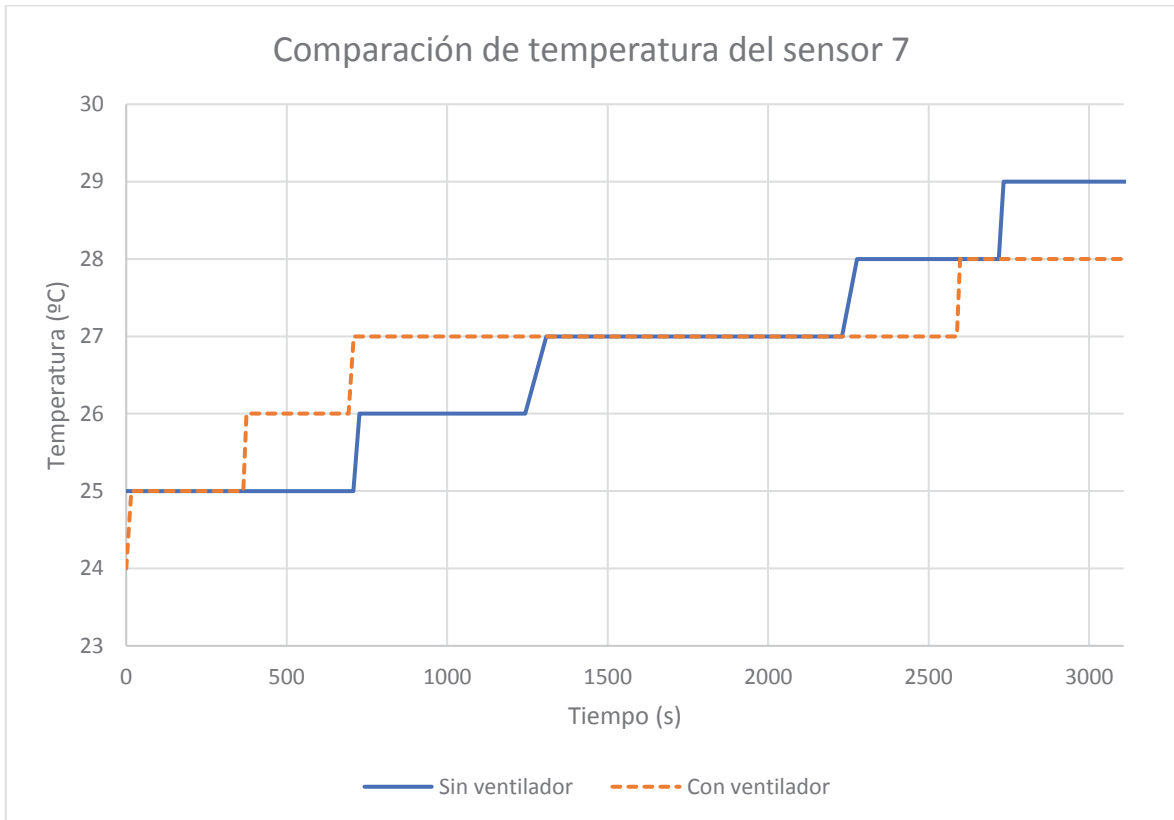


Ilustración 39. Comparación de temperatura del sensor 7.

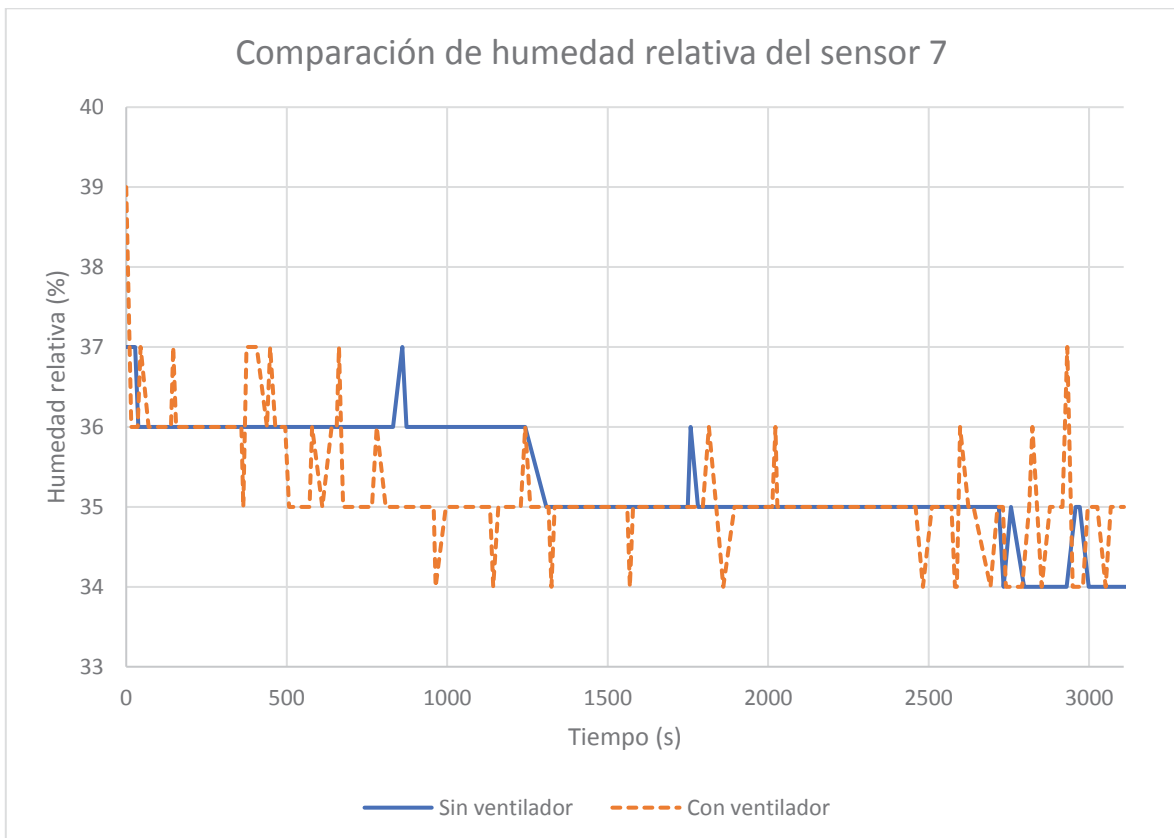


Ilustración 40. Comparación de humedad relativa del sensor 7.

Analizando las gráficas anteriores se observa lo siguiente:

- Al comparar la Ilustración 25 con la 26, se puede ver que la evolución que sigue la temperatura en los sensores 4 y 5 con el uso del ventilador es similar mientras que cuando no se emplea, las temperaturas en ambos sensores difieren bastante, al igual que pasaba en el segundo ensayo. Al finalizar el ensayo 3 la temperatura del sensor 4 era de un grado superior al del sensor 5, mientras que al final del ensayo 4 ambos sensores tenían la misma temperatura.
- Durante los primeros minutos del ensayo, la temperatura de los sensores aumenta más rápidamente con el uso del ventilador. Este hecho se percibe sobre todo en los sensores 3, 6 y 7, los cuales son los que se encuentran situados en el modelo del recién nacido. Sin embargo, a partir del segundo 700 aproximadamente, el ventilador adicional comienza a ser menos efectivo.
- En general, al finalizar los ensayos, la temperatura que se alcanza con el uso del ventilador es de 1 °C inferior en comparación a cuando este segundo ventilador no se emplea (únicamente se alcanza la misma temperatura en el sensor 3 y en el 5).

A continuación, se muestran las imágenes térmicas tomadas durante ambos ensayos para comprobar posteriormente, si el uso del segundo ventilador incorpora alguna mejora a la distribución del aire en el interior de la incubadora (el perfil izquierdo es el lado en el que se encuentra el calefactor):

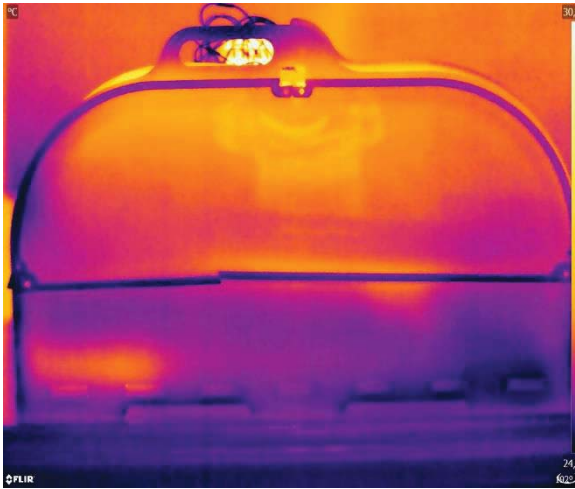


Ilustración 42. Situación inicial ensayo 3 (frontal).

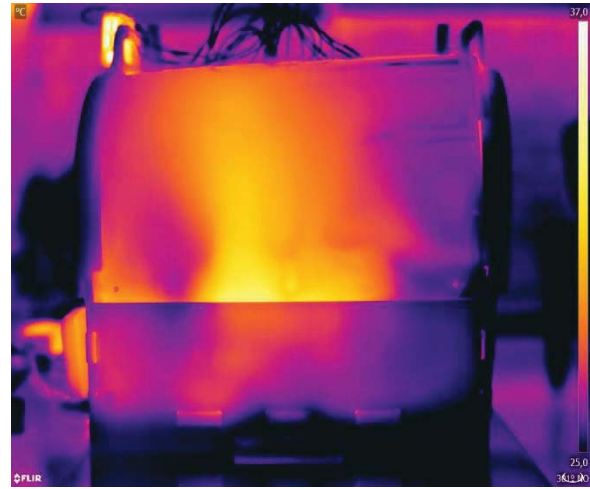


Ilustración 41. Situación inicial ensayo 3 (perfil izquierdo).

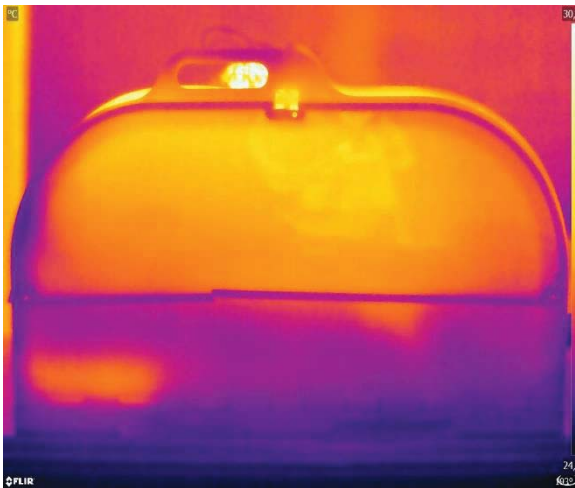
Caracterización experimental de un prototipo de incubadora de neonatos prematuros



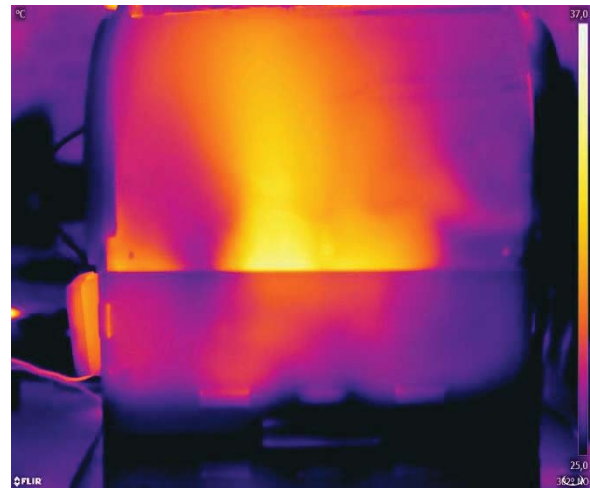
*Ilustración 44. Situación ensayo 3 pasados 20 minutos (frontal).*



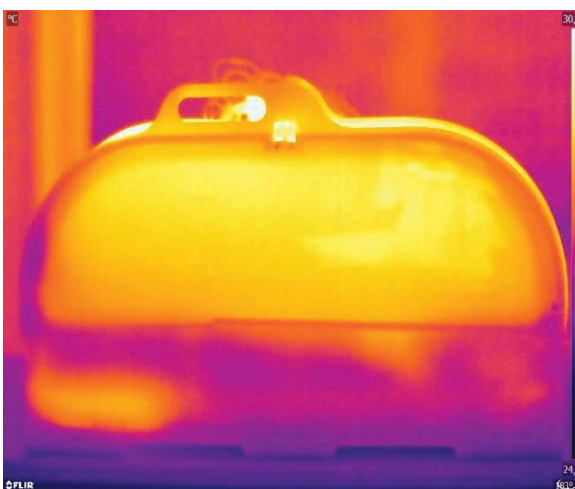
*Ilustración 43. Situación ensayo 3 pasados 20 minutos (perfil izquierdo).*



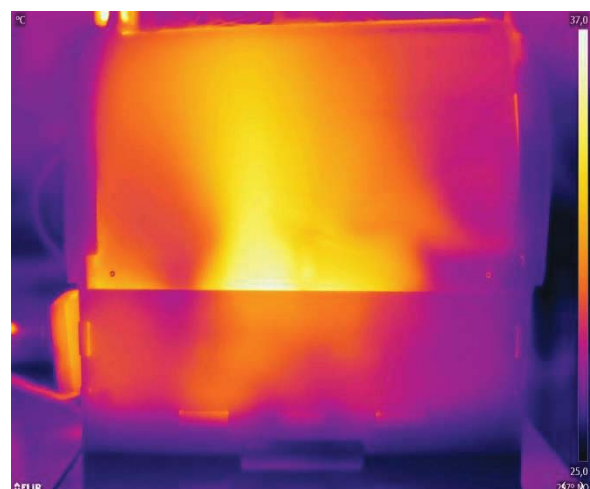
*Ilustración 46. Situación ensayo 3 pasados 30 minutos (frontal).*



*Ilustración 45. Situación ensayo 3 pasados 30 minutos (perfil izquierdo).*



*Ilustración 47. Situación ensayo 3 pasados 40 minutos (frontal).*



*Ilustración 48. Situación ensayo 3 pasados 40 minutos (perfil izquierdo).*

Caracterización experimental de un prototipo de incubadora de neonatos prematuros

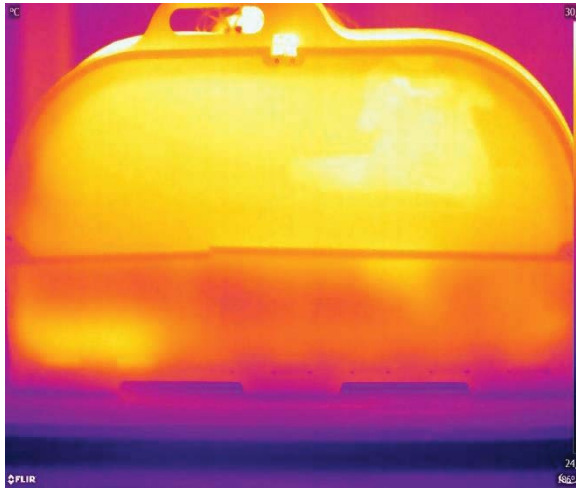


Ilustración 49. Situación ensayo 3 pasados 50 minutos (frontal).

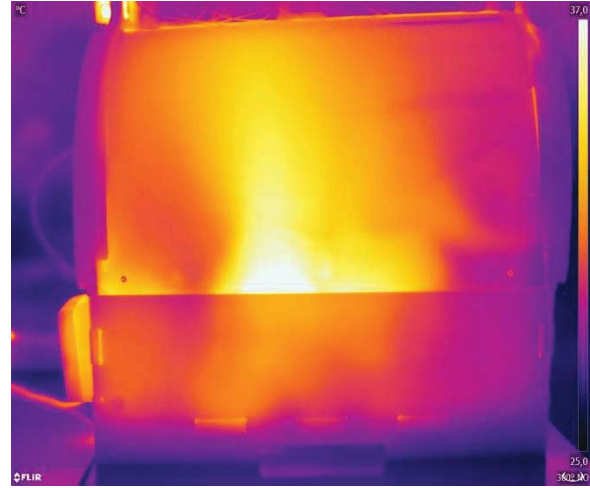


Ilustración 50. Situación ensayo 3 pasados 50 minutos (perfil izquierdo).

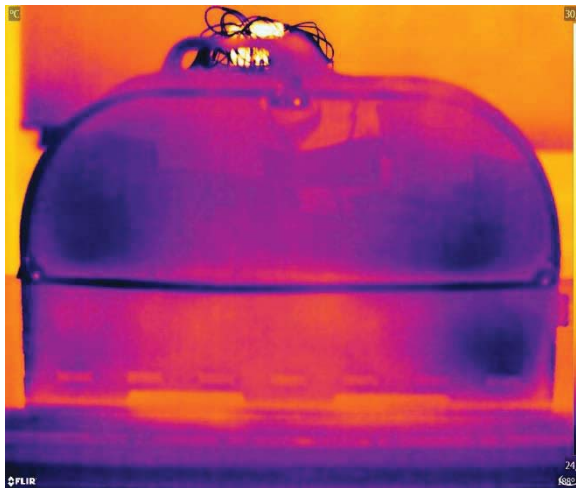


Ilustración 51. Situación inicial ensayo 4 (frontal).

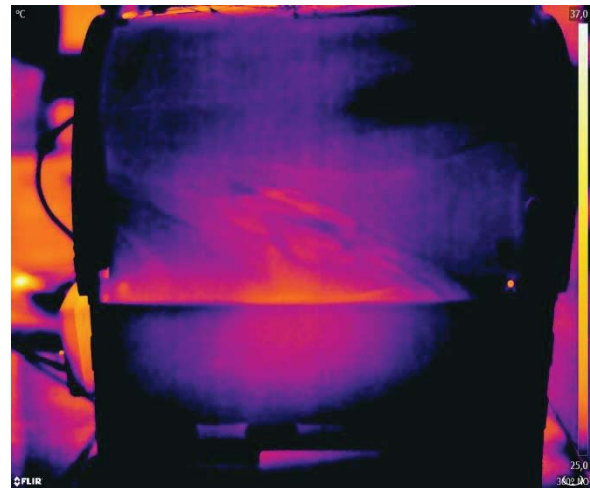


Ilustración 52. Situación inicial ensayo 4 (perfil izquierdo).

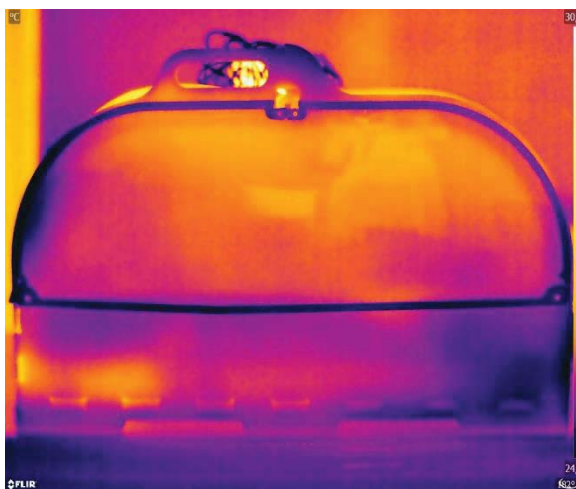


Ilustración 54. Situación ensayo 4 pasados 15 minutos (frontal).

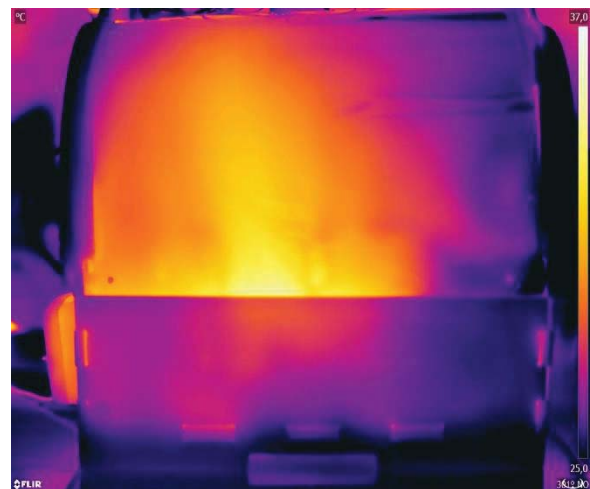


Ilustración 53. Situación ensayo 4 pasados 15 minutos (perfil izquierdo).

Caracterización experimental de un prototipo de incubadora de neonatos prematuros

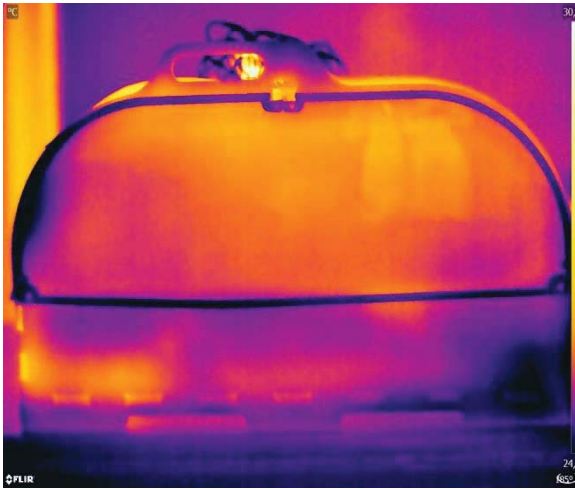


Ilustración 55. Situación ensayo 4 pasados 25 minutos (frontal).

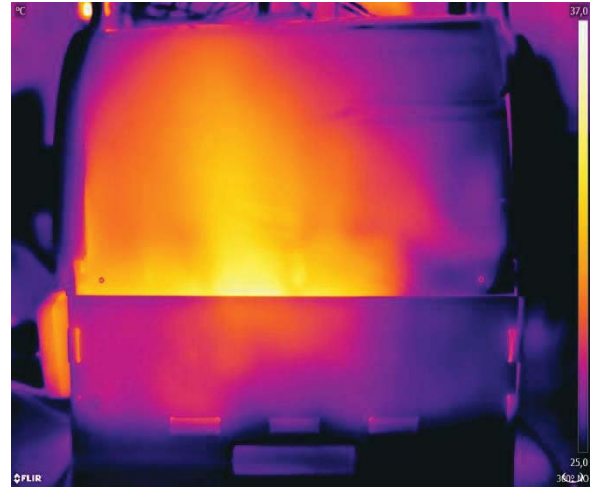


Ilustración 56. Situación ensayo 4 pasados 25 minutos (perfil izquierdo).

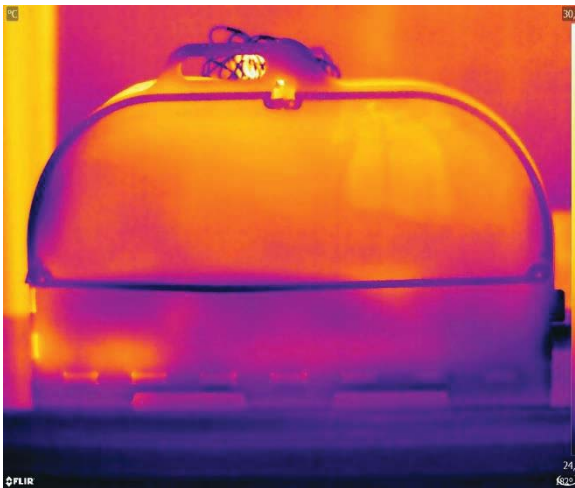


Ilustración 57. Situación ensayo 4 pasados 35 minutos (frontal).

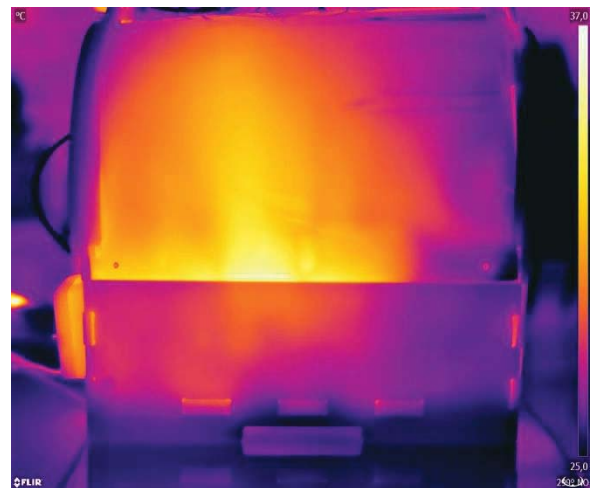


Ilustración 58. Situación ensayo 4 pasados 35 minutos (perfil izquierdo).

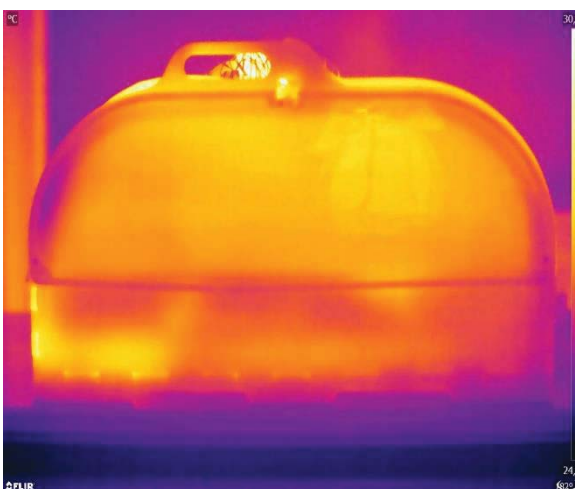


Ilustración 59. Situación ensayo 4 pasados 45 minutos (frontal).

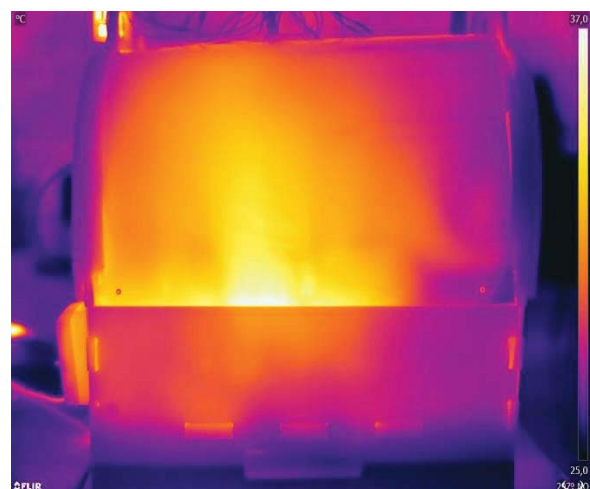


Ilustración 60. Situación ensayo 4 pasados 45 minutos (perfil izquierdo).



Al comparar la Ilustración 50 con la 60, se observa que el problema de asimetría que existía durante el segundo y el tercer ensayo no se ha solucionado al añadir el segundo ventilador en el último ensayo. Por otro lado, la homogeneidad alcanzada en ambos ensayos es similar, tal y como puede verse al examinar las Ilustraciones 49 y 59.

A esto hay que añadir que tal y como se ha comentado anteriormente, al emplear el ventilador adicional se obtiene una menor temperatura en el interior de la incubadora en comparación a cuando no se usa, para una misma duración del ensayo.

Por estos motivos, se puede afirmar que este ventilador tiene un efecto prácticamente nulo en el funcionamiento de la incubadora e incluso negativo al ser necesario más tiempo para conseguir alcanzar la misma temperatura en el interior de la misma. Por lo tanto, sería conveniente prescindir de él, lo cual también provoca que el coste de construir la incubadora se reduzca ligeramente, algo que es fundamental en una incubadora de bajo coste.

## 5. Conclusiones

A lo largo de este trabajo final de grado se ha realizado la caracterización experimental de la incubadora In3ator de neonatos prematuros de bajo coste y código abierto. Para ello, primero se ha diseñado e implementado un sistema de medición de temperatura y humedad relativa de forma que proporcionara datos fiables para su posterior análisis. Este sistema consistía en el uso de sensores DHT11 conectados a una Raspberry funcionando en modo *headless*. Adicionalmente también se hizo uso de una cámara termográfica durante la realización de los ensayos para observar la distribución de la temperatura en la superficie de las paredes de la incubadora.

Una vez que todo el sistema de medida funcionaba correctamente, se realizaron 4 ensayos. En el primero de ellos se compararon los sensores DHT11 y DHT22 para conocer cuál de ellos era el más adecuado para realizar el resto de ensayos y finalmente se decidió escoger el DHT11.

Los otros 3 ensayos consistieron en tomar datos de temperatura y humedad relativa en el interior de la incubadora en diferentes situaciones, los cuales se realizaron tanto a nivel cualitativo (con el uso de la cámara termográfica), como a nivel cuantitativo (por medio de los sensores). En los 2 últimos se comparó la evolución que seguía la temperatura en el interior de la incubadora, funcionando en un ensayo únicamente con el ventilador del calefactor y en el otro funcionando con un ventilador adicional.

Analizando los resultados de estos ensayos se llegó a la conclusión de que el ventilador adicional no aportaba mejora alguna a la distribución del aire en la incubadora y además, la temperatura alcanzada en el interior era menor que si no se colocase dicho ventilador.

## 6. Trabajo futuro

Diseñar y construir una incubadora comenzando desde cero es una tarea complicada, entre otras cosas, por la complejidad de reproducir el comportamiento termodinámico de un neonato y por la limitación de los ensayos de campo, debido a que un fallo puede provocar el fallecimiento de estos, por lo que en la mayoría de los casos es necesario que se realicen modificaciones sobre su estructura y funcionamiento. A lo largo de esta caracterización experimental se han encontrado ciertos aspectos que sería interesante modificar de cara a futuros diseños de la incubadora para mejorar el confort en el interior de la misma, por ejemplo:

- Eliminar el ventilador adicional de su diseño porque tal y como se ha comprobado al analizar los resultados de los ensayos, tiene un beneficio nulo en su funcionamiento y de esta forma se reduce ligeramente el coste de fabricación, lo cual es muy importante debido a que esta incubadora está destinada a países en vías de desarrollo con recursos reducidos.
- Debido al funcionamiento del calefactor y de los ventiladores, hay demasiado ruido en el interior de la incubadora, lo cual afecta al descanso del recién nacido. La eliminación del ventilador adicional ayuda a reducir este problema.
- Solucionar el problema de asimetría. Para ello hay que asegurarse de que el flujo de aire que sale por el calefactor se encuentre lo más centrado posible por lo que algunas opciones podrían ser colocar deflectores a la salida del ventilador de forma que dirijan el flujo de aire sin que se desvíe hacia alguno de los lados o modificar la geometría de la incubadora para, además, intentar mejorar la homogeneidad en el interior.
- Otro de los problemas a solventar es el de la estanqueidad, el cual provoca que el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada en el interior sea excesivo. La causa de este problema es una construcción deficiente de la incubadora por lo que, si se simplifica el diseño de forma que sea más sencillo fabricarla, aumentan las posibilidades de que se construya de forma correcta y aparezcan fugas más difícilmente.

## 7. Bibliografía

- [1] Mainhart, Calondra. «Low-Cost Baby Incubator Improves Outcomes». Innovate Development, 2 de febrero de 2015, <http://innovatedevelopment.org/2015/02/02/low-cost-incubab>.
- [2] Mundo, Redacción BBC. «La tecnología de bajo costo que salva a los bebés prematuros». BBC News Mundo, [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/08/130827\\_tecnologia\\_bajo\\_coste\\_salva\\_bebes\\_ap](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/08/130827_tecnologia_bajo_coste_salva_bebes_ap).
- [3] «Past Projects». Design That Matters, <https://www.designthatmatters.org/past-projects>.
- [4] Home | Hebi. <http://www.hebi-incubator.org/>.
- [5] Rosenberg, Tina. «The Human Incubator». Opinionator, 13 de diciembre de 2010, <https://opinionator.blogs.nytimes.com/2010/12/13/the-human-incubator/>.
- [6] «Raspberry Pi». Wikipedia, la enciclopedia libre, 6 de julio de 2019. Wikipedia, [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Raspberry\\_Pi&oldid=117206712](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Raspberry_Pi&oldid=117206712).
- [7] Raspberry Pi Model B Plus Product Brief, <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>.
- [8] Digital output relative humidity & temperature sensor/module DHT11, [http://image.dfrobot.com/image/data/DFR0067/DFR0067\\_DS\\_10\\_en.pdf](http://image.dfrobot.com/image/data/DFR0067/DFR0067_DS_10_en.pdf).
- [9] DHT22, <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.
- [10] FLIR T1020 | FLIR Systems. <https://www.flir.com/products/t1020/>.
- [11] 19. Final project - In3. [http://fabacademy.org/archives/2015/eu/students/escario\\_mendez.alejandro/final\\_project.html](http://fabacademy.org/archives/2015/eu/students/escario_mendez.alejandro/final_project.html).
- [12] Vollmer, M., Möllmann, K. (2010). «Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications» (2ª. Ed.).
- [13] Fenercom. (2011). «Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética».
- [14] Escario Méndez, A. Trabajo Fin de Máster. «In<sup>3</sup>: a low-cost incubator for third world countries».

## 8. Presupuesto

PRESUPUESTO				
CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA INCUBADORA DE NEONATOS PREMATUROS				
Nº Ud.	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio unitario	Importe
1	Materiales			
1.1	Incubadora de neonatos prematuros In3ator <sup>[14]</sup>			
	PLA 1kg (Filamento impresora 3D)	0,2 kg	20,68 €/kg	4,14 €
	Madera contrachapada 10mm (1,5m <sup>2</sup> )	1 m <sup>2</sup>	23,90 €/m <sup>2</sup>	23,90 €
	Madera contrachapada 17,5mm (3m <sup>2</sup> )	1 m <sup>2</sup>	77,29 €/m <sup>2</sup>	77,29 €
	Bisagra de metal	4	0,59 €	2,36 €
	Barra M3 1m	1	0,15 €	0,15 €
	Tuerca M3	16	0,03 €	0,48 €
	Ventilador axial 50x50mm	2	2,30 €	4,60 €
	Fuente PWR	1	18,00 €	18,00 €
	Disipador 50x50	2	3,05 €	6,10 €
	Tornillo 3x16	12	0,02 €	0,24 €
	Silicona térmica 5g	1	1,71 €	1,71 €
	Calefactor TEC1-12706 12V 60W	1	3,60 €	3,60 €
	Cable de silicona 3m	1	10,85 €	10,85 €
	Cable rojo y negro 30m	0,1	9,86 €	0,99 €
	Plástico transparente (45x75)	0,34	2,70 €	0,91 €
	Polietileno de alta densidad (250x60)	1	1,80 €	1,80 €
	Placa de circuito de una cara	1	0,16 €	0,16 €
	Microcontrolador ATMEGA 168A-AU-ND	3	1,28 €	3,84 €
	Regulador de voltaje 5V 1A	1	0,23 €	0,23 €
	Condensador cerámico 10µF	5	0,05 €	0,25 €
	Condensador cerámico 1µF	7	0,06 €	0,42 €
	Condensador cerámico 10 pF	2	0,03 €	0,06 €
	Resistencia 1 KΩ	10	0,01 €	0,10 €
	Resistencia 10 KΩ	12	0,01 €	0,12 €
	Pulsador W-GND 160 GF	3	0,59 €	1,77 €
	Led rojo Clear 1206 SMD	4	0,06 €	0,24 €
	Led rojo/verde/azul PLCC4 SMD	1	0,35 €	0,35 €
	Transistor mosfet N-CH 30V 1,7A 3-SSOT	5	0,11 €	0,55 €
	Diodo zener 500MW 3,3V SOD123	1	0,04 €	0,04 €
	Módulo bluetooth	1	5,03 €	5,03 €
	Relé 12 VDC SPDT 6A	2	3,60 €	7,20 €

Caracterización experimental de un prototipo de incubadora de neonatos prematuros

	Módulo LCD 16x2	1	3,42 €	3,42 €
	Interruptor giratorio	1	1,38 €	1,38 €
	Sensor de temperatura y humedad DHT11	2	1,00 €	2,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	184,27 €	1,84 €
Total				186,12 €
1.2	Material sistema de medición			
	Raspberry Pi 3 B+	1	38,82 €	38,82 €
	Sensor de temperatura y humedad DHT11	7	1,00 €	7,00 €
	Sensor de temperatura y humedad DHT22	1	2,60 €	2,60 €
	Breadboard	1	2,70 €	2,70 €
	Cables jumper	77	0,14 €	10,78 €
	Alquiler cámara infrarrojos	2 días	100 €/día	200 €
	Costes directos complementarios	0,01	261,90 €	2,62 €
Total				264,52 €
1.3	Elaboración del código			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	10 h	40,00 €/h	400,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	400,00 €	4,00 €
Total				404,00 €
Total unidad de obra				854,64 €

2	Realización de la caracterización experimental			
2.1	Realización de los ensayos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	8 h	40,00 €/h	320,00 €
	Técnico especialista en termografía	8 h	60,00 €/h	480,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	800,00 €	8,00 €
Total				808,00 €
2.2	Redacción de textos			
	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	50 h	40,00 €/h	2.000,00 €
	Costes directos complementarios	0,01	2.000,00 €	20,00 €
Total				2.020,00 €
Total unidad de obra				2.828,00 €

<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>3.682,64 €</b>
Gastos Generales (15%)	552,40 €
Beneficio Industrial (6%)	220,96 €
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA</b>	<b>4.456,00 €</b>
I.V.A. (21%)	935,76 €
<b>PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN</b>	<b>5.391,71 €</b>