



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante  
células Peltier

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Tomas Company, David

Tutor/a: Tormos Ferrando, Álvaro

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

## **Agradecimientos**

Primero de todo, quiero agradecerles a mi familia, sobre todo a mis padres, por el apoyo incondicional que me han dado siempre. Por confiar en mí e impulsarme para alcanzar mis metas personales. Soy quien soy gracias a vosotros.

Quiero agradecer también a todos los amigos que me han dado esta etapa académica, desde primaria hasta este grado. Gracias por formar parte de la mejor etapa de mi vida y como siempre os digo, conseguiremos todo lo que nos propongamos y si no sale bien, que no sea porque no lo hemos intentado todo. A mi tutor Álvaro Tormos Ferrando, por acompañarme y guiarme en este camino. Gracias por estar ahí cuando lo he necesitado.

Por último y no menos importante, me gustaría dar las gracias a los profesionales de la empresa DAS Photonics S.L. donde he realizado mis prácticas y he podido realizar este TFG en donde he aprendido mucho, no sólo del trabajo en sí sino también de la ética y forma de trabajo que tienen. Y en especial, a mi supervisor Rubén Garcia.

Muchas gracias a todos!



## **ÍNDICE GENERAL**

<b>1. Índice de la memoria</b>	<b>2</b>
<b>2. Índice del pliego de condiciones</b>	<b>4</b>
<b>3. Índice de los presupuestos</b>	<b>4</b>
<b>4. Índice de los planos</b>	<b>4</b>
<b>5. Índice de figuras</b>	<b>5</b>
<b>6. Índice de gráficas y códigos</b>	<b>7</b>
<b>7. Índice de tablas</b>	<b>8</b>

## **Índice de la memoria**

<b>1. Objeto.</b>	<b>11</b>
<b>2. Antecedentes.</b>	<b>14</b>
2.1. Funcionalidad del sistema.	14
2.2. Células Peltier.	14
<b>3. Estudio de necesidades.</b>	<b>16</b>
3.1. Matriz de especificaciones.	16
3.2. Diagrama de etapas de diseño.	17
<b>4. Alternativas y solución adoptada.</b>	<b>18</b>
4.1. Puntos de diseño a contemplar.	18
4.2. Justificación de la solución adoptada.	19
4.2.1. CP.	19
4.2.2. CA.	20
4.2.1. CM.	20
4.2.2. Carcasa.	20
4.2.1. CST.	21
<b>5. Descripción detallada de la solución y su justificación.</b>	<b>22</b>
5.1 Introducción y descripción de la aplicación.	22
5.2. Diseño.	23
5.2.1. Circuito de Alimentación (CA).	23
5.2.2. Circuito Peltier (CP).	25
5.2.2.1. Sistema eléctrico.	26
5.2.2.2. Sistema de disipación.	31
5.2.2.2.1. Cálculo del calor absorbido por la célula Peltier.	32
5.2.2.2.2. Cálculo de los gradientes de temperatura.	35
5.2.3. Sensor de temperatura (CST).	37
5.2.3.1. Etapa diferencial.	37
5.2.3.2. Etapa de amplificación.	40
5.2.3.2.1. Cálculo del rango y de la ganancia.	40
5.2.3.2.2. Comprobación de no saturación por tensión.	41
5.2.3.2.3. Comprobación de no saturación por corriente.	42
5.2.3.3. Filtro.	43
5.2.3.4. Adaptador de tensión.	45
5.2.4. Control de temperatura (CM).	48
5.2.4.1. Conexión del circuito CM.	48
5.2.4.2. Flujograma del algoritmo.	50
5.2.4.3. Entrada del Convertidor ATMEGA328P.	55

5.2.4.4. Bucle de control y controlador PI.	57
5.3. Análisis y Resultados.	63
5.3.1. Valores nominales del CP.	63
5.3.2. Valores nominales del CST.	63
5.3.3. WC del CST.	68
5.3.4. “Derating” del CST.	71
5.3.5. Análisis de modos fallo y efectos.	73
5.3.6. Simulaciones del circuito digital.	82
5.4. Conclusiones y revisión de especificaciones.	85
<b>6. Bibliografía</b>	<b>87</b>
6.1. Fuentes generales.	87
6.2. Hojas de características.	88
6.3. Figuras externas.	91
<b>7. Anexo</b>	<b>92</b>
7.1. Extractos específicos de datasheets.	92
7.1.1. Células Peltier.	92
7.1.2. Convertidor AC/DC.	94
7.1.3. Convertidor DC/DC 24 V.	95
7.1.4. Convertidor DC/DC $\pm 15$ V.	95
7.1.5. Convertidor INA101.	96
7.1.7. “Switch” de estado sólido.	97
7.1.8. Arduino.	98
7.1.9. Ventiladores.	98
7.1.10. LDO.	99
7.1.10. Disipador.	99
7.2. Tablas de componentes.	100
7.2.1. Resistencias.	100
7.2.2. Bobinas.	100
7.2.3. RTD.	101
7.2.4. Condensadores.	102
7.3. Códigos de programación.	103
7.3.1. Código del PI.	103
7.3.2. Código del microcontrolador.	104
7.4. Manual de usuario.	108
7.4.1. Funcionamiento del dispositivo.	108
7.4.2. Condiciones ambientales de uso.	108
7.4.3. Limpieza y mantenimiento.	108

## Índice del pliego de condiciones

1. Objeto del pliego de condiciones.	111
2. Normativa.	112
3. Materiales.	113
3.1. Materiales electrónicos.	113
3.2. Materiales mecánicos.	117
4. Control de ejecución.	118
5. Prueba de servicio.	121

## Índice de los presupuestos

1. Precios unitarios.	123
2. Precios descompuestos.	124
3. Presupuestos generales.	126

## Índice de los planos

1. Explicación de los planos.	129
2. Referencias de los componentes.	130
3. Esquemático del CST.	134
4. Esquemático del CP.	135
5. Esquemático del CM.	136
6. Plano de conjunto de la carcasa.	137
7. Pieza 1.	138
8. Pieza 2.	139
9. Pieza 3.	140
10. Pieza 4.	141
11. Plancha de aluminio.	142
12. Explosionado de la carcasa.	143
13. Esquemático de la PCB.	144
14. PCB.	145

## Índice de figuras

Figura 1. Plancha térmica esperada.	11
Figura 2. Caras de una célula Peltier.	15
Figura 3. Diagrama de etapas de diseño del sistema.	17
Figura 4. Diagrama de bloques.	18
Figura 5. Esquema del sistema de alimentación.	23
Figura 6. Filtro a la salida de los convertidores.	24
Figura 7. Esquema del CP.	25
Figura 8. Ejemplo del Teorema de Thevenin.	27
Figura 9. Ejemplo de puente en “H”.	29
Figura 10. Control del puente en “H” del CP.	30
Figura 11. Montaje de las células Peltier.	31
Figura 12. Esquemático de puente Wheatstone.	37
Figura 13. Esquemático de la etapa de amplificación.	41
Figura 14. Esquemático interno de la entrada del INA.	42
Figura 15. Esquemático filtro paso bajo.	43
Figura 16. Esquemático final etapa filtro .	44
Figura 17. Esquemático del inversor.	45
Figura 18. Esquemático del restador	46
Figura 19. Esquemático del adaptador de tensión.	46
Figura 20. Esquema de conexiones del circuito digital.	49
Figura 21. Diagrama del algoritmo general	50
Figura 22. Flujograma del bucle sin fin.	51
Figura 23. Función actuadora.	52
Figura 24. Interrupciones.	53
Figura 25. Función leer temperatura.	53
Figura 26. Funciones de calentar, enfriar y reposo.	54
Figura 27. Diagrama de control en bucle abierto.	57
Figura 28. Diagrama de control en bucle cerrado.	58
Figura 29. Diagrama de control en bucle cerrado con valores.	58
Figura 30. Diagrama de control simplificado.	58
Figura 31. Diagrama de Simulink.	60
Figura 32. Obtención de los parámetros $K_p$ y $K_i$ .	61
Figura 33. Asociación de células Peltier.	63
Figura 34. Diferencial de voltaje a $-10\text{ }^\circ\text{C}$ .	64
Figura 35. Diferencial de voltaje a $25\text{ }^\circ\text{C}$ .	65
Figura 36. Diferencial de voltaje a $100\text{ }^\circ\text{C}$ .	66
Figura 37. Plancha en estado de reposo.	82
Figura 38. Plancha a $52\text{ }^\circ\text{C}$ calentando hasta $70\text{ }^\circ\text{C}$ .	83
Figura 39. Plancha a $37\text{ }^\circ\text{C}$ enfriando hasta $-5\text{ }^\circ\text{C}$ .	83



---

Figura 40. Plancha a 52 °C calentando hasta 70 °C con la sonda a 74 °C.	84
Figura 41. Características principales del convertidor AC/DC.	94
Figura 42. Características del Arduino UNO.	98
Figura 43. Características del PWM del ventilador.	98
Figura 44. Flujograma para la prueba de servicio.	121
Figura 45. Diagrama de masas del sistema.	129



## Índice de gráficas y códigos

Gráfica 1. Tensión de entrada respecto al delta de temperatura a 25°C.	26
Gráfica 2. Tensión de entrada respecto al delta de temperatura a 75°C.	28
Gráfica 3. Relación Vatios/Delta con cara caliente a 25°C.	33
Gráfica 4. Relación Vatios/Delta con cara caliente a 50°C.	34
Gráfica 5. Relación Vatios/Delta con cara caliente a 75°C.	35
Gráfica 6. Respuesta del sistema ante escalón.	59
Gráfica 7. Rechazo de perturbaciones a la entrada del sistema.	59
Gráfica 8. Respuesta a escalón de la señal de error en Simulink.	60
Gráfica 9. Respuesta a escalón con unidades digitales en Simulink.	61
Gráfica 10. Señal de entrada nominal al microcontrolador a -10 °C.	64
Gráfica 11. Señal de entrada nominal al microcontrolador a 25 °C.	65
Gráfica 12. Señal de entrada nominal al microcontrolador a 100 °C.	66
Gráfica 13. Análisis en frecuencia del sistema.	67
Gráfica 14. Simulación de temperatura a 100 °C.	68
Gráfica 15. Simulación de Montecarlo a 100 °C.	69
Gráfica 16. Gráficas de comportamiento a 25 °C.	92
Gráfica 17. Gráficas de comportamiento a 50 °C.	93
Gráfica 18. Gráficas de comportamiento a 75 °C.	93
Gráfica 19. Rangos de conmutación del “switch”.	97
Código 1. Programación de la obtención del PI.	103
Código 2. Programación del microcontrolador.	107

## Índice de tablas

Tabla 1. Acrónimos y abreviaturas.	9
Tabla 2. Matriz de especificaciones.	16
Tabla 3. Consumo de las células Peltier según el PWM.	31
Tabla 4. Calor generado a 25 °C en la cara caliente.	32
Tabla 5. Calor generado a 50 °C en la cara caliente.	33
Tabla 6. Calor generado a 75 °C en la cara caliente.	34
Tabla 7. Tabla resumen de errores máximos en temperatura.	70
Tabla 8. Tabla de derating CST.	72
Tabla 9. Análisis FMEA.	81
Tabla 10. Matriz de cumplimiento de especificaciones.	85
Tabla 11. Tabla de valores nominales de la célula Peltier.	92
Tabla 12. Características de salida del convertidor de 24 V.	95
Tabla 13. Características de salida del convertidor de 15 V.	95
Tabla 14. Características del INA101.	96
Tabla 15. Características del TL081.	96
Tabla 16. Rangos de tensión del “switch”.	97
Tabla 17. Características de LDO de 8 V.	99
Tabla 18. Características de LDO de 5 V.	99
Tabla 19. Características del disipador.	99
Tabla 20. Tabla de resistencias normalizadas.	100
Tabla 21. Tabla de inductancias normalizadas.	100
Tabla 22. Tabla de valores óhmicos de las RTD empleadas.	101
Tabla 23. Tabla de condensadores normalizados.	102
Tabla 24. Tabla de precios unitarios de cada componente.	123
Tabla 25. Precios descompuestos de CEL.	124
Tabla 26. Precios descompuestos de CAR.	125
Tabla 27. Presupuesto general.	126
Tabla 28. Presupuesto general con impuestos y gastos de comercialización.	126
Tabla 29. Precio concurrente.	127
Tabla 30. Precio concurrente con impuestos.	127
Tabla 31. Lista de referencias de los componentes de la PCB.	132
Tabla 32. Lista de referencias de los componentes externos a la PCB.	133

## Tabla de acrónimos y abreviaturas

CP	Circuito Peltier
CM	Circuito microcontrolador
CST	Circuito sensor de temperatura
CA	Circuito de alimentación
PWM	Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso)
LDO	Low Dropout Regulators (Reguladores de tensión)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors

Tabla 1. Acrónimos y abreviaturas.



# MEMORIA

## 1. Objeto

La empresa DAS Photonics S.L ha decidido desarrollar e implementar un sistema de control térmico de una superficie plana con el fin de ser usada en su laboratorio de electrónica. En ésta, se van a colocar diferentes componentes o sistemas para realizar test de vida, ciclados térmicos, calificación de huellas y componentes entre otras funciones.

Con dicho objetivo, en esta memoria se ha propuesto un sistema basado en el uso de células Peltier, las cuáles son aptas tanto para conseguir aumentar la temperatura varias decenas de grados Celsius como para disminuirla por debajo de 0 °C. Adicionalmente para el sistema de control, se han diseñado varios circuitos para medir la temperatura en varios puntos del sistema.

Para que el usuario pueda decidir el funcionamiento de dicha plancha térmica, se ha implementado una interfaz de usuario mediante una pantalla LCD, botones y LED de encendido. Aprovechando esta técnica de calentamiento, se ha diseñado una carcasa externa para concebir un sistema portátil que sea fácil de transportar y almacenar para la empresa.

En la figura 1 es posible hacerse una idea del aspecto que debe tener el sistema una vez finalice su diseño. Los componentes a testear se deben colocar en la superficie plana de la parte superior, en la zona inferior se ubica la interfaz de usuario y por las rendijas se extrae el calor generado desde el interior.

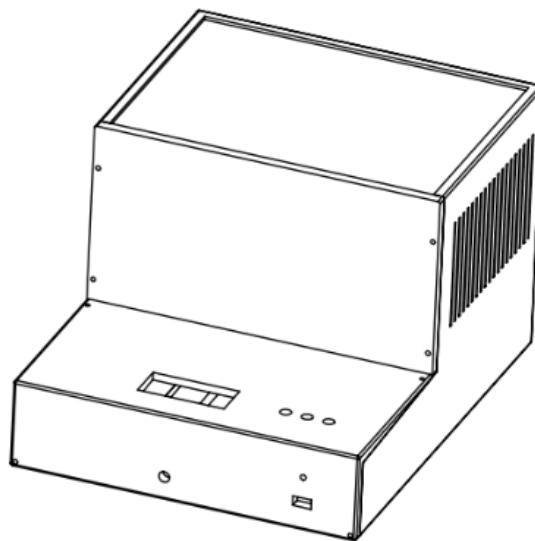


Figura 1. Plancha térmica esperada.

**Palabras clave:** Peltier, temperatura y control

## Objecte

L'empresa DAS Photonics S.L. ha decidit desenvolupar i implementar un sistema de control tèrmic d'una superfície plana amb la finalitat de ser usada en el seu laboratori d'electrònica. En aquesta, es col·locaran diferents components o sistemes per a realitzar test de vida, clicats tèrmics, qualificació d'empremtes i components, entre altres funcions.

Amb aquest objectiu en ment, en aquesta memòria s'ha proposat un sistema basat en l'ús de cèl·lules Peltier, les quals són aptes tant per a aconseguir augmentar la temperatura unes quantes desenes de graus Celsius, com també per a disminuir-la sota els 0 °C. Per al sistema de control també s'han desenvolupat diversos circuits per a mesurar la temperatura en diversos punts del sistema.

Perquè l'usuari pugui decidir el funcionament d'aquesta planxa tèrmica, s'ha implementat una interfície d'usuari mitjançant una pantalla LCD, botons i un LED d'encés. Aprofitant aquesta tècnica d'escalfament, s'ha dissenyat una carcassa externa per a concebre un sistema portàtil que siga fàcil de transportar i emmagatzemar per a l'empresa.

En la figura 1 és possible veure quin aspecte ha de tenir el sistema una vegada finalitze el seu disseny. Els components que es desitgen comprovar hauran de ser col·locats en la superfície plana de la part superior, en la zona inferior s'ubica la interfície d'usuari i per les esletxes s'extrau la calor generat des de l'interior.

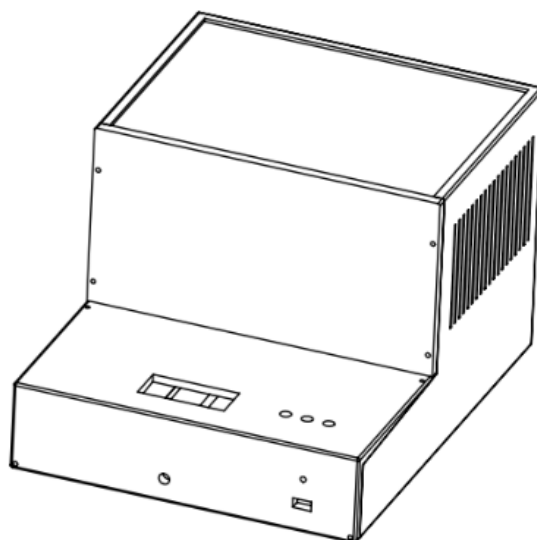


Figura 1. Planxa tèrmica esperada.

**Palabras clave:** Peltier, temperatura y control

## Object

The company DAS Photonics S.L. has decided to develop and introduce a thermal control system for a flat surface in order to use it in their electronics laboratory. On the surface, different components or systems will be placed to carry out, among other functions, life tests, thermal cycles, footprints qualifications and components.

To this end, this dissertation contains a system based on the use of Peltier cells, which are capable of raising the temperature by dozens of degrees Celsius as well as dropping it around the freezing point. For the control system, a couple of loops have been created to measure the temperature of some points of the system.

For the user to decide the functioning of the thermic plate, a user interface with an LCD screen, buttons and a power LED have been implemented. Taking advantage of this heating mechanism, an outer casing has been designed to enable a portable system to be easy to move and store for the company.

It is possible to see the expected look of the final system in picture number 1. When the testing of components is desired, these must be placed in the upper part. The user interface is placed in the lower part and the heat generated inside the system is ejected by the slits.



Picture 1. Expected thermal plate.

**Key words:** Peltier, temperature and control

## **2. Antecedentes**

El responsable del área de espacio del departamento de tecnología de la empresa DAS Photonics ha indicado la necesidad de una plancha térmica para su uso en test de temperaturas para componentes electrónicos en el laboratorio.

Se ha elaborado una serie de propuestas que dicho proyecto debe cumplir como un tamaño y peso compatibles para su uso portátil. También se ha pedido que el sistema tenga cierta precisión para la correcta manipulación de la temperatura que se pretende conseguir en la plancha térmica.

Existen unas cuantas exigencias en el mercado respecto a este tipo de productos relacionado sobre todo a la potencia en la que opera el sistema. Estas exigencias se van a tratar en el estudio de necesidades, el cuál comprende las especificaciones relacionadas con la calidad del sistema en su conjunto.

### **2.1. Funcionalidad del sistema**

Las células Peltier usadas pueden funcionar tanto para enfriar como para calentar gracias al efecto que lleva su mismo nombre y que permite que funcionen como bomba de calor activa de estado sólido transfiriendo calor de un lado del dispositivo a otro, dependiendo del sentido de la corriente. Para esta aplicación, se puede usar un controlador de temperatura para aprovechar dicha característica.

Aunque es verdad que frente a otros tipos de bombas de calor tiene un alto coste y bajo rendimiento energéticos como sus mayores desventajas, hay que considerar como principales ventajas la ausencia de piezas móviles o líquido circulante, su pequeño tamaño, forma flexible, larga vida útil y su invulnerabilidad a fugas.

Este sistema requiere manejar cierta potencia energética para poder alcanzar el rango de temperaturas deseable pero además también debe ser compacto y ligero para poder ser portátil. Por lo cual, el uso de células Peltier resulta viable en este caso.

### **2.2. Células Peltier**

El físico Jean Charles Peltier a lo largo de sus investigaciones en electricidad descubrió el efecto Peltier en 1834 en base al trabajo previo del físico alemán Seebeck T. J. el cuál observó que en dos uniones soldadas con distinta temperatura se genera una diferencia de potencial. El efecto Peltier se basa en hacer circular una corriente por las uniones de distintos materiales a la misma temperatura provocando el efecto inverso al Seebeck absorbiendo calor por una parte y desprendiéndose por la otra. Hoy en día se aplica dicho efecto Peltier sobre pequeños materiales semiconductores de Teluro y Bismuto para ser de tipo P o N constituyéndose así las células Peltier. Aplicando una corriente de polaridad positiva en el lado del material N la placa interna de cobre de la parte superior enfría y si se invierte la polaridad pasa a calentar.



Dichas células tienen un amplio abanico de tamaños desde unos pocos milímetros de lado a unos cuantos centímetros.

En la actualidad las principales aplicaciones de las células Peltier se encuentran en neveras y objetos portátiles, disipadores de diversos componentes electrónicos o en calentadores de comida. Sin embargo, existen múltiples estudios en desarrollo tanto en centros de investigación como en empresas privadas alrededor del mundo para tratar de descubrir cómo aumentar la efectividad de las células Peltier y poder sustituir de una manera más rentable las máquinas térmicas para algunos casos.

En la figura 2 se puede apreciar las dos caras que tiene una célula Peltier y la diferencia de temperatura entre las dos caras se le llama delta de temperatura.

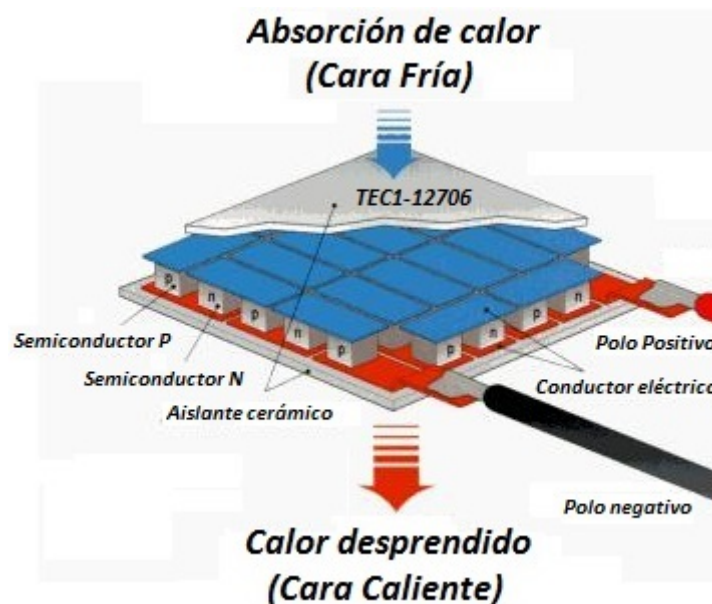


Figura 2. Caras de una célula Peltier (*Generar Frío Con Una Célula Peltier Cerámica TEC1-12706*, 2016).

### **3. Estudio de necesidades**

#### **3.1. Matriz de especificaciones.**

En la tabla 2 se indican las especificaciones técnicas que debe cumplir el sistema:

<b>Especificaciones del sistema:</b>
1. Debe ser capaz de alcanzar un rango de temperaturas de -10 a 100 °C en la superficie metálica superior sin carga en ella.
2. Los circuitos de medición de la temperatura deben poseer una tolerancia máxima de error de $\pm 4$ °C.
3. Debe consumir un mínimo de 700 W de potencia para poder alcanzar el rango de temperaturas requeridas por el usuario.
4. La disipación de calor debe ser forzada, mediante el uso de ventiladores y disipadores.
5. Se debe incluir una sonda de temperatura externa para poder medir la temperatura de los componentes colocados en la parte superior de la superficie metálica plana.
6. Para mejorar el sistema de control se debe implementar un regulador PI o PID para maximizar la eficiencia del sistema.
7. Debe tener unas dimensiones iguales o inferiores a 400 x 400 x 300 mm y un peso inferior a 15 kg.
8. Debe mantener unos principios mínimos de seguridad e integridad para el usuario.
9. Debe tener una vida útil superior a 7 años.
10. La fuente de alimentación primaria debe ser obtenida a partir de la red eléctrica.
11. El usuario debe ser capaz de programar temperatura objetivo con la interfaz de usuario de manera sencilla.

Tabla 2. Matriz de especificaciones.

La especificación 7 de la tabla 2 acerca del tamaño y proporciones del sistema, se pretende conseguir unas dimensiones aproximadas a las de una caja de cartón de tamaño medio y un peso inferior a 15 kg como referencia para que de esta manera pueda ser fácil de transportar. La superficie plana debe ser comparable a un tamaño A4.

La especificación 8 sobre los principios de seguridad para el usuario, debe garantizar que éste no pueda sufrir daños derivados de la corriente eléctrica entre otros o de la propia forma de la estructura exterior del sistema, como los bordes en las esquinas o el tamaño de las rendijas.

El sistema basado en estas especificaciones está diseñado para su uso en salas limpias convencionales, con una temperatura ambiente de 22 °C y un margen de  $\pm 3$  °C.

### 3.2. Diagrama de etapas de diseño.

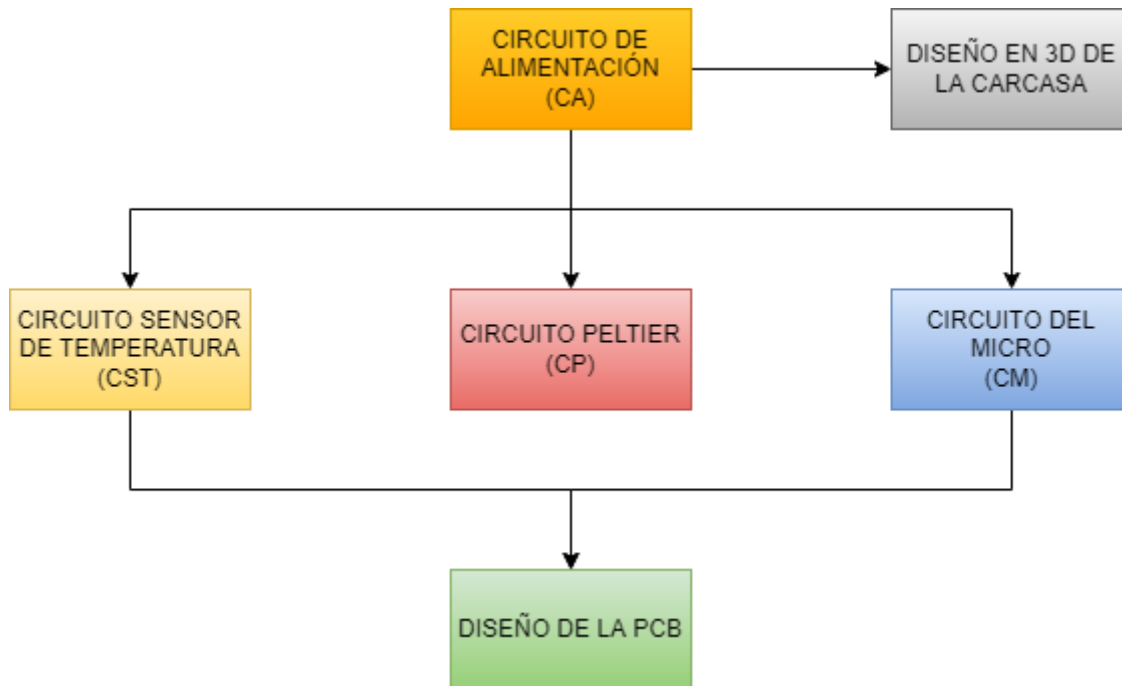


Figura 3. Diagrama de etapas de diseño del sistema.

En la figura 3 se puede observar el diagrama de las etapas del diseño de este sistema. La estructura y conexiones entre bloques se indica en las figuras posteriores, pero se mantiene la nomenclatura.

En resumen, el bloque CA se encarga de alimentar al resto de los bloques y por ende configurar el tamaño de la carcasa al ser los elementos que más espacio ocupan junto con la plancha a calentar y el disipador, por tanto, es el bloque más indispensable y el primero en diseñar.

El CP vendría a ser el circuito actuador sobre la temperatura, el CST son los circuitos para medir la temperatura en varios puntos y por último el CM que cumple con las funciones de control y de una interfaz para el usuario. Estos tres bloques tienen la misma importancia ya que se deben complementar entre ellos para realizar las funciones del sistema.

Por último, para complementar este diseño, se ha realizado un boceto en 3D mediante SolidWorks como una propuesta para mostrar cómo sería la distribución interior y también se ha ruteado una PCB mediante el programa Altium con componentes de los circuitos CM y CST que deben estar soldados a ella, todo adjuntado en los planos.

## 4. Alternativas y solución adoptada

### 4.1 Puntos de diseño a contemplar.

En la figura 4 se muestra el diagrama de bloques del sistema y la relación de los distintos bloques entre sí, siguiendo la misma denominación que en la figura 3. El CA alimenta a todo el circuito a partir de la tensión de la red, el CP varía la temperatura en la superficie metálica, el CST proporciona información de la temperatura al CM y éste controla el CP.

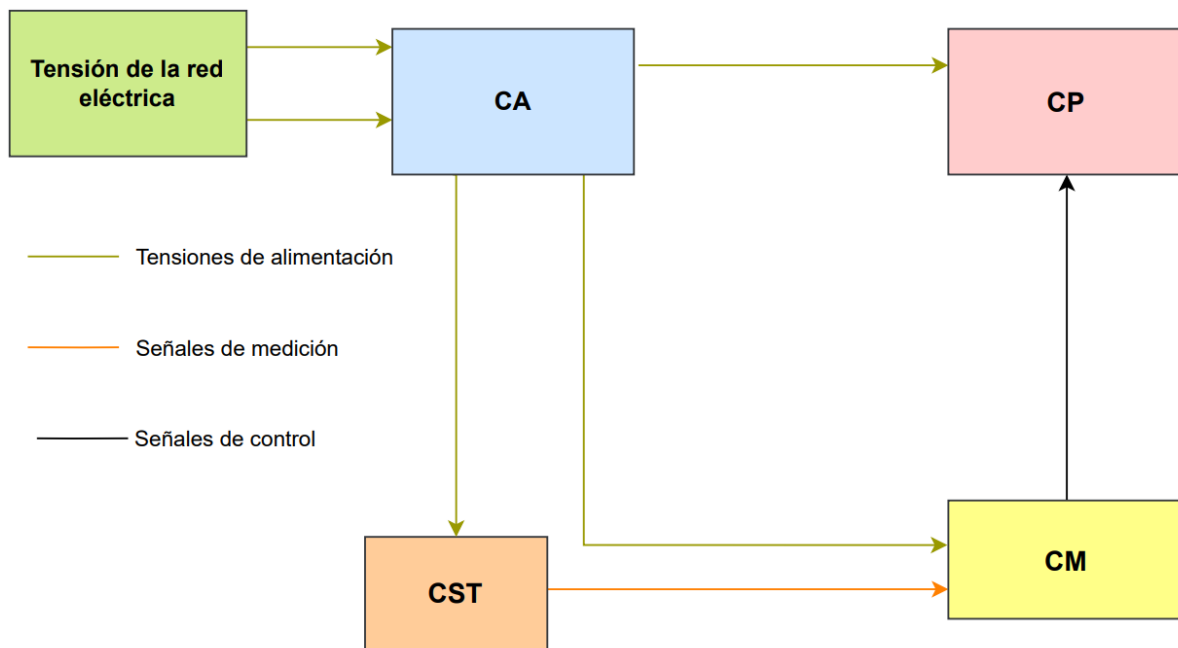


Figura 4. Diagrama de bloques.

Se indica en una lista con los aspectos de diseño más importantes de cada bloque para desempeñar las funciones descritas y su justificación en el siguiente apartado.

- **CP:**

- Gestión de la corriente máxima en las células Peltier.
- Potencia generada por el conjunto de las células Peltier.
- Componentes para controlar la señal PWM que regulan las células Peltier.
- Tipo de disipador.

- **CA:**

- Adecuación de las tensiones necesarias para los circuitos.

- **CM:**
  - Selección de componentes para la interfaz de usuario.
  - Elección del regulador PI.
  - Elección del microcontrolador.
  
- **Carcasa:**
  - Selección de material de la carcasa.
  
- **CST:**
  - Tipo de sensor de temperatura.
  - Elemento regulador de tensión para el circuito sensor de temperatura.
  - Adecuación del rango de medida.

## **4.2 Justificación de la solución adoptada.**

### **4.2.1 CP**

Para la implementación del CP del plano 2 se ha tenido en cuenta la corriente, tensión y potencia máximas que puede soportar cada célula Peltier. Como se opera en un rango amplio de temperaturas, la potencia máxima de las células Peltier elegidas son 196 W cada una. Atendiendo a los tipos de convertidores en el mercado y poder alcanzar un compromiso óptimo entre calor generado, consumo y pérdidas, se ha decidido implementar 4 células Peltier para sobrepasar los 700 W de potencia máxima en el sistema y escogiendo un convertidor de hasta 1.2 kW de potencia y un máximo de 25 A para que pueda operar sin problemas.

Las células Peltier pueden generar frío o calor dependiendo del sentido de la corriente que circule por ellas. Para conseguir tal objetivo se implementan “switch” de estado sólido controlados por señales PWM para la conmutación de la corriente. Las señales PWM son señales con dos niveles de voltaje, en este caso de 0 y +5 V, la cual no es continua como tal sino que funciona en base a ciclos de trabajo que alternan los dos niveles y son controladas por el circuito CM.

Los MOSFET de potencia también serían válidos para este fin sustituyendo a los “switch” de estado sólido, comercialmente tienen un precio semejante pero presenta el problema de tener que diseñar un driver específico para su funcionamiento. Por tanto, se opta por los “switch” de estado sólido.

Respecto al disipador, se ha optado por utilizar un disipador de tipo “Pin Fin”, ya que los de este tipo con un ventilador cercano a él permite conducir mejor el caudal del aire frente a otros tipos de disipadores y por tanto resulta más efectivo para esta aplicación.

### 4.2.2 CA

Para las distintas fuentes de energía con la magnitud deseada en los distintos bloques del sistema a partir de la energía de la corriente eléctrica de la red, se opta por implementar los componentes indicados en la figura 5 un filtro de red con un “switch” de encendido del sistema y un bloque de diseño entero con el circuito de alimentación para lograr las tensiones de continua adecuadas mediante convertidores de AC/ DC, DC/DC y LDO atendiendo a los modelos comerciales.

Aunque si bien es cierto que se puede hacer uso de baterías para alimentar los circuitos CST y CM ya que no consumen mucha potencia, se ha preferido implementar los LDO debido a su bajo coste. Además, es una opción más viable teniendo en cuenta la necesidad de utilizar los otros convertidores que soportan la potencia requerida para el circuito CP y los ventiladores.

### 4.2.3 CM

Para la elección de la interfaz de usuario, en el plano 3 se implementan dispositivos sencillos y de bajo coste con la finalidad de hacer amena y sencilla la interacción del usuario con el sistema. Para ello destacan el uso de dos pulsadores para elegir la temperatura objetivo, una pantalla LCD para mostrar las temperaturas y un LED de encendido del sistema.

Respecto al sistema de control, un regulador PI se decanta como la mejor opción ya que no es necesaria la acción de un regulador PID y el sistema resultante ofrece una buena estabilidad. Estas características se verán reflejadas y demostradas en su respectivo apartado.

Aunque una regulación de la temperatura mediante la técnica ON/OFF (todo o nada) es asumible, el regulador PI es una mejor opción ya que ofrece mayor precisión y por eso es usado en la mayoría de casos en detrimento del controlador ON/OFF.

Se ha decidido emplear un Arduino UNO modelo R3 por su bajo coste, facilidad de programación y tener todos los periféricos adecuados para las funciones a realizar en vez de otro tipo de microcontroladores con las mismas funciones para este caso pero de mayor coste como los DSC.

### 4.2.4 Carcasa

Para el diseño de la carcasa se debe tener en cuenta que se van a manejar unos valores de intensidad relativamente altos además de alcanzar hasta unas temperaturas superiores a los 70 °C, a esta temperatura en la superficie plana de metal el usuario puede quemar la piel al estar en contacto. Por tanto, para la carcasa se ha optado por un diseño fabricado con un material eléctricamente aislante y de poco coste como el plástico ABS. Es importante recomendar de igual manera el uso de guantes de protección por motivos de seguridad.

#### 4.2.5 CST

Entre las alternativas contempladas para el tipo de sensor, entre otras cosas del circuito del plano 1, se ha decidido implementar dos resistencias RTD de platino en un puente Wheatstone por varias razones:

1- Es el tipo de sensor más común en este tipo de sistemas que existen actualmente en el mercado.

2- Mediante un puente de Wheatstone con salida diferencial se puede obtener una salida más lineal y precisa que con una sola RTD y estar dentro del rango de temperaturas de operación

3- Resulta óptimo de cara a la implementación del controlador PI posterior ya que precisa partir de un sistema continuo y requerir una señal lineal

4- Tiene un bajo coste para el pequeño tamaño y precisión que pueden ofrecer.

Las RTD escogidas son las Pt100 de platino de película metálica al ser de un tamaño pequeño y presentar mayor linealidad, estabilidad, pasividad química y mayor resistencia a la contaminación que las RTD de níquel o cobre. Las NTC, aunque sean de menor coste, para este caso presentan demasiada sensibilidad en la medida, desde pocos ohmios hasta más de 80 k $\Omega$  y los otros tipos de sensores como termopares o sensores integrados no son tan compatibles para este sistema como las RTD ya sea por linealidad o exactitud.

Aunque en este diseño se emplea un LDO con intensidad constante para que no varíe el diferencial de voltaje obtenido en las RTD, se ha decidido emplear un AO de la forma indicada en la etapa de diseño para asegurar esta característica.

Debido a que el sistema de medida no entra en el rango de admisión del microcontrolador se le añade una etapa de desplazamiento al final, si se aplica el desplazamiento en la etapa diferencial, éste sería posteriormente filtrado y de cara a la estabilidad del PI haría del sistema uno no lineal y sería más difícil suprimir ese desplazamiento filtrado por vía software debido a los efectos del filtro.

Por último, se ha decidido emplear tres circuitos de temperatura en total con el mismo diseño. Esto es debido a que se necesita conocer la temperatura en la plancha de aluminio para regular la potencia de las células Peltier. Otro para conocer la temperatura en el disipador en caso de que a posteriori del diseño realizado el usuario quiera regular el caudal del aire de los ventiladores para alcanzar altas temperaturas más rápidamente. Y un último para que el usuario sepa la temperatura a la que está el objeto que va a medir mediante una sonda de temperatura.

## **5. Descripción detallada de la solución y su justificación**

### **5.1 Introducción y descripción de la aplicación**

Se plantea una propuesta de diseño para poder controlar y monitorizar dicha temperatura sobre una superficie plana de metal. La solución de este diseño pasa por los cuatro grandes bloques indicados anteriormente en la figura 4 que a su vez se dividen en varios subsistemas.

El bloque CA consiste en conseguir todas las tensiones de alimentación y de referencia para todo el sistema, tanto para el circuito eléctrico para las células Peltier como para el circuito sensor de temperatura, microcontrolador y ventiladores.

El bloque CP incluye el diseño del entorno de las células Peltier. Este bloque se divide en dos subsistemas: el diseño del circuito de alimentación de las células Peltier y otro para su correcta disipación térmica.

El bloque CST especifica el diseño del circuito del sensor de temperatura, que es el mismo tanto para el sensor interno como para la sonda externa y el disipador. Este bloque se divide en una etapa diferencial, una de amplificación y un filtro antes de que la señal pase al controlador.

El bloque CM consiste en la programación del control de temperatura. En él se implementa un circuito que permite la visualización de la temperatura en la superficie metálica al igual que de la sonda de temperatura externa a través de una pantalla LCD, la manipulación de la rampa de temperatura deseada por el usuario, la recepción de las señales recibidas de los sensores de temperatura y la programación del controlador PI.

La estructura seguida en este documento empieza por la descripción de la metodología seguida en cada bloque con esquemas orientativos, sus diferentes análisis al final de este apartado, las hojas de características de los componentes y los códigos implementados en el anexo, y por último los esquemáticos eléctricos y distribución física en los planos.



## 5.2. Diseño

### 5.2.1. Circuito de Alimentación (CA)

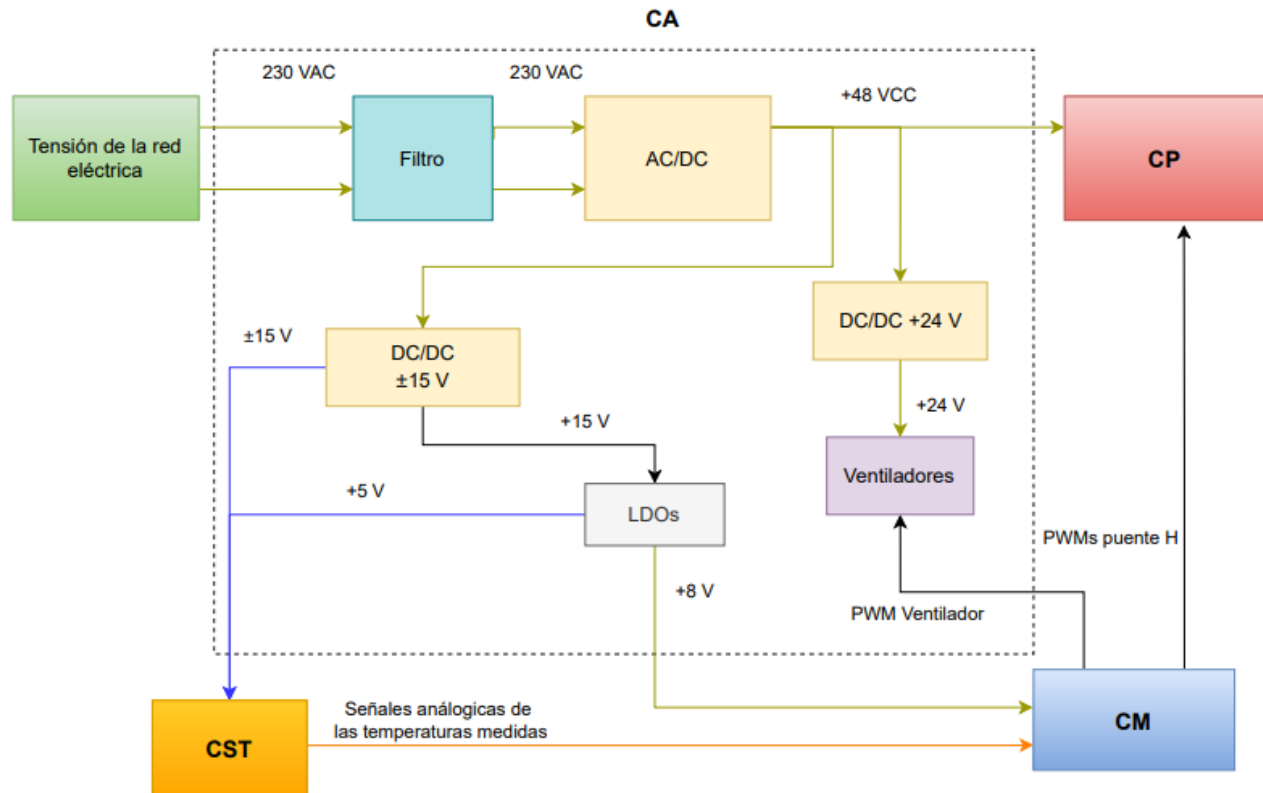


Figura 5. Esquema del sistema de alimentación.

El esquema a seguir es el indicado en la figura 5 donde los elementos del cuadrado en línea discontinua son los elementos internos del CA y los otros cuadros resaltados en negrita son los otros bloques de diseño.

Se parte de la tensión de la red eléctrica de 230 V de alterna y 16 A máximos, siguiendo la normativa elaborada por la Comisión Electrotécnica Internacional de los enchufes de tipo C. Esta tensión alterna pasa primero por un filtro comercial antes de pasar al convertidor AC/DC. Dicho filtro debe tener un interruptor para el apagado y encendido del sistema, su hoja de características está referenciada en el punto 6.2 de la bibliografía al igual que el de todos los componentes que se van a mencionar en este documento.

En el convertidor de AC/DC se consigue una conversión a 48 V de continua que alimenta tanto al circuito CP como a los demás convertidores. Se debe tener en cuenta su consumo máximo, el circuito CP consume poco menos de 800 W para llegar a las temperaturas deseadas y se estima un consumo global menor de 1000 W.

Este convertidor AC/DC debe alimentar también a un convertidor DC/DC de 24 V que se encarga de alimentar los dos ventiladores del sistema de disipación. Se estima un consumo menor de 150 W.

Adicionalmente se necesita otro convertidor DC/DC para conseguir dos salidas de +15 y -15 V respectivamente ya que su uso consiste en alimentar los amplificadores operacionales y el amplificador de instrumentación de los dos circuitos de temperatura. A su vez, éste alimenta unos LDO de 5 V y 8 V para conseguir la fuente de referencia del puente Wheatstone, el offset en el circuito de temperatura de 1 V y poder alimentar el microcontrolador. Como estos elementos consumen muy poca potencia en relación con la potencia del convertidor AC/DC se considera despreciable.

Por último, a la salida del convertidor de  $\pm 15$  V se incluye un pequeño filtro EMC como en la figura 6.

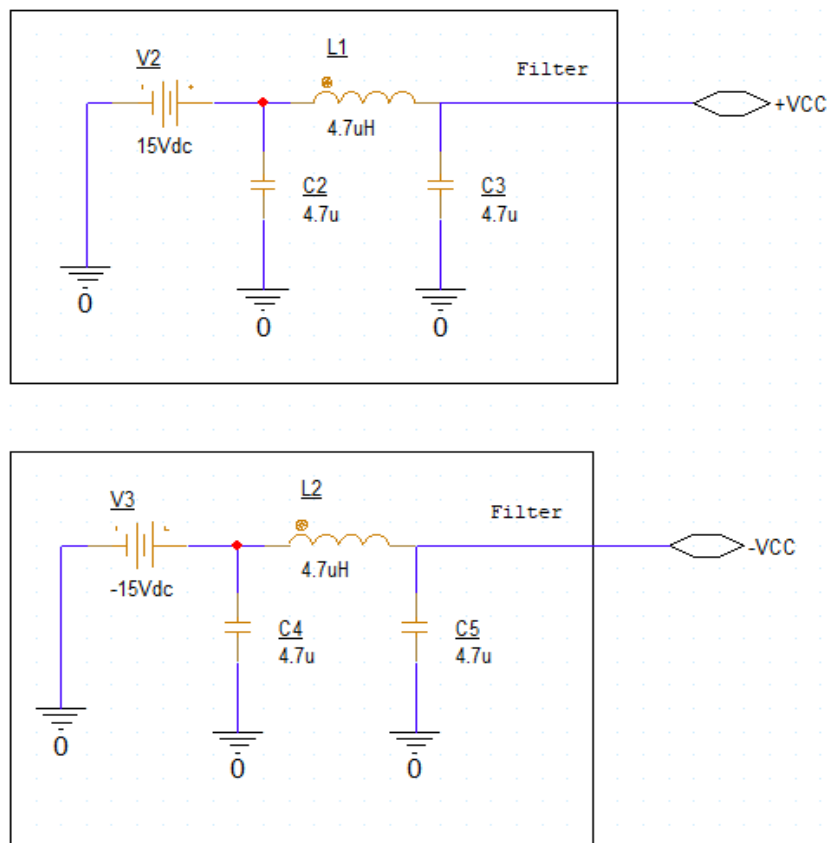


Figura 6. Filtro a la salida de los convertidores.

### 5.2.2. Circuito Peltier (CP).

Primero, se designa cómo y en qué condiciones van a poder operar las células Peltier de forma nominal. Las células Peltier trabajan con tensiones de continua, pero se pueden utilizar señales PWM mediante los “switch” de estado sólido para mejorar la eficiencia del sistema completo y decidir con qué comportamiento funcionan. Por tanto hay que diseñar el circuito para establecer una cierta magnitud de corriente que circule por las células Peltier y que mediante los disparos del microcontrolador se varíen los ciclos de trabajo en los “switch”, permitiendo que las células Peltier extraigan la potencia específica para alcanzar la temperatura designada como objetivo mediante el 100 % del ciclo de trabajo, o mantener la temperatura reduciéndolo y reducir así la potencia media consumida tal y como se indica en la tabla 3 al final del apartado.

Se necesita también un sistema de disipación de calor para no sobrecalentar las células Peltier, evitar daños internos, mantener la cara fría a temperatura constante y además de asegurar una correcta transmisión del calor generado en la superficie de metal donde se depositan los componentes.

La forma que tiene el conexionado de este bloque es el mostrado en la figura 7 extraída del plano 2 . Las referencias de esta figura son las mismas que las de los planos en la tabla 32.

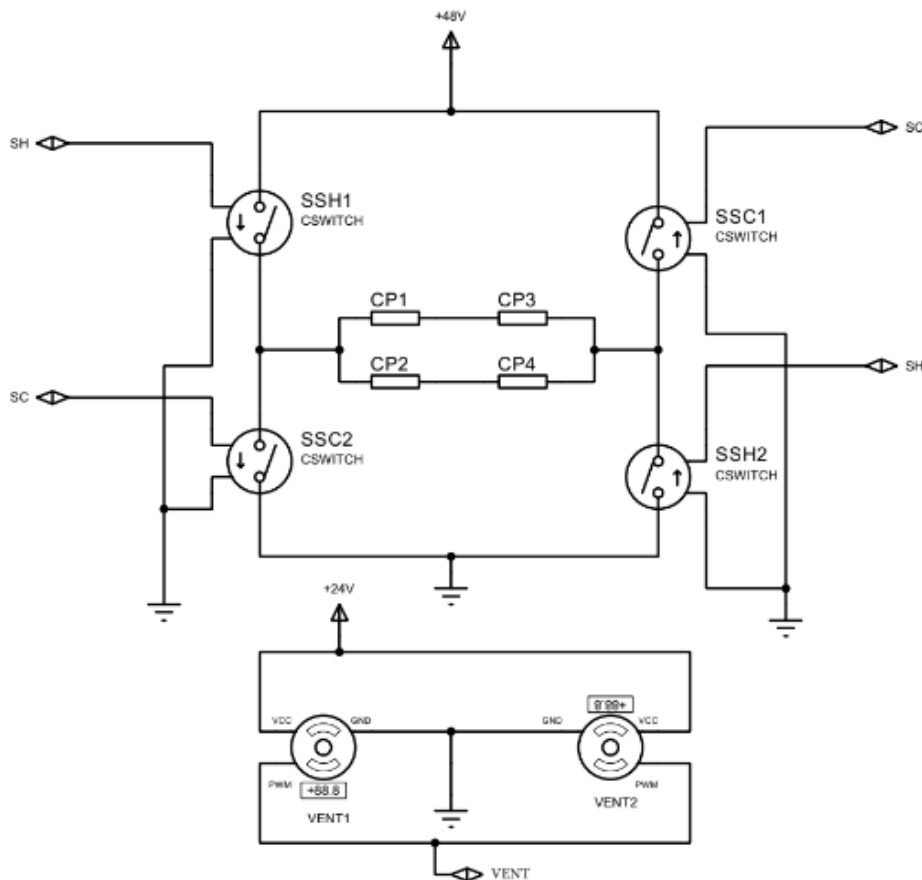
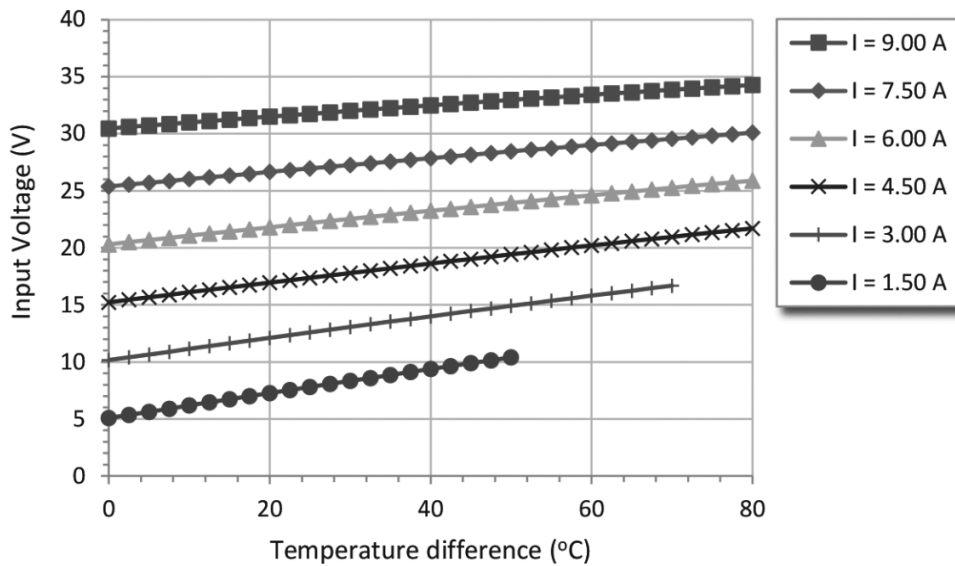


Figura 7. Esquema del CP.

### 5.2.2.1. Sistema eléctrico

Para el sistema de alimentación de las células Peltier se ha escogido un convertidor AC/DC como fuente de alimentación para este circuito al cuál proporciona +48 V constantes. Observando la gráfica 1 dada por el fabricante, se relaciona la tensión de entrada con el delta de temperatura a partir de la corriente que circula por la célula Peltier, se concluye que la resistencia óhmica interna de la célula Peltier varía en función de la temperatura.



Gráfica 1. Tensión de entrada respecto al delta de temperatura a 25°C (*Peltier Cooler-196W*, 2021)

Mediante la teoría de circuitos se diseña el circuito de asociación de las células Peltier.

Ley de Ohm:

$$V = I \cdot R$$

(Ec. 1.1)

Teorema de Thevenin:

$$V_{rama} = I_{rama} \cdot R_{eq}$$

(Ec. 1.2)

Ley de Kirchoff:

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 + I_n = 0$$

(Ec. 1.3)

Se pretende escoger un valor de intensidad por debajo de la pendiente de 9 A de intensidad circulante de la gráfica 1. Esto es debido a que no interesa que las células trabajen al tope de su intensidad máxima ya que puede acortar su vida útil, además de posibles incrementos puntuales que puedan ocasionar sobrecorrientes por conmutación. También hay que tener en cuenta que el convertidor posee una intensidad máxima de salida, que en caso de sobrepasarse puede dañarse fatalmente y por ende el sistema entero.

Con la ecuación 1.2 y las asociaciones de circuitos equivalentes como en la figura 8, si se colocan 2 células Peltier de las escogidas en serie, en una rama se consigue 7.74 A de intensidad circulante y un valor nominal máximo de  $3.1 \Omega$  de resistencia, la cuál es próxima a la planteada. Esta resistencia óhmica interna varía con el delta de temperatura entre las dos caras.

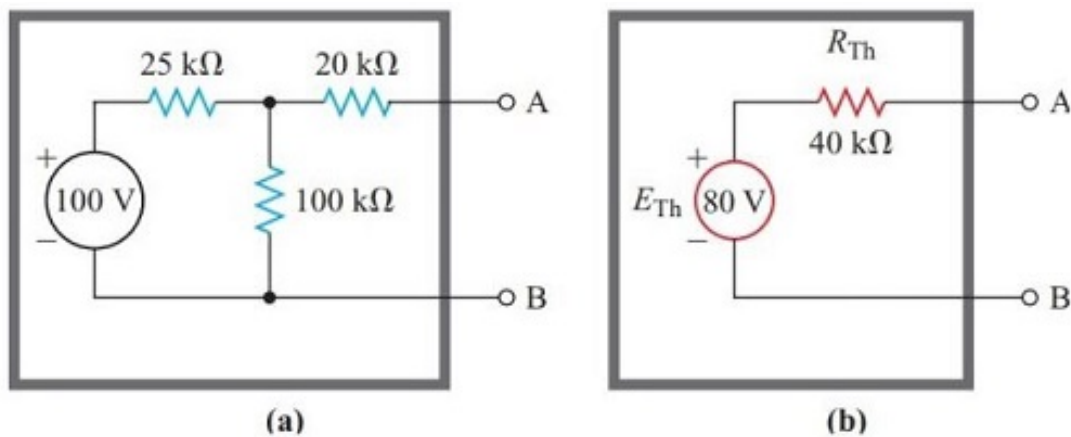
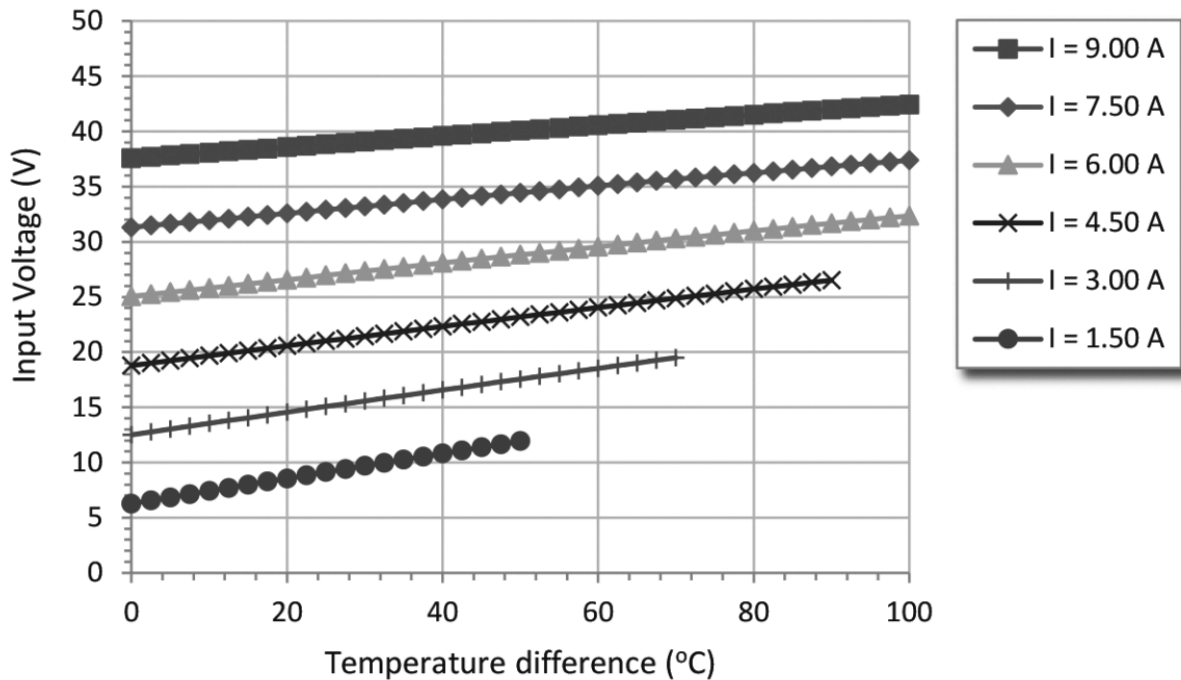


Figura 8. Ejemplo del teorema de Thevenin (Teorema De Thevenin Explicado, 2019).

Por tanto, suponiendo una tensión fija de 24 V para cada célula Peltier de la rama y un delta máximo de 60 °C de temperatura operativos, según la gráfica 1, la corriente oscila entre 7.5 y 6 A cuando la temperatura de la cara caliente está a 25 °C y entre 6 y 4.5 A observando la gráfica 2, que muestra los mismos parámetros pero a 75 °C la cara caliente.

Viendo la tendencia de la corriente a decrementar a medida que aumenta la temperatura de la cara caliente, se estima una corriente un poco inferior para el caso en el que se desee obtener 100 °C en la plancha de aluminio aunque no de forma significativa.



Gráfica 2. Tensión de entrada respecto al delta de temperatura a 75°C (*Peltier Cooler-196W*, 2021)

De la misma manera que la intensidad disminuye, la resistencia aumenta por la ley de Ohm (Ec 1.1). Entonces, si el rango de intensidad es de 7.5 a 4.5 A en decremento respecto a la temperatura, el rango de resistencias comprende de 3.2 a 5.3  $\Omega$ , incrementándose de manera poco significativa para el caso más extremo.

Conociendo estos datos y aplicando la ecuación 1.4 (W) se puede conocer el rango de potencia eléctrica que consume la célula Peltier:

$$P = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}$$

(Ec. 1.4)

Teniendo en cuenta el caso más desfavorable de consumo, es decir, el caso con mayor intensidad a 25 °C, la potencia por célula Peltier máxima ascendería a 180 W y se vería reducida a poco menos de 100 W cuando el sistema alcance la máxima temperatura en la cara caliente.

Asociando las células Peltier en dos ramas con dos células en cada una se consigue optimizar la energía proveniente del convertidor quedando de la forma igual a la figura 33.

Mediante la aplicación de la ley de Kirchoff (Ec 1.3) que relaciona la suma de las intensidades de todas las ramas en paralelo, se obtiene que la intensidad total máxima que circulará por el convertidor, la cuál es de 15 A con una potencia global de 710 W aproximadamente. Tanto esta intensidad como la potencia se encuentran por debajo de los

valores máximos que puede soportar el convertidor y cumplen con las especificaciones requeridas por el sistema.

Una vez designados los parámetros de operación de las células Peltier, se plantea un conexionado en forma de puente en “H” con la forma de la figura 9 donde los “switch” remarcados en rojo son los que están funcionando en cada caso.

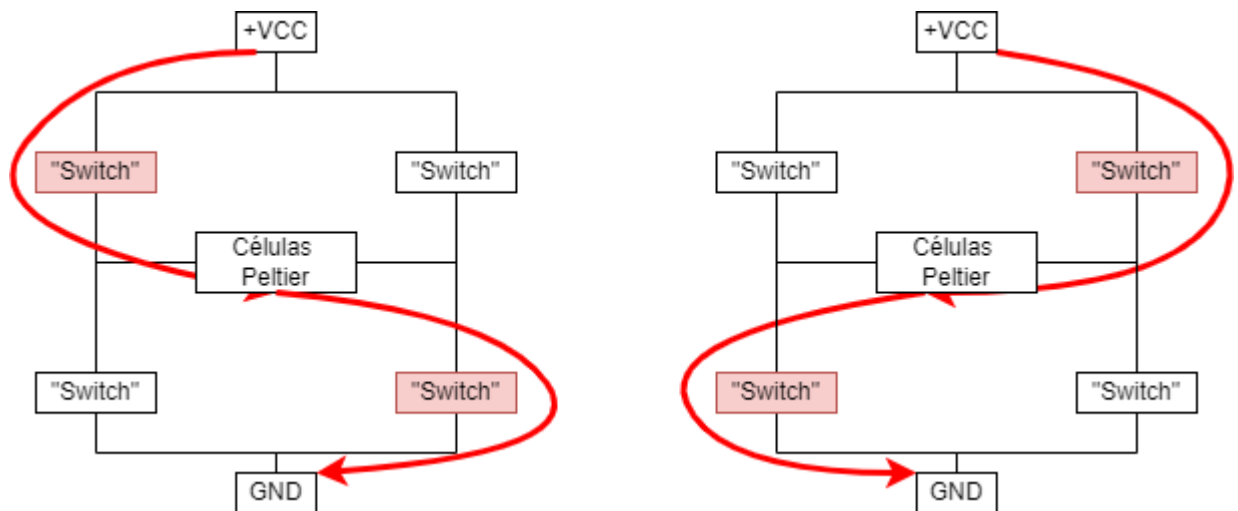


Figura 9. Ejemplo de puente en “H”.

Con el conexionado en puente “H” los “switch” interactúan entre ellos a modo de conmutación mediante dos señales PWM programadas por el microcontrolador, el cuál compara el valor deseado de temperatura con la temperatura en la plancha y regula el sentido de la corriente para que las células Peltier calienten o enfríen la cara de aluminio.

En la figura 10 +VCC se corresponde con la alimentación de +48 V del convertidor y GND con la conexión a masa de la PCB. Basándose en la figura 9, estos sentidos de las corrientes son los mismos para la figura 10.

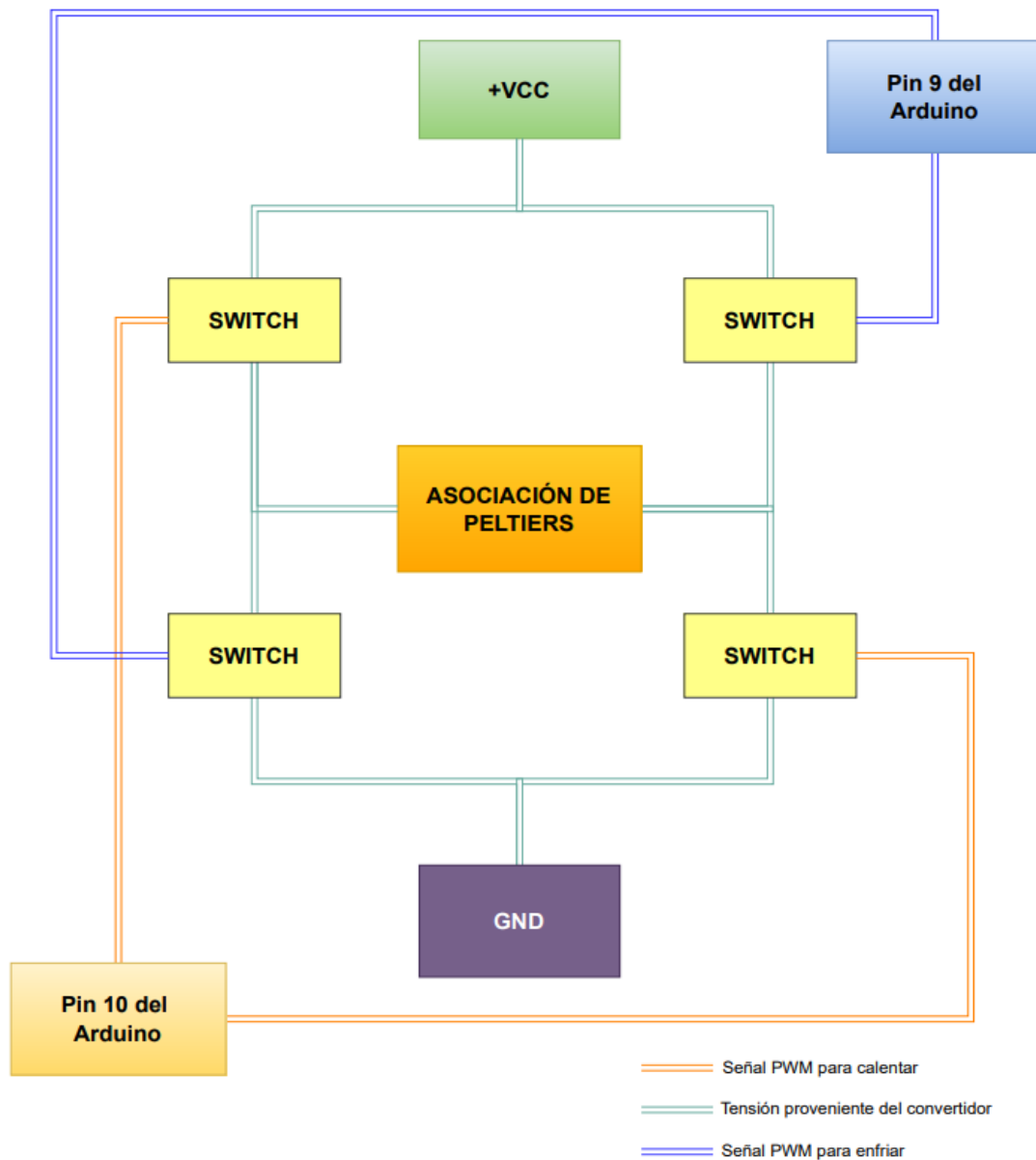


Figura 10. Control del puente en “H” del CP

Además, la velocidad de conmutación de los “switch” de estado sólido es compatible con la del microcontrolador por lo que para la conmutación del puente en “ H ” tiene efectos instantáneos.

Esto también quiere decir que el sistema tiene un gasto energético en función del PWM de las señales. El consumo estimado de forma aproximada para puntos de referencia estáticos por cada célula Peltier se indica en la tabla 3. Dicha potencia se ha obtenido aplicando la ecuación 1.4 (W).



PWM	V	I media 25 °C (A)	P media 25 °C (W)	I media 75 °C (A)	P media 75 °C (W)
99%	24	7.43	176.42	5.94	112.91
75%	24	5.63	101.25	4.50	64.80
50%	24	3.75	45.00	3.00	28.80
25%	24	1.88	11.25	1.50	7.20
5%	24	0.38	0.45	0.30	0.29

Tabla 3. Consumo de las células Peltier según el PWM.

### 5.2.2.2. Sistema de disipación.

Este sistema está constituido por una placa de aluminio en la parte externa superior del conjunto. Esta placa es el principal objeto a calentar/enfriar y por ello se colocan las células Peltier junto a ella para maximizar la transferencia. Las células Peltier trabajan según un delta de temperatura, por lo tanto se debe colocar un sistema de disipación para mantener a temperatura constante una de sus caras.

El sistema de disipación está conformado por unos ventiladores compatibles con modulación PWM que son vigilados mediante un control de temperatura programado por un microcontrolador para trabajar en el ciclo de trabajo deseado, sea del 100 % como se ha contemplado, o si el usuario quisiera reprogramarlo a posteriori. El objetivo de estos ventiladores es refrigerar las células Peltier mediante transferencia de calor por convección forzada de aire. Para mejorar este efecto se coloca antes un disipador de tipo “Pin Fin”.

Adicionalmente se colocan en ambas caras de las células Peltier una lámina de grafito con poco grosor pero con mucha conductividad térmica para mejorar así la transferencia de calor quedando como en la figura 11.

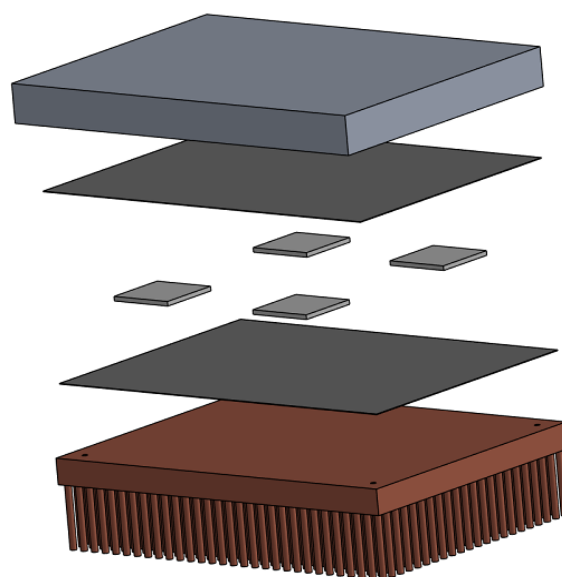


Figura 11. Montaje de las células Peltier.

### 5.2.2.2.1. Cálculo del calor absorbido por la célula Peltier.

Del sistema eléctrico se sabe aproximadamente qué potencia eléctrica máxima consume cada célula Peltier. Para conocer qué potencia calorífica se aplica en la cara caliente se deben tener en cuenta las gráficas 16, 17 y 18 proporcionadas por el fabricante indicadas en el anexo, que relacionan el calor disipado, el delta de temperatura, la intensidad por las células peltier y su tensión de alimentación.

La potencia eléctrica de cada célula Peltier es la diferencia entre el calor disipado y el absorbido, es decir, entre las dos caras:

$$P_{Peltier} = Q_{caliente} - Q_{frío}$$

(Ec. 1.5)

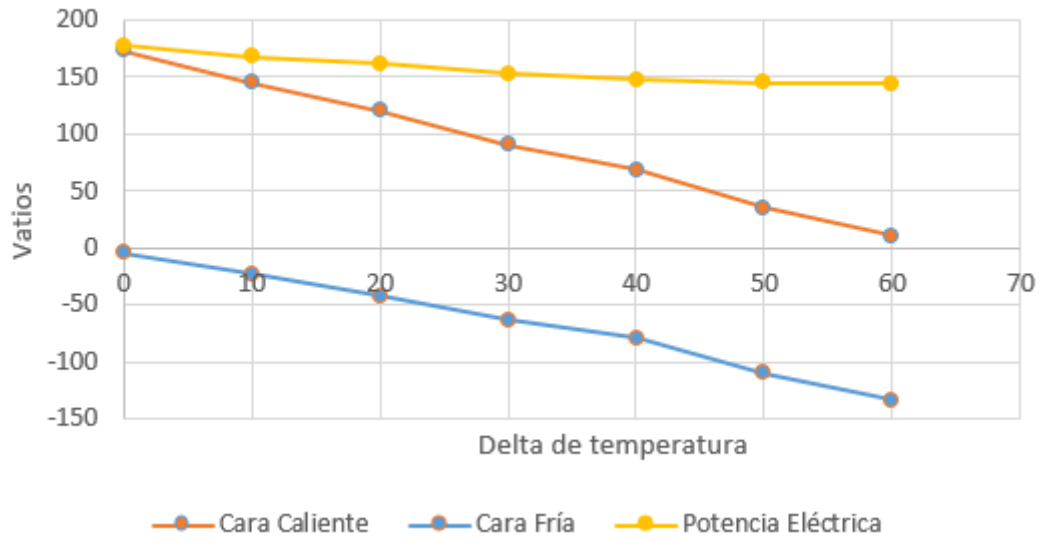
Analizando las gráficas anteriormente mencionadas y la ecuación 1.5 (W), se pueden crear unas tablas relacionando todos los parámetros necesarios para conocer el comportamiento de las células Peltier en cada situación que pueda ocurrir experimentalmente de forma aproximada.

En las tablas 4, 5 y 6 se indica la intensidad, el calor en cada cara de la célula Peltier y la potencia eléctrica consumida para cada delta de temperatura posible y con una alimentación de +24 V constante por cada una de las 4 cuatro células Peltier, también visualizado gráficamente en las gráficas 3, 4 y 5.

Cara caliente a 25 °C				
Delta de temperatura (°C)	Calor generado en la cara caliente (W)	Calor generado en la cara fría (W)	Intensidad (A)	Potencia eléctrica (W)
0	173.00	-4.60	7.40	177.60
10	145.00	-23.00	7.00	168.00
20	120.00	-42.00	6.75	162.00
30	90.00	-63.00	6.38	153.00
40	68.00	-79.60	6.15	147.60
50	35.00	-110.20	6.05	145.20
60	10.00	-134.00	6.00	144.00

Tabla 4. Calor generado a 25 °C en la cara caliente.

### Cara Caliente a 25 °C

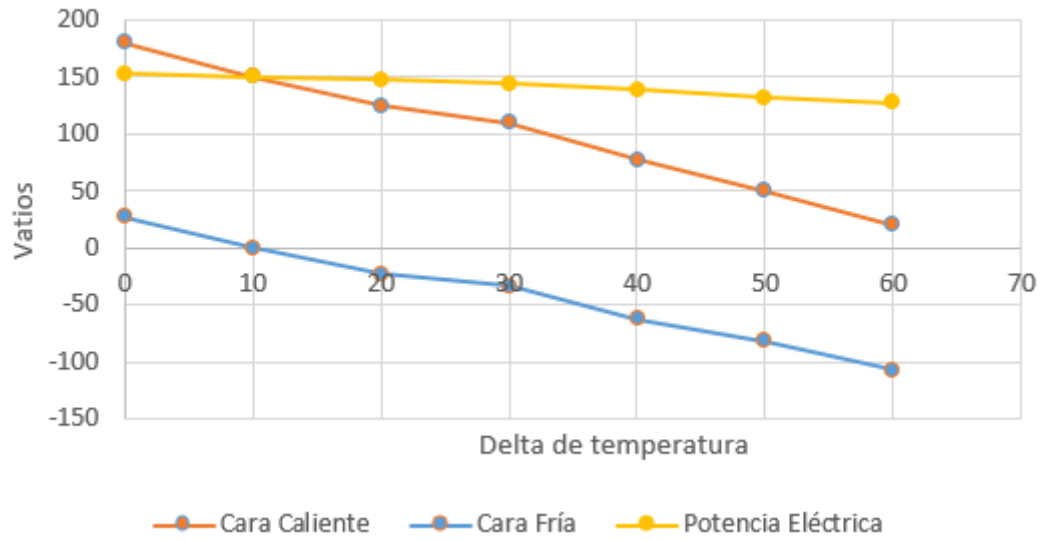


Gráfica 3. Relación Vatios/Delta con cara caliente a 25°C.

Cara caliente a 50 °C				
Delta de temperatura (°C)	Calor generado en la cara caliente (W)	Calor generado en la cara fría (W)	Intensidad (A)	Potencia eléctrica (W)
0	180.00	27.00	6.37	153.00
10	150.00	0.00	6.25	150.00
20	125.00	-22.60	6.15	147.60
30	110.00	-34.00	6.00	144.00
40	77.00	-62.20	5.80	139.20
50	50.00	-82.00	5.50	132.00
60	20.00	-107.20	5.30	127.20

Tabla 5. Calor generado a 50 °C en la cara caliente.

### Cara Caliente a 50 °C

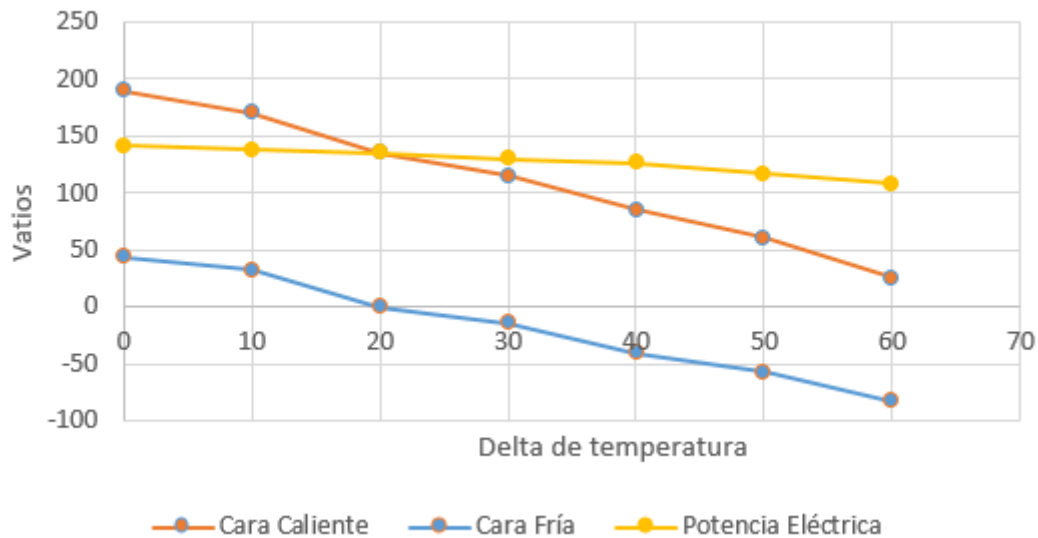


Gráfica 4. Relación Vatios/Delta con cara caliente a 50°C.

Cara caliente a 75 °C				
Delta de temperatura (°C)	Calor generado en la cara caliente (W)	Calor generado en la cara fría (W)	Intensidad (A)	Potencia eléctrica (W)
0	190.00	44.00	5.90	141.60
10	170.00	32.00	5.75	138.00
20	135.00	0.00	5.63	135.00
30	115.00	-14.60	5.40	129.60
40	85.00	-41.00	5.25	126.00
50	60.00	-57.00	4.88	117.00
60	25.00	-83.00	4.50	108.00

Tabla 6. Calor generado a 75 °C en la cara caliente.

### Cara Caliente a 75 °C



Gráfica 5. Relación Vatios/Delta con cara caliente a 75 °C.

Como se puede observar en las tablas, a mayor delta de temperatura la célula Peltier disipa menos calor. A mayor temperatura en la cara caliente, ésta disipa más calor, pero la cara fría pierde eficiencia debido a la temperatura y a la menor corriente circulante.

Esto se aplica para cada célula Peltier, por tanto, sobre la plancha de aluminio, del disipador y del convertidor, se aplican cuatro veces más vatios de los indicados en las tablas al ser cuatro células Peltier.

#### 5.2.2.2.2. Cálculo de los gradientes de temperatura.

Las células Peltier se encargan de transferir el calor de una cara a otra, por lo tanto trabajan siguiendo un delta de temperatura que aumenta según se transfiere el calor de una capa a otra en función de varios parámetros.

Para los cálculos del gradiente de temperatura entre las caras de las células Peltier y la plancha de aluminio y el disipador, se estima el calor a partir de cierto delta de temperatura. Esto es debido a que cuando el delta de temperatura de las células Peltier es bajo se disipa mayor calor pero se calientan rápidamente, por lo cual, el delta de temperatura sube rápidamente y se disipa menos calor de manera funcional, aparte de que tarda un poco en calentar los elementos.

Por tanto, se estima un delta de temperatura mínimo de operación y se calcula el gradiente de temperatura de cada una de las caras de las células Peltier hacia la plancha de aluminio y el disipador respectivamente siguiendo las leyes de transmisión de calor.

En el caso de la parte de la plancha de aluminio, ésta está conformada por la cara caliente de la célula Peltier en contacto con una lámina de grafito que a su vez está en contacto con la plancha de aluminio. Al estar en contacto todas las capas, el calor se transmite por conducción.

El delta de temperatura en la capa de aluminio se calcula conociendo primero las resistencias térmicas del propio aluminio y del papel de grafito siguiendo las dimensiones especificadas para los materiales elegidos en la ecuación 1.6 (K/W):

$$R_{th} = \frac{L}{k \cdot A}$$

(Ec. 1.6)

Siendo L el espesor, A el área y “k” la conductividad térmica de cada material, las cuáles son 205 y 1300 W/m·K para el aluminio y una lámina de grafito comercial respectivamente. El área de ambas es la misma de un A4, es decir,  $0.0624 \text{ m}^2$  y su espesor son 3 cm para el aluminio y 50 micras para el grafito.

Como resultado, el aluminio presenta una resistencia térmica de 0.00235 K/W y el grafito de  $631.55 \cdot 10^{-9}$  K/W.

Se calcula el delta de temperatura en la capa de aluminio sabiendo el calor máximo a conducir a niveles operativos, es decir de un delta de 20 °C, son 540 W. aplicando la ley de Fourier de transmisión de calor por conducción:

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R_{TH}}$$

(Ec. 1.7)

Cuyo resultado para la cara de aluminio es de un gradiente de 1.27 °C entre sus dos caras.

Para la cara del disipador, se aplica el mismo principio y adicionalmente se cuenta con los datos del fabricante para la Rth del disipador con el caudal del viento de los ventiladores ya aplicado. Para este diseño se ha decidido escoger un disipador y unos ventiladores de tal forma que consigan por lo menos una Rth máxima de 0.035 °C/W.

El peor caso para el disipador sería aquel en que debe disipar calor en un delta de 20°C por ejemplo para la cara caliente a 75 °C, considerando que la cara caliente sea la del disipador. En total serían aproximadamente unos 540 W como en el caso anterior, basándose en la tabla 6.

Aplicando la ecuación 1.7 (W) para este caso se conseguiría un gradiente de 18.9 °C entre las dos caras del disipador. Cuanta más pequeña sea la Rth, menor gradiente se puede conseguir pero para estos valores es aceptable.

### 5.2.3. Sensor de temperatura (CST)

Para medir la temperatura en la plancha de aluminio, la sonda pasiva de temperatura externa y en el disipador, se van a emplear dos RTD en cada elemento colocadas de tal forma que estén en contacto con el objeto a medir y ubicadas en los extremos para que la temperatura no se quede medida sólo en un punto central, tal y como se indica en el pliego de condiciones. Se debe implementar una etapa para poder conseguir una tensión diferencial dependiente de la temperatura con dichas RTD, un amplificador de instrumentación para llevar dicha señal a un orden de magnitud equivalente al rango de entrada del microcontrolador, un filtro para evitar posibles interferencias en la señal a medir y por último un desplazamiento para que el rango se adecue al del convertidor ADC del microcontrolador.

#### 5.2.3.1. Etapa diferencial

Para el diseño de esta etapa se ha basado en función del uso de resistencias termométricas de platino como sensor de temperatura. Esto es debido a que ofrecen la posibilidad de operar cómodamente en el rango de temperaturas de  $-10$  a  $100$  °C y además ofrecen una respuesta en tensión bastante lineal respecto a la temperatura a la cuál son sometidas. Adicionalmente, las Pt100 de platino escogidas tienen un tamaño muy pequeño, una tolerancia muy baja, de forma plana y por tanto adecuadas para poder adherirse a los distintos elementos. Se ha observado que el uso de este tipo de sensor es muy común en modelos comerciales con las mismas funcionalidades al planteado en este diseño.

Se ha planteado el esquema de la figura 12:

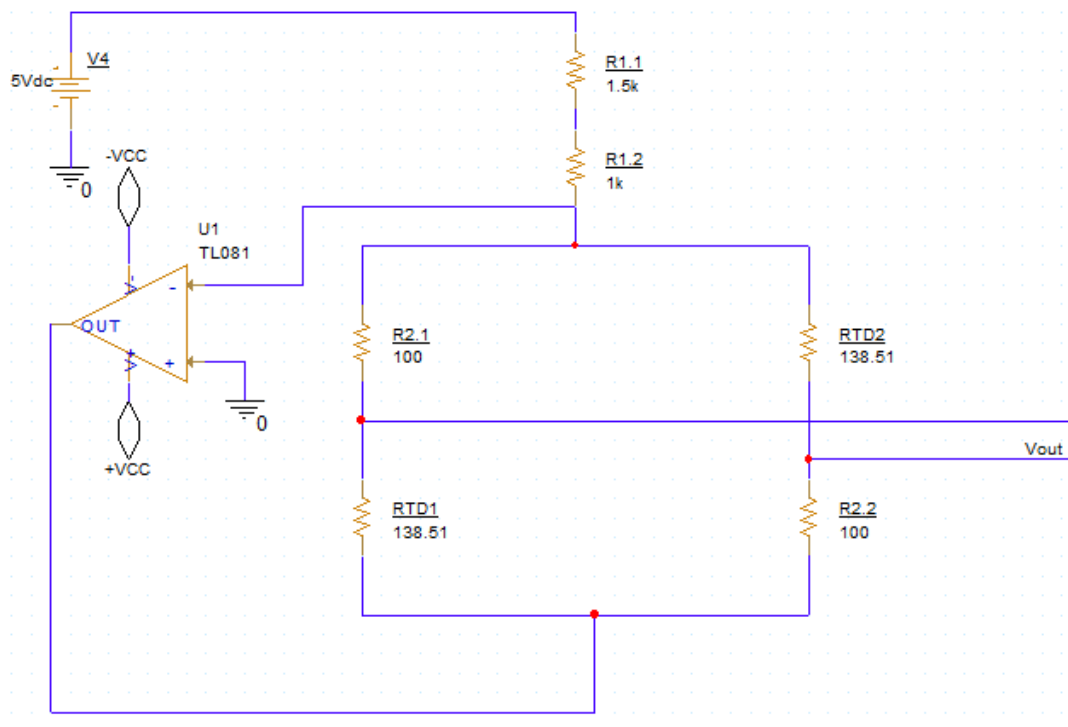


Figura 12. Esquemático de puente Wheatstone.

Para este circuito se ha planteado un puente Wheatstone con dos RTDs alimentadas por +5 V y adaptadas para que circule una intensidad constante a través de ellas mediante un AO configurado como en la figura 12. De esta manera se obtiene un diferencial de tensión lineal a la salida del circuito y mayor precisión de esta manera en vez de usar sólo una RTD.

La corriente que circula por el puente Wheatstone viene definida por el valor de la suma en serie de las resistencias  $R_{1,1}$  y  $R_{1,2}$  de 1.5 k $\Omega$  y 1 k $\Omega$  de valor respectivamente. Aplicando de la ley de Ohm en la ecuación 2.1:

$$I_1 = \frac{V}{R_{1,1} + R_{1,2}} = \frac{5}{2500} = 2 \text{ mA}$$

(Ec. 2.1)

Una vez obtenida la intensidad constante y comprobado que es menor que la corriente de saturación de 2.5 mA del AO, se analiza el comportamiento del puente Wheatstone. Las RTD varían siguiendo la siguiente ecuación indicada por el fabricante en la ecuación 2.2 ( $\Omega$ ):

$$RTD = 100 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

(Ec. 2.2)

Se obtiene el parámetro  $\alpha$  de las ecuaciones 2.3 y 2.4 con los valores de la tabla 22 en el anexo sobre los valores nominales de las RTD por la normativa DIN/IEC 60751 europea de 103.9  $\Omega$  a 10 °C y 130.9  $\Omega$  a 80 °C por ejemplo.

Para 10 °C:

$$103.9 = 100 \cdot (1 + \alpha \cdot 10) \\ \alpha = 0.0039$$

(Ec. 2.3)

Para 80 °C:

$$130.9 = 100 \cdot (1 + \alpha \cdot 80) \\ \alpha = 0.00386$$

(Ec. 2.4)

Al ser valores muy aproximados al coeficiente dado por el fabricante se toma éste como valor nominal para  $\alpha$  siendo este de 0.00385.

Se calcula la tensión en los componentes del puente Wheatstone  $V_{R_{2,1}}$  y  $V_{RTD_2}$  teniendo en cuenta el terminal negativo del AO el cual está conectado a masa. Se calcula la intensidad en  $RTD_2$  en la ecuación 2.5 (A):



$$I_{RTD2} = \frac{0 - V_{RTD2}}{RTD_2} = -\frac{I_1}{2}$$

(Ec. 2.5)

Esta intensidad en  $RTD_2$  es debida a que la suma total de la resistencia en las 2 ramas es la misma y por tanto, la intensidad en cada rama es la mitad de  $I_1$ , tanto para  $RTD_2$  como para  $R_{2.1}$ .

En la ecuación 2.6 (V) se calcula el valor de  $V_{R_{2.1}}$ :

$$V_{R_{2.1}} = -R_{2.1} \cdot \frac{I_1}{2}$$

(Ec. 2.6)

Y de la misma manera, se calcula el valor  $V_{RTD2}$  empleando la  $RTD_2$  en lugar de  $R_{2.1}$  en la ecuación 2.7 (V).

$$V_{RTD2} = -RTD_2 \cdot \frac{I_1}{2}$$

(Ec. 2.7)

La diferencia de potencial entre  $V_{2.1}$  y  $V_{RTD2}$  en la ecuación 2.8 da como resultado la función de transferencia de la etapa sensora y en la ecuación 2.9 la sensibilidad.

$$\Delta V = \frac{I_1}{2} \cdot (-RTD_2 + R_{2.1}) = \frac{0.002}{2} \cdot (-100 \cdot (1 + 0.00385 \cdot T) + 100)$$

$$\Delta V = - (0.000385 \cdot T) V$$

(Ec. 2.8)

La sensibilidad del circuito se obtiene derivando la expresión anterior respecto de la temperatura:

$$S = \frac{\partial \Delta V}{\partial Temp} = -0.000385 \text{ V/V}$$

(Ec. 2.9)

Por tanto, los valores del diferencial de voltaje para el rango de temperaturas de -10 a 100 °C y que sirven como entrada para la etapa de amplificación oscilan entre un rango nominal de -0.0385 V a +0.00385 V.

### 5.2.3.2. Etapa de amplificación

La elección del amplificador de instrumentación es el INA 101 para esta segunda etapa, cuya estructura interna consta de tres amplificadores operacionales tal como indica el fabricante en el datasheet indicado en la bibliografía.

Dada la señal de salida del primer bloque, la salida de la etapa segunda etapa comprende un rango determinado por la ganancia designada de la forma de la ecuación 2.10 (V).

$$V_{etapa\ 2} = \Delta V_{etapa\ 1} \cdot G_{INA}$$

(Ec. 2.10)

Del anexo del datasheet del INA101 (*High Accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER*, 1998), se indica la ecuación 2.11 (V) con la que calcular el valor de la resistencia  $R_G$  que permite fijar la ganancia deseada:

$$G_{INA} = 1 + \frac{40000}{R_G}$$

(Ec. 2.11)

#### 5.2.3.2.1. Cálculo del rango y de la ganancia.

Sabiendo que el rango estimado de operación debe estar comprendido entre 0 y 5 V por las características del microcontrolador, se ha designado la resistencia de ganancia con un valor estandarizado de 470  $\Omega$ , con lo cual se obtiene una ganancia de 86.1 V/V de la ecuación 2.11.

Comprobando los valores en los extremos de temperatura de la tensión de entrada proveniente de la etapa uno (ecuación 2.10):

$$V_{min} = -3.315\text{ V}$$

$$V_{max} = 0.3315\text{ V}$$

No obstante, el rango de salida aún no se encuentra aún dentro del rango admisible del microcontrolador, pero sí en un rango en el que el microcontrolador pueda operar con precisión al ser adecuado. Esta etapa tiene el esquemático de la figura 13.

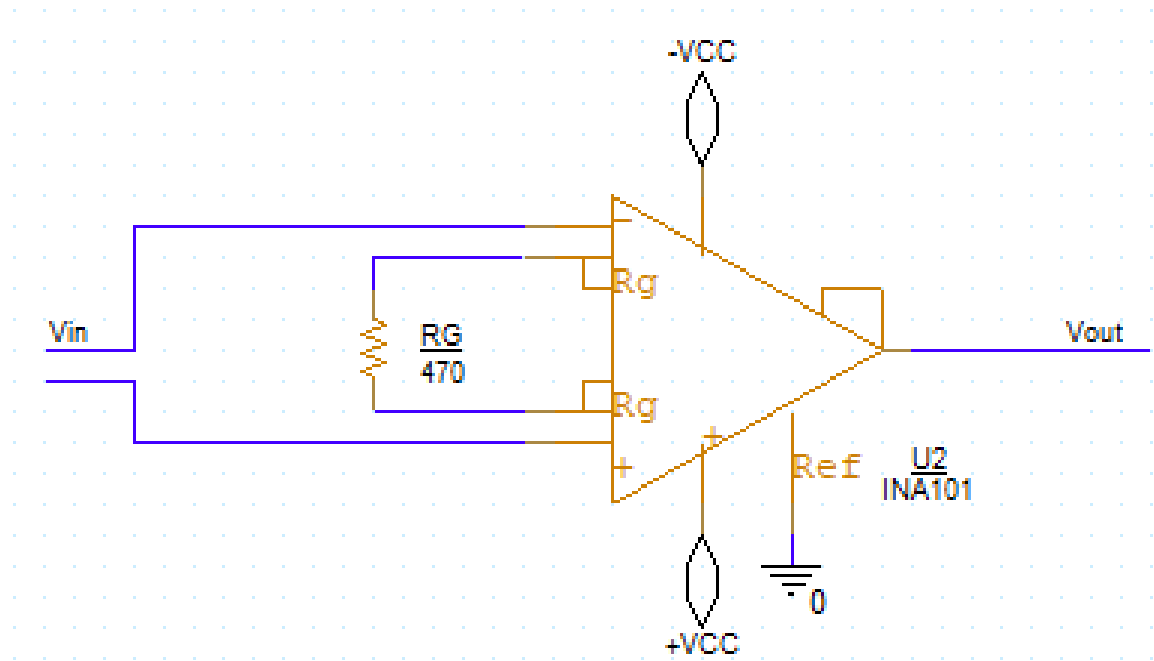


Figura 13. Esquemático de la etapa de amplificación.

Se debe comprobar también que el INA 101 no sature en la entrada, tanto por tensión como por corriente, según los datos dados por el fabricante indicado en el datasheet referenciado, ya que podría provocar un error final en la medida.

#### 5.2.3.2.2. Comprobación de no saturación por tensión.

En el caso de saturación por tensión, se analiza el terminal con el valor absoluto de tensión más alto, el cuál es el que va conectado al terminal negativo del INA 101. Se calcula la tensión en dicho terminal y se multiplica por la ganancia designada en esta etapa en la ecuación 2.12:

$$V - = V_{min} \cdot G = - 0.1385 \cdot 86.1 = 11.925 \text{ V}$$

(Ec. 2.12)

Según los datos proporcionados por el fabricante, los amplificadores saturan a una tensión absoluta de 12.5 V , por tanto se concluye que dentro del rango de operación no satura por tensión.

### 5.2.3.2.3. Comprobación de no saturación por corriente.

Para comprobar que el INA101 no puede saturar por corriente en la rama de la resistencia  $R_G$  aunque se dé en casos muy particulares, se plantea un esquemático similar al de la figura 14.

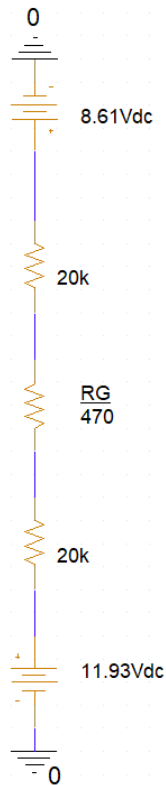


Figura 14. Esquemático interno de la entrada del INA.

La tensión de 8.61 V corresponde a la calculada en el terminal positivo. En la ecuación 2.13 se calcula la tensión máxima en el terminal negativo.

$$V_{-} = V_{R_{2.1}} \cdot G = -0.1 \cdot 86.1 = -8.61 \text{ V}$$

(Ec. 2.13)

Analizando la corriente por dicho circuito entre la tensión de los dos terminales en la ecuación 2.14:

$$I_{RG} = \frac{\Delta V}{\Sigma R} = \frac{11.93 - 8.61}{40470} = 0.082 \text{ mA}$$

(Ec. 2.14)

Por tanto no puede saturar por corriente ya que los amplificadores saturan con una corriente del orden de mA tal y como especifica el fabricante.

### 5.2.3.3. Filtro

Esta etapa del bloque sensor de temperatura consiste en la implementación de un filtro paso bajo. Dicho filtro además es inversor, esto es debido a que es necesario conseguir rangos de tensión positivos para la entrada del microcontrolador y se debe tener en cuenta que el rango de tensiones proveniente de la etapa de amplificación es negativo por la forma en la que está realizado el conexionado pero es más sencillo conseguir una ganancia unitaria con esta distribución.

Con este filtro se pretende limitar el ancho de banda del circuito para limitar los posibles efectos de overshoot en el sistema, el efecto de componentes armónicos y otras interferencias sobre la señal a medir.

La estimación de la variación de temperatura en este sistema se sitúa aproximadamente en 10 °C/min para la pendiente más progresiva, por tanto la frecuencia de corte para el filtro es de 0.1616 Hz. Para garantizar que no se produzca una caída de 3 dB en dicha frecuencia y aprovechando los valores normalizados de condensadores y resistencias, se establece en 0.2 Hz.

El esquema para el filtro paso alto es el de la figura 15.

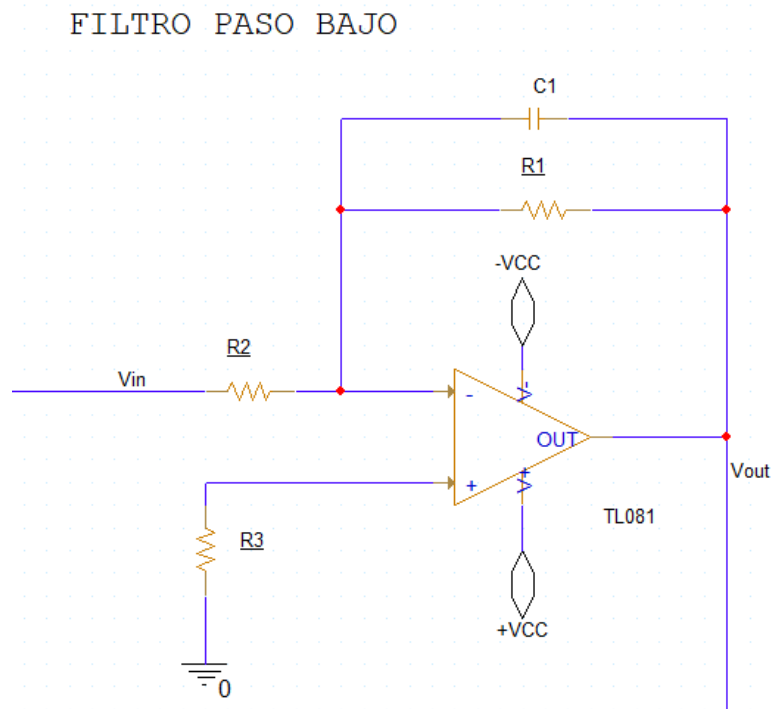


Figura 15. Esquemático filtro paso bajo.

Para el diseño de los componentes del filtro se establece un valor normalizado de 10  $\mu$ F y se analiza la función de transferencia en la ecuación 2.15.

$$G = -\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{1+jw \cdot C_1 \cdot R_1}$$

(Ec. 2.15)

La ganancia dependiente de la relación entre  $R_1$  y  $R_2$  debe ser unitaria en valor absoluto. Esto es debido a que el rango de tensión proveniente de las etapas anteriores ya se encuentra en el rango aceptable de la aplicación. Por tanto,  $R_1$  y  $R_2$  son iguales.

Con los valores de frecuencia de corte y  $C_1$  ya fijados, y teniendo en cuenta el mismo valor para  $R_1$  y  $R_2$ , se consigue a partir de la función de transferencia del filtro en las ecuaciones 2.16 (Hz) y 2.17.

$$f_{cs} = 0.2 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot R_1}$$

(Ec. 2.16)

$$R_1 = \frac{1}{0.194 \cdot 2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 79.58 \text{ k}\Omega$$

(Ec. 2.17)

Para este caso se utiliza el valor normalizado de 82 k $\Omega$ . La etapa del filtro es igual a la figura 16.

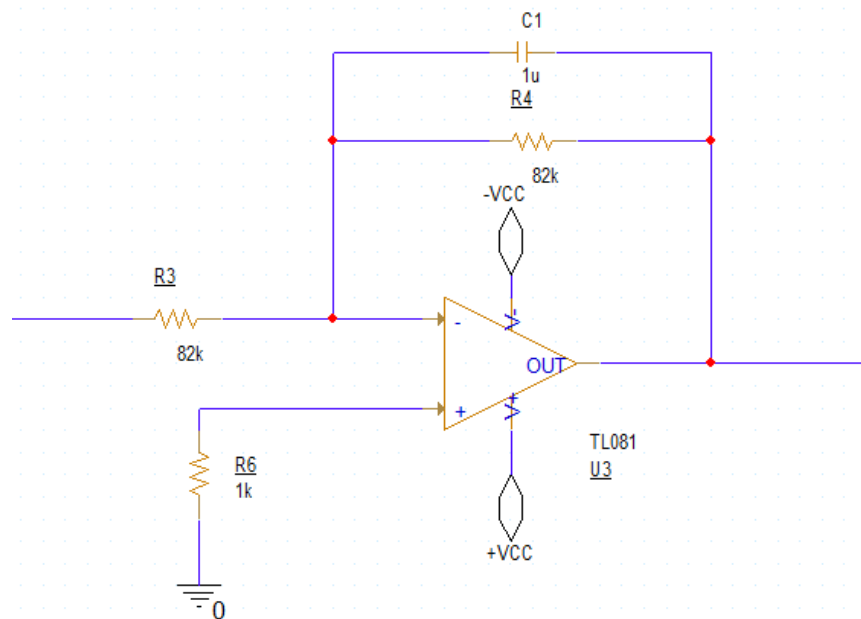


Figura 16. Esquemático final etapa filtro .

#### 5.2.3.4. Adaptador de tensión

En esta última etapa del circuito sensor se implementa un adaptador de tensión posterior al filtro para que el microcontrolador pueda leer el rango de tensiones comprendido entre -10 y 0 °C debido a que presentan tensiones negativas.

Para ello se parte de la fuente  $V_4$  utilizada en la primera etapa y se implementa un inversor de ganancia igual a  $-0.2 \text{ V/V}$  para conseguir -1 V a la salida del inversor como en la figura 17. Esto es debido a que si se emplea un divisor de tensión habría dificultades con la adaptación de impedancias posterior y que partiendo de una fuente ya conseguida no es necesario otro convertidor.

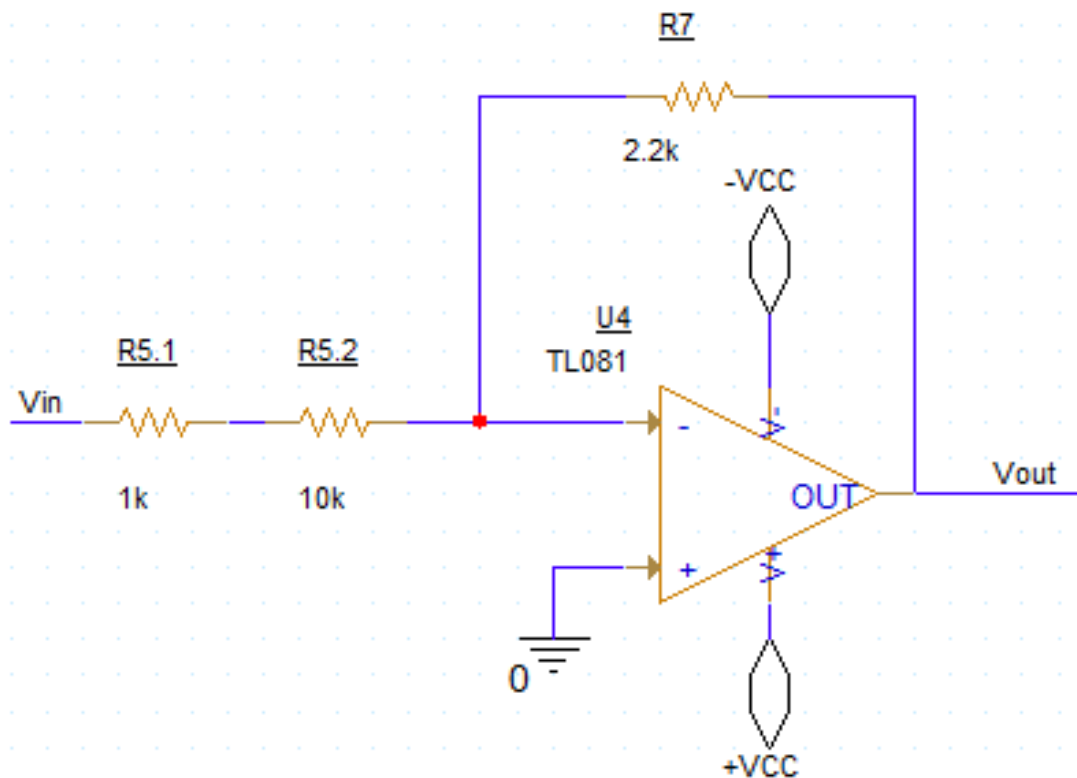


Figura 17. Esquemático del inversor.

Por último, se implementa un AO en modo restador como en la figura 18 que suma las dos tensiones debido a que la tensión del terminal V- es negativa y se obtiene un rango de salida de 0.669 a 4.315 V. Este rango para medir la temperatura sí se adapta a las características del convertidor y además deja un margen de tensión en caso de que la temperatura sobrepase por alguna razón los 100 °C o sea inferior a los -10°C de operación y no se produzca una sobretensión a la entrada del microcontrolador.

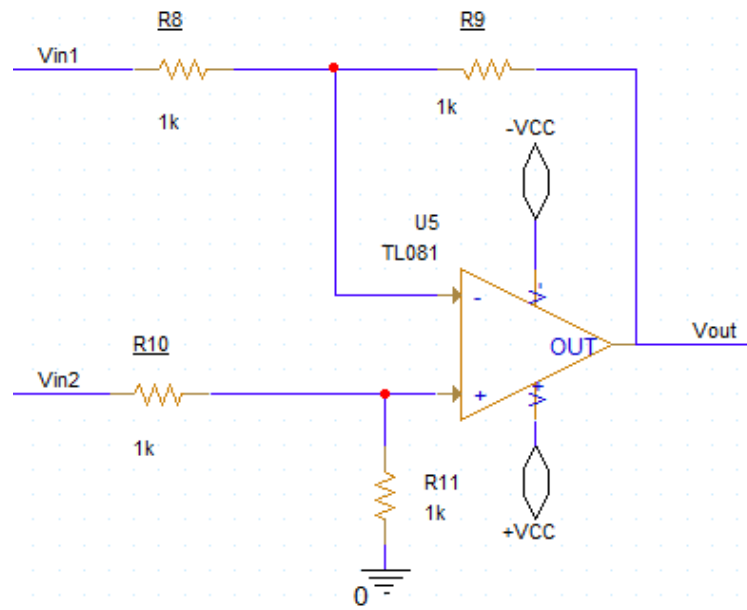


Figura 18. Esquemático del restador

El esquemático del adaptador de tensión entero es igual al de la figura 19:

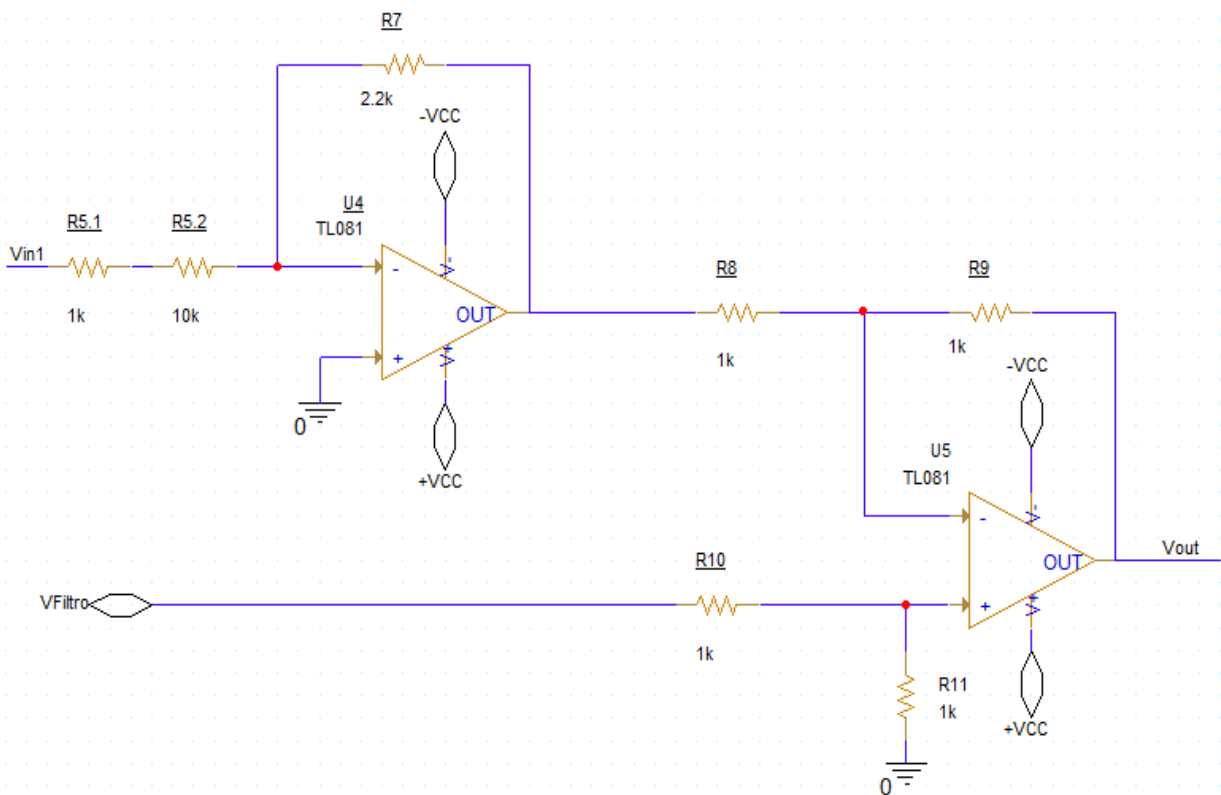


Figura 19. Esquemático del adaptador de tensión.



La función de transferencia ( $F_{dt}$ ) del circuito completo es la indicada en la ecuación 2.18.

$$F_{dt} = (0.03315 \cdot T + 1) V$$

(Ec. 2.18)

El esquema completo del bloque conformado queda de la forma del plano 1 y es igual para los tres circuitos que conforman el CST.

## 5.2.4. Control de temperatura (CM)

### 5.2.4.1. Conexión del circuito CM

Para el esquema de conexiones del circuito digital y sus posteriores simulaciones se ha empleado el software TinkerCAD de Autodesk. A este circuito se le aplica la programación descrita en los diagramas de flujo del apartado anterior y el código en el anexo.

Para el microcontrolador del sistema se ha optado por Arduino UNO ya que contiene un ATMEGA328P además de pines y periféricos adecuados para la finalidad del circuito.

El circuito está formado por una pantalla LCD conectada como en la figura 20 y el plano 3 al Arduino. El potenciómetro regula la intensidad de luz de la pantalla LCD. El conexionado de cada uno de los pines se explican con detalle en el control de ejecución dentro del pliego de condiciones.

Se ha empleado un LED blanco para indicar el estado del sistema, si está encendido o apagado, el cuál se enciende en la función de `setup()` del código. Las dos resistencias del circuito son de  $220\ \Omega$  para regular la intensidad, aunque la resistencia utilizada en la pantalla LCD, dependiendo del modelo de éste a veces no es necesaria.

Se le han añadido al circuito tres botones de los cuáles dos funcionan mediante interrupción del microcontrolador para que el usuario regule la temperatura objetivo que desee, y un tercer botón que muestra al usuario la temperatura medida en la plancha de aluminio y la sonda de temperatura externa.

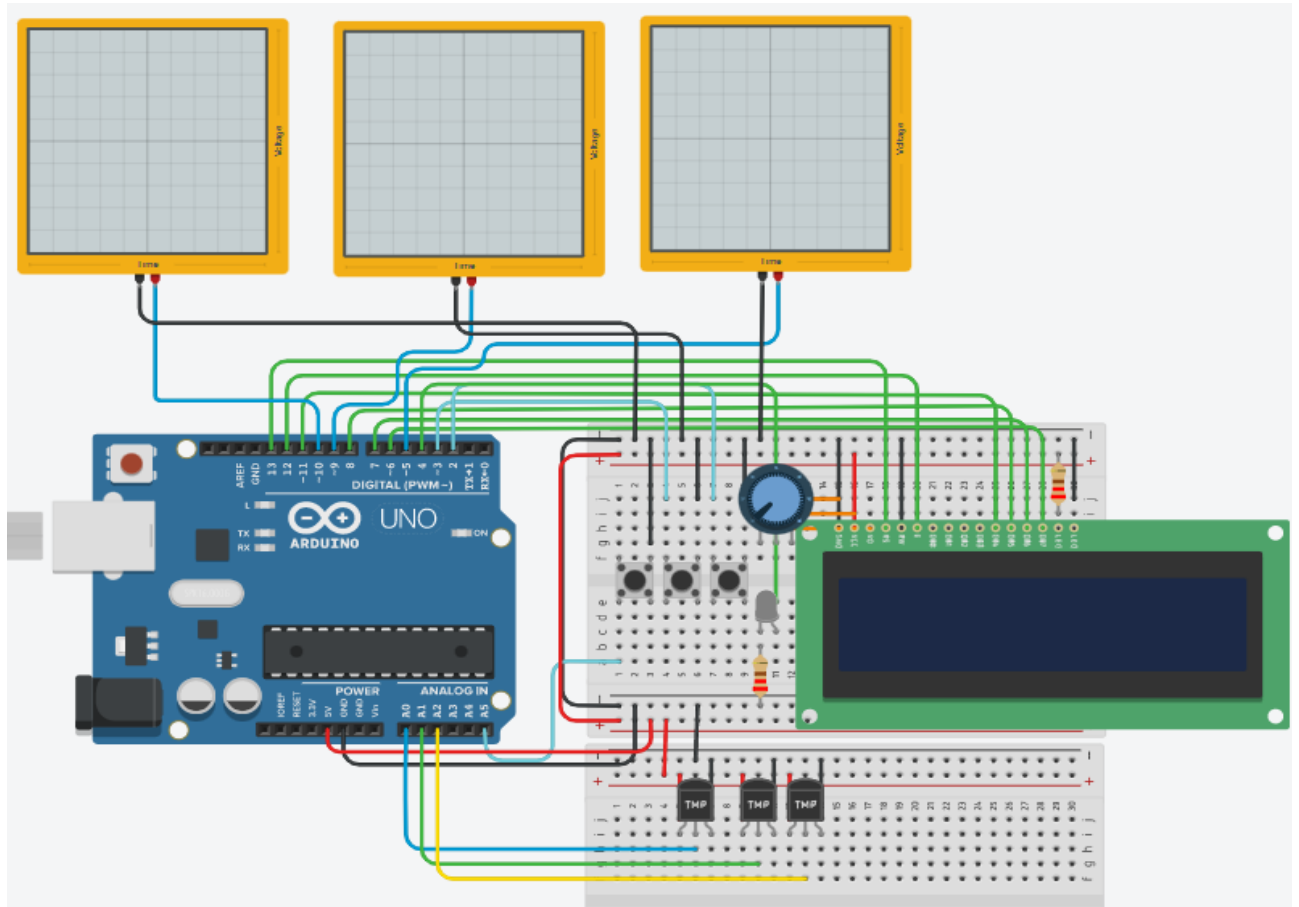


Figura 20. Esquema de conexiones del circuito digital.

Como en este software no se puede simular el circuito CST diseñado, se ha empleado unos sensores de temperatura TMP en el esquemático a modo de referencia ya que en la realidad solo cambia el valor obtenido (siendo el valor obtenido en los circuitos CST el que se va a emplear y al cuál se le aplica el PI y su correspondiente programación).

El microcontrolador controla el CP y la activación de los ventiladores a través de tres señales PWM por los pines 10, 9 y 5 del Arduino. Para el control del CP, el microcontrolador primero lee la temperatura en la plancha, aplica el PI y compara el valor obtenido con el indicado por el usuario, con lo cual, según qué valores se den en el controlador, el microcontrolador llama a las funciones de calentar o enfriar la plancha, o en su defecto deja el circuito CP en reposo mediante los “switch” de estado sólido.

Por último, respecto a los ventiladores, se activan al 100 % cuando no está en reposo la plancha térmica para maximizar la eficiencia del disipador ya que aunque se pueden desactivar momentáneamente o reducir su eficacia mediante PWM en aquellos casos donde se pretende alcanzar altos rangos de temperatura, se prioriza estado de los componentes en el largo plazo respecto al consumo. Aunque, también se deja la posibilidad al usuario de programarlo mediante PWM por sí mismo en un futuro si así lo desea.

### 5.2.4.2. Flujograma del algoritmo

El algoritmo propuesto es el de la figura 21:

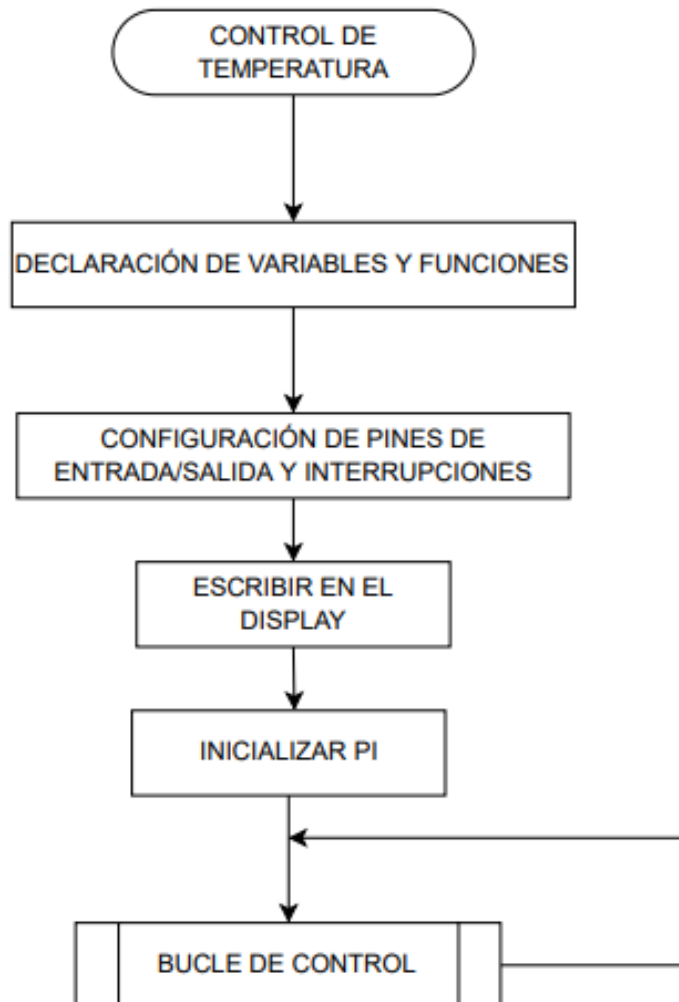


Figura 21. Diagrama del algoritmo general

El microcontrolador inicia con la declaración de variables, funciones y constantes, procede a escribir en la pantalla LCD para acabar de preparar la interfaz de usuario, e introduce los parámetros calculados para preparar el regulador PI. Por último, entra en el bucle sin fin o bucle de control.

En el bucle de control de la figura 22, el microcontrolador actualiza los valores leídos de temperatura. Luego, analiza el estado lógico del botón de la sonda antes de actualizar las temperaturas en la pantalla con los valores leídos. En función de dichos valores, aplica el bloque actuador y actualiza la temperatura objetivo.

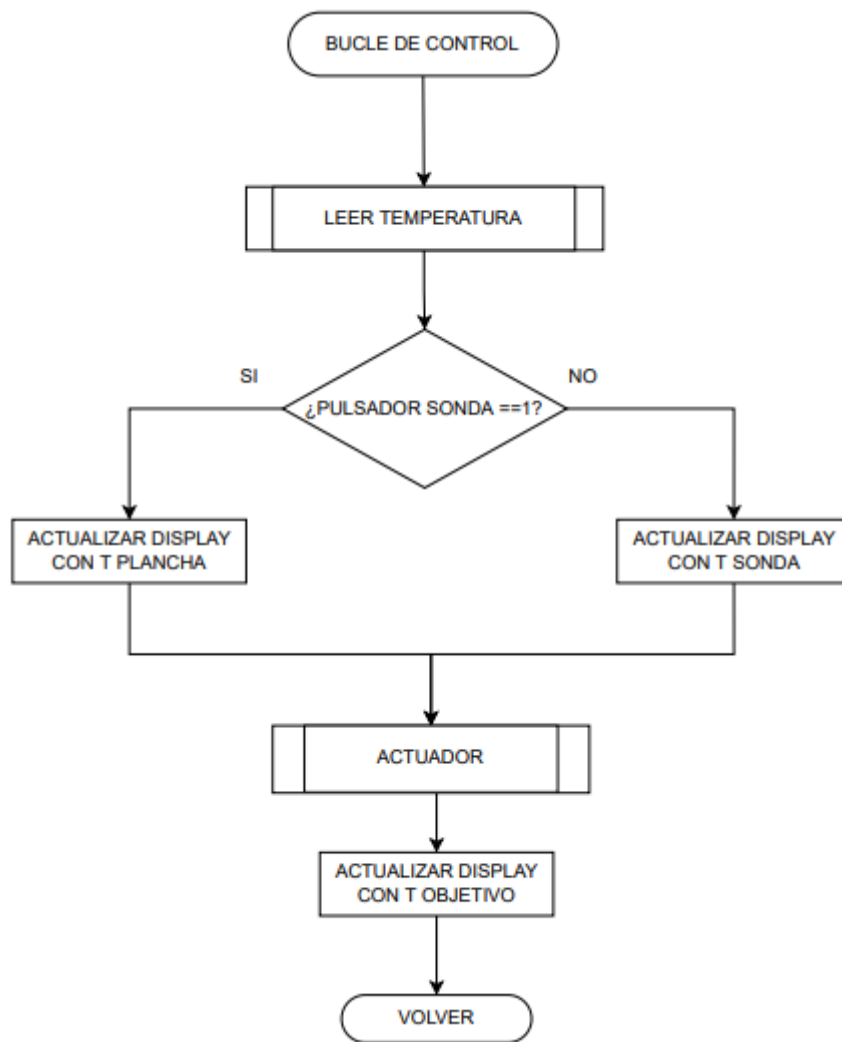


Figura 22. Flujograma del bucle sin fin.

En la función ACTUADOR de la figura 23, el microcontrolador actualiza el set point del PI con la temperatura objetivo y la compara con la temperatura de la plancha para acceder a las funciones de enfriar, calentar o dejar en reposo las células Peltier. Para calentar o enfriar se activan los ventiladores y cuando está en reposo se desactivan.

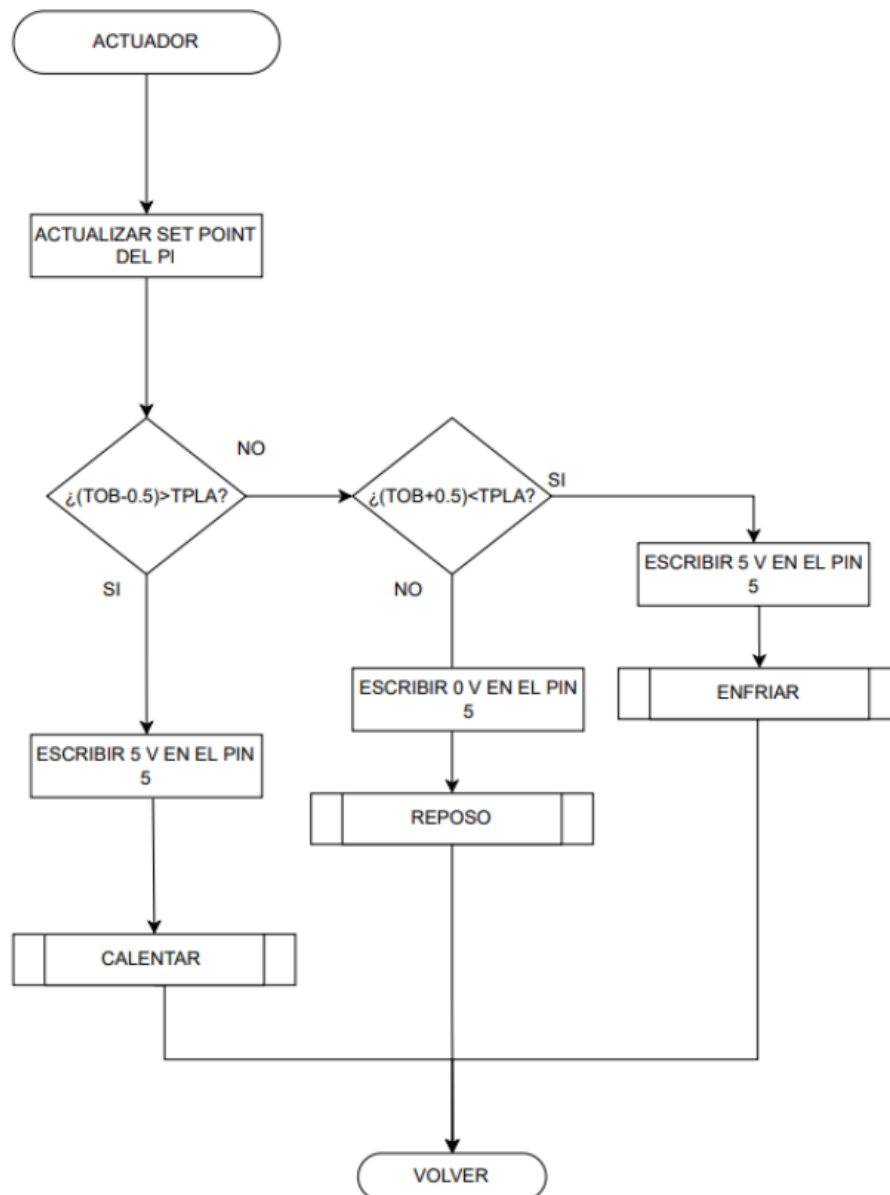


Figura 23. Función actuadora.

El flujograma de la figura 24 representa las dos interrupciones del sistema accesibles mediante la pulsación de los botones del centro y de la izquierda, estos aumentan o disminuyen el valor de la temperatura objetivo.

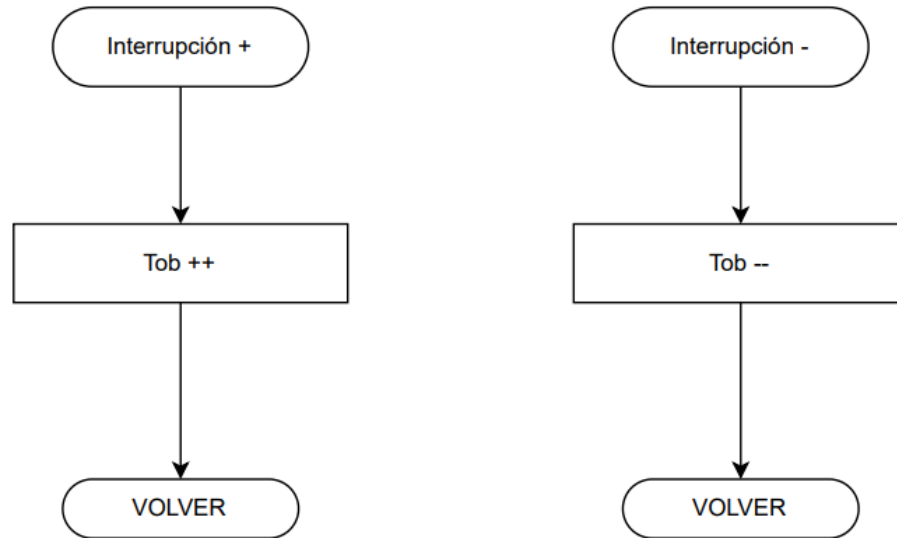


Figura 24. Interrupciones.

La función de leer la temperatura de la figura 25 mide los valores de la plancha, la sonda y el disipador cien veces para sacar la media aritmética y reducir los efectos de ruido a la entrada del microcontrolador, resta el offset de 1 V de forma digital, por necesidad del PI, y lo convierte en °C para posteriormente introducirlos en el PI a modo de comparador.

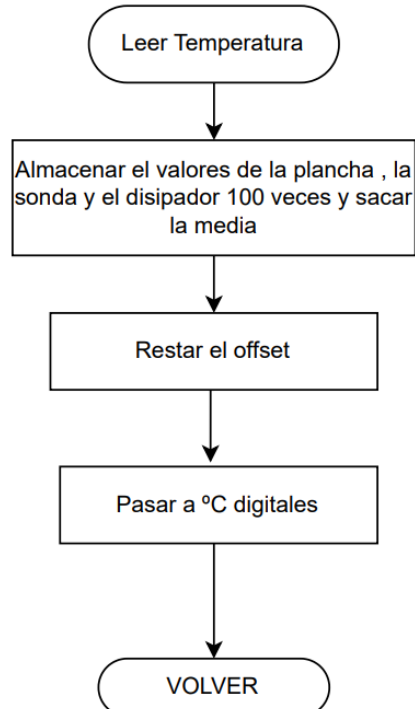


Figura 25. Función leer temperatura.

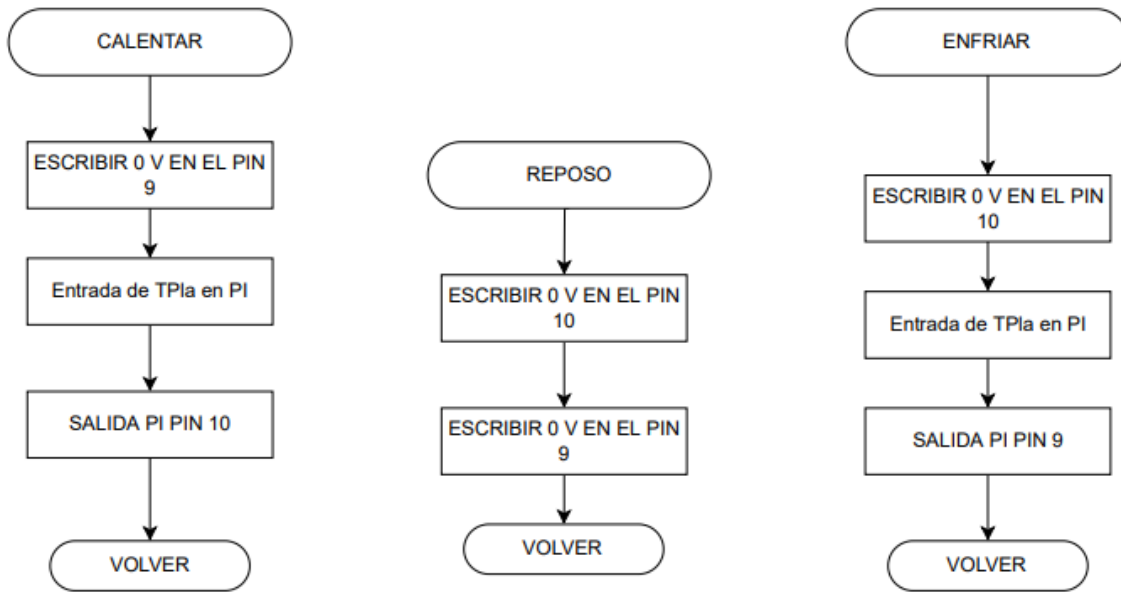


Figura 26. Funciones de calentar, enfriar y reposo.

Las funciones de calentar y enfriar aplican un nivel bajo a la señal contraria por motivos de seguridad, y en el pin correspondiente aplica la salida del PI calculado siguiendo el flujograma de la figura 26.



### 5.2.4.3. Entrada del Convertidor ATMEGA328P

Para implementar el regulador PI para el control de temperatura se parte de un rango de entrada de 0.664 a 4.315 V que sigue la ecuación 2.18 calculada en el bloque del CST. Para modelar un regulador PI se necesita de una función de transferencia lineal para un sistema continuo, sin embargo, la ecuación 2.18 es igual a la pendiente de una recta y por tanto no lineal dado que no cumple la ley de homogeneidad.

Una ecuación es lineal cumple una serie de condiciones expuestas en las ecuaciones desde las 3.1 a la 3.11. [1]

$$\text{Si } y_1(t) = f(x_1(t)) \Rightarrow y_2(t) = f(K \cdot x_1(t)) = K \cdot y_1(t)$$

(Ec. 3.1)

$$\begin{aligned} \text{Si } y_1(t) = f(x_1(t)) \text{ y } y_2(t) = f(x_2(t)) &\Rightarrow \\ y_3(t) = f([x_1(t) + [x_2(t))]) &= y_1(t) \cdot y_2(t) \end{aligned}$$

(Ec. 3.2)

Si se analiza la pendiente de una recta normal la cual tiene la misma forma que la función de transferencia del sistema:

$$y_1(t) = m \cdot x_1(t) + n$$

(Ec. 3.3)

$$y_2(t) = m \cdot [K \cdot x_1(t)] + n = K \cdot m \cdot x_1(t) + n$$

(Ec. 3.4)

Se puede concluir que:

$$y_2(t) \neq K \cdot y_1(t) = K \cdot m \cdot x_1(t) + n$$

(Ec. 3.5)

Por tanto este tipo de ecuación no es lineal.

No obstante, si se analiza la misma ecuación sin el factor “n” dado que actuaría a modo de offset en el sistema:

$$y_1(t) = m \cdot x_1(t)$$

(Ec. 3.6)

$$y_2(t) = m \cdot [K \cdot x_1(t)] = K \cdot m \cdot x_1(t)$$

(Ec. 3.7)

Se puede concluir que sí cumple la condición que la ecuación anterior no cumplía:

$$y_2(t) = K \cdot y_1(t) = K \cdot m \cdot x_1(t)$$

(Ec. 3.8)

Y comprobando la superposición:

$$y_2(t) = m \cdot x_2(t)$$

(Ec. 3.9)

$$y_3(t) = m \cdot (x_2(t) + x_3(t)) = m \cdot x_2(t) + m \cdot x_3(t)$$

(Ec. 3.10)

$$y_3(t) = y_1(t) \cdot y_2(t)$$

(Ec. 3.11)

Este sistema sí es lineal y para convertir la ecuación 2.18 en un sistema lineal se debe eliminar el offset de 1 V. No obstante, no se puede eliminar este offset por vía hardware en los circuitos de medición ya que el rango del sistema no se ajusta a los requisitos del rango de entrada del convertidor. Por tanto, se ha optado por eliminar ese offset vía software.

El convertidor del microcontrolador es de 10 bits, por tanto, convierte el rango de valores de 0 a 5 V en un rango digital de 0 a 1023 unidades digitales. Si se aplica una regla de tres siendo 5 V equivalente a 1023 unidades digitales, el rango de valores digitales que lee el microcontrolador va a oscilar entre 136 y 882 ya que el microcontrolador sólo lee números enteros. El offset por eliminar es de 1 V, se aplica la ganancia de conversión y da como resultado 204 unidades digitales a eliminar. De esta manera se reduce el offset de la constante del sistema al máximo posible y los valores con los que opera el microcontrolador oscilan entre -67 y 678 unidades digitales.

Por último, se indica la resolución del sistema sistema de medida para conocer los °C obtenidos por cada unidad digital (ecuación 3.12).

$$Resolución_{ADC} = \frac{\Delta T}{2^{nbits}} = \frac{100 - (-10)}{2^{10}} = 0.107 \text{ } ^\circ\text{C/paso}$$

(Ec. 3.12)

#### 5.2.4.4. Bucle de control y controlador PI

El regulador PI tiene como objetivo regular los valores de temperatura leídos por el microcontrolador para poder controlar las salidas PWM una vez se alcance la temperatura objetivo para mantenerla lo más estable posible.

Para el diseño del PI primero se ha establecido el diagrama de bloques del sistema de control en bucle abierto

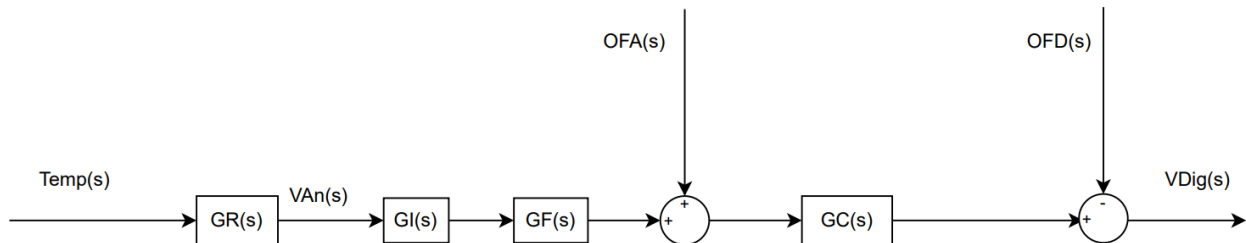


Figura 27. Diagrama de control en bucle abierto.

En la figura 27 la variable de entrada corresponde a  $Temp(s)$  correspondiente a la temperatura, ésta pasa por la ganancia del sensor  $GR(s)$  y se convierte en la señal analógica.  $GI(s)$  y  $GF(s)$  corresponden a la ganancia de la etapa de amplificación y del filtro respectivamente. La señal  $OFA(s)$  es la señal de 1 V de offset que tiene el mismo valor que  $GC(s) \cdot OFD(s)$  (la ganancia de la conversión digital y el offset digital), por tanto estas señales si no se suprimen en las condiciones reales, se mitigan bastante y no se tienen en cuenta para el análisis en bucle cerrado.

Al pasar a bucle cerrado, el sistema tiene la forma de la figura 28 y cuenta con una realimentación  $H(s)$ . Para este caso, se ha decidido emplear una realimentación negativa unitaria para estabilizar la señal de salida y mantenerla en condiciones constantes a la par de aumentar el rechazo a las perturbaciones. El valor de la realimentación  $H(s)$  es la conversión de  $VDig(s)$  a grados indicado en la figura 29 para comparar la señal de error.

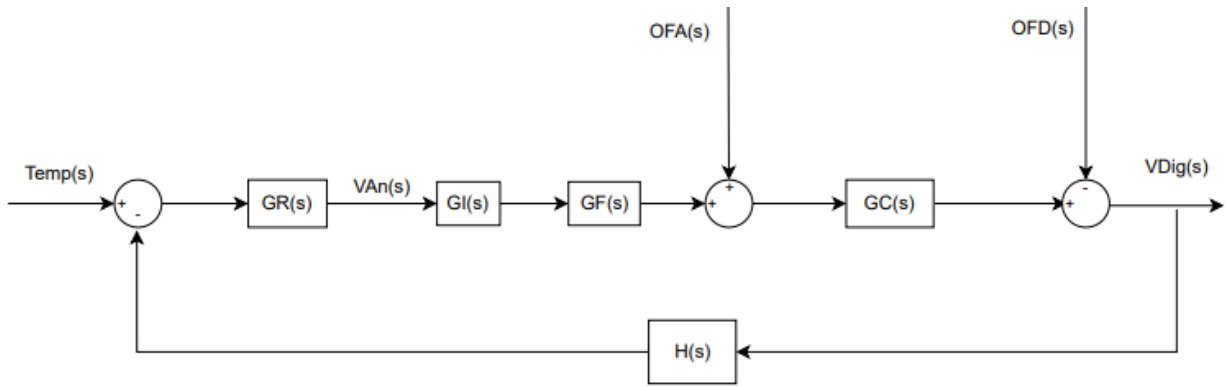


Figura 28. Diagrama de control en bucle cerrado.

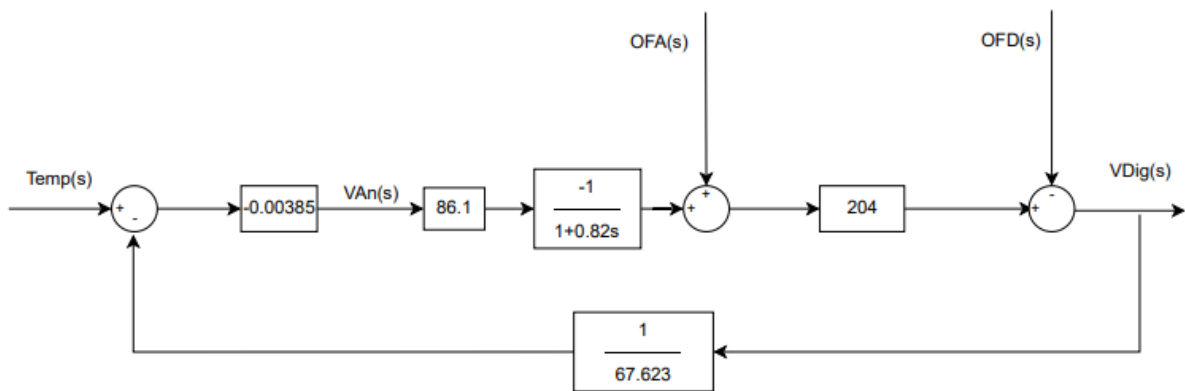


Figura 29. Diagrama de control en bucle cerrado con valores.

Aplicando la teoría de control para la reducción de bloques, el sistema final resulta como en la figura 30.

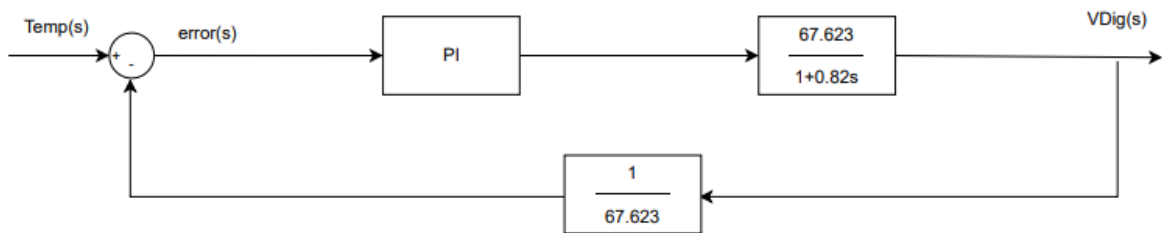
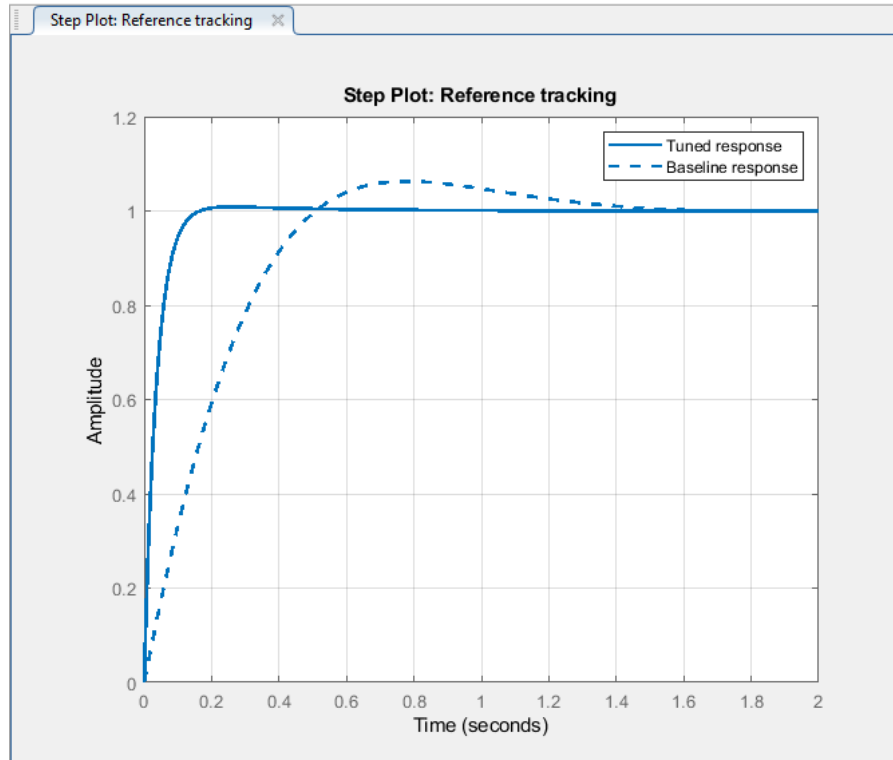
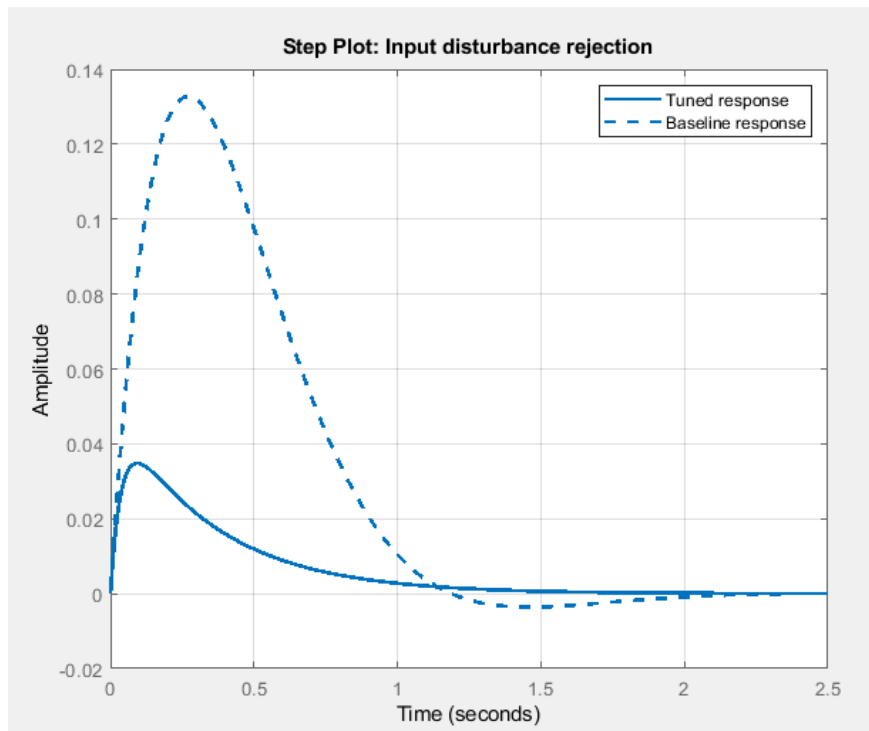


Figura 30. Diagrama de control simplificado.

Una vez obtenido el diagrama de control simplificado, se procede a calcular las constantes del regulador. Para facilitar su cálculo se ha recurrido al comando pidTune del software Matlab cuya programación se encuentra en el anexo. Este comando puede calcular el regulador para unas especificaciones estándar y luego modificar los valores de las  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  para hacer el sistema más robusto o más rápido. En este caso, se ha priorizado un sistema más lento pero robusto.



Gráfica 6. Respuesta del sistema ante escalón.



Gráfica 7. Rechazo de perturbaciones a la entrada del sistema.

Analizando la gráfica 6 que representa la respuesta frente a escalón se observa que el sistema alcanza el valor pico en 0.2 segundos y haciendo zoom en Matlab presenta una sobreoscilación menor al 3.5 %. Dicho resultado se ha obtenido igualmente en una simulación realizada en paralelo con el software Simulink de Matlab en la figura 31, la gráfica 8 muestra la señal del error, siendo ésta muy parecida a la gráfica 6 en cuanto a su máximo valor de pico y de tiempo de respuesta. También se ha simulado la respuesta en valores de voltaje digital antes de la realimentación en la gráfica 9, la cual presenta en el pico un incremento de 2.5 unidades digitales respecto a la tensión digital nominal. En ambas gráficas la señal tarda un segundo en dispararse por un pequeño retardo del propio Simulink.

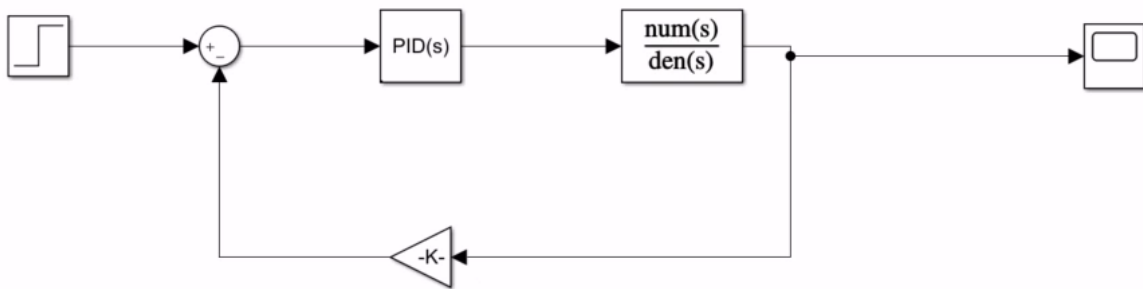
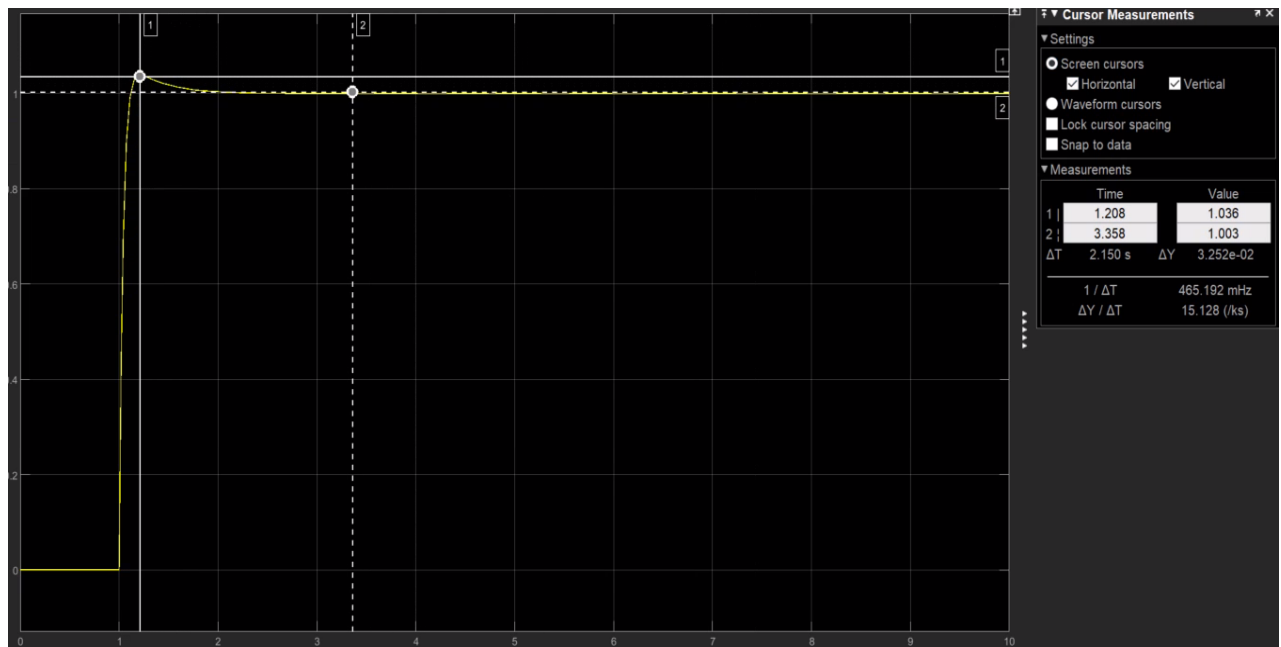
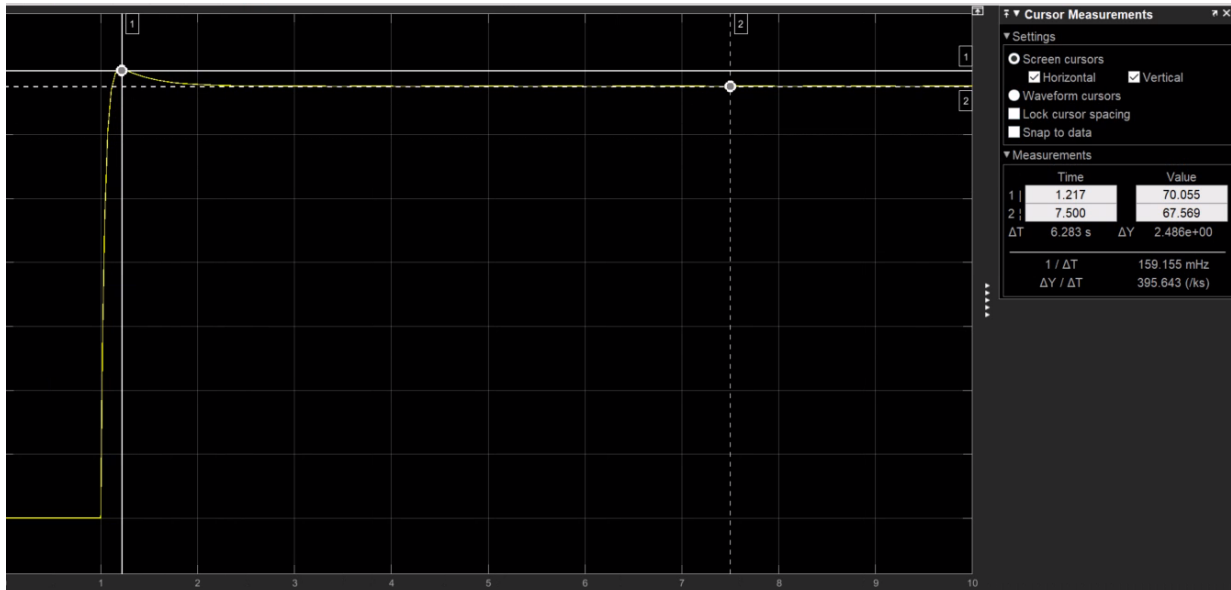


Figura 31. Diagrama de Simulink.



Gráfica 8. Respuesta a escalón de la señal de error en Simulink



Gráfica 9. Respuesta a escalón con unidades digitales en Simulink

La gráfica 7 muestra el rechazo de las perturbaciones a la entrada. La amplitud pico es de magnitud 0.035 igual que en simulink y aunque tarda 2.5 segundos en llegar a 0, presenta una amplitud de 0.015 en 0.5 segundos.

Por tanto, a la vista del análisis de este sistema se determina apto y se procede a obtener los parámetros  $K_p$  y  $K_i$  del Matlab siendo 22.257 y 63.881 respectivamente en la figura 32.

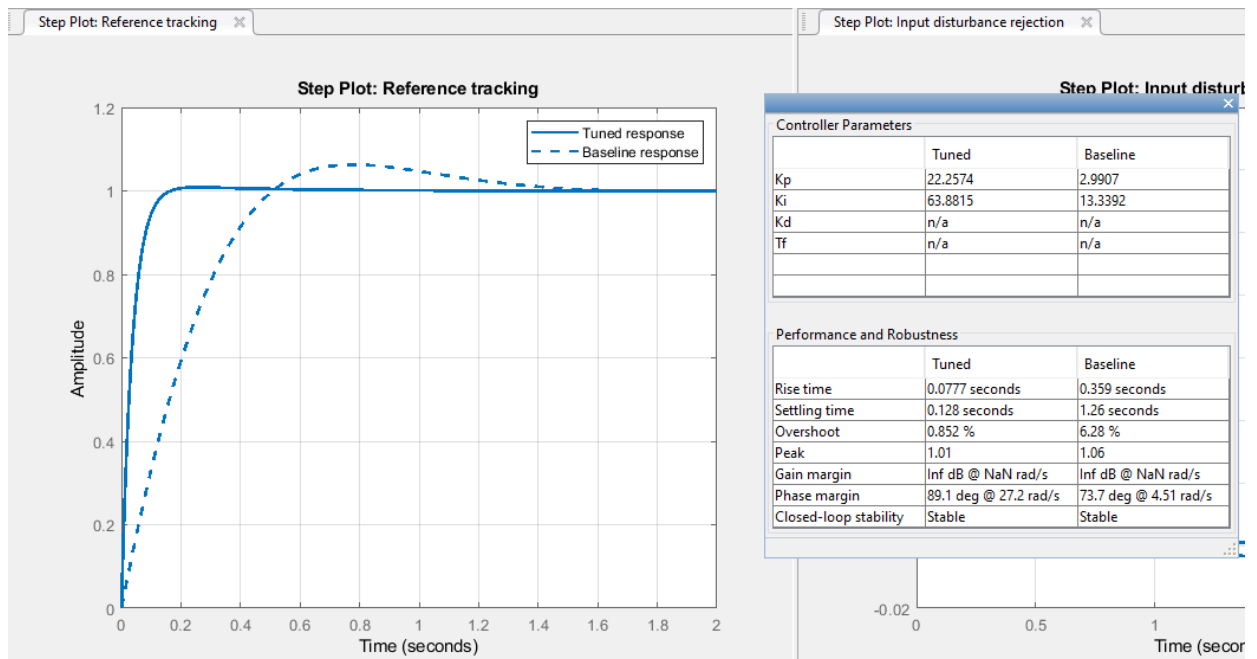


Figura 32. Obtención de los parámetros  $K_p$  y  $K_i$ .



Este regulador PI controla la rampa de temperatura que alcanza el circuito CP. Un aspecto a contemplar es la posibilidad de que al usuario quizá le interese variar dicha rampa de funcionamiento. Por ello se ha distribuido la posición del microcontrolador para estar cerca de una ranura de USB en la carcasa, además se ha empleado una biblioteca propia de Arduino para la aplicación del PI en la cual se introducen los parámetros de  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  en el código, se actualiza el setpoint y la librería proporciona un comando para ejecutar la salida del regulador. Por tanto, si el usuario quisiera hacer un sistema más rápido o lento, sólo tendría que conectar un cable USB en la cara frontal de la carcasa, conectar el arduino al ordenador y del código base del microcontrolador, indicado en el código 2 en el anexo, cambiar sólo los parámetros de  $K_p$  y  $K_i$  modificando un poco la programación.



## 5.3. Análisis y Resultados

### 5.3.1. Valores nominales del CP

Empleando simulador del programa PSpice TI se puede comprobar que los valores nominales máximos que circulan por el CP se corresponden con los valores calculados en el bloque de diseño.

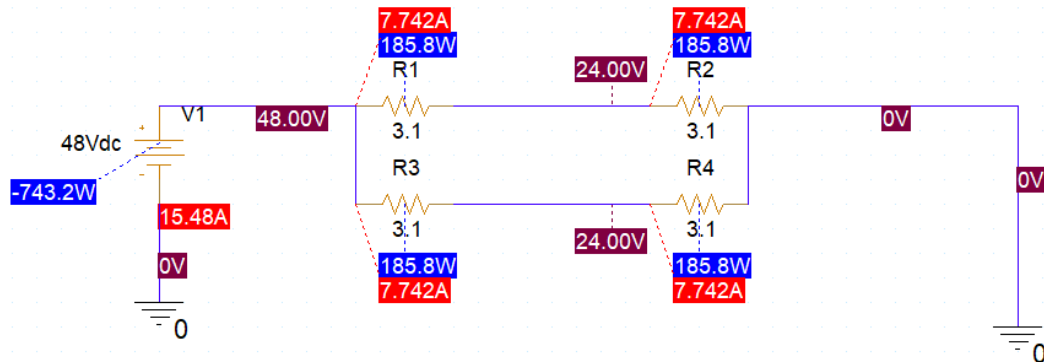


Figura 33. Asociación de células Peltier.

En la figura 33 aparece en rojo oscuro la tensión en cada punto del circuito, en rojo más claro la intensidad máxima que puede llegar a circular por cada una de las células Peltier y en azul las potencias eléctricas máximas que consumen.

### 5.3.2. Valores nominales del CST

Para la realización de este análisis y los siguientes referentes a los circuitos del bloque CST se ha empleado también el programa de PSpice TI. Para este análisis en concreto se han tomado tres valores de temperatura en  $-10$ ,  $25$  y  $100$  °C mostrándose la salida en voltaje de la etapa diferencial y la gráfica en el transitorio de la señal que recibe el microcontrolador, la cual debe ser una señal continua del orden de la sensibilidad del circuito calculada en valor nominal.

-10 °C:

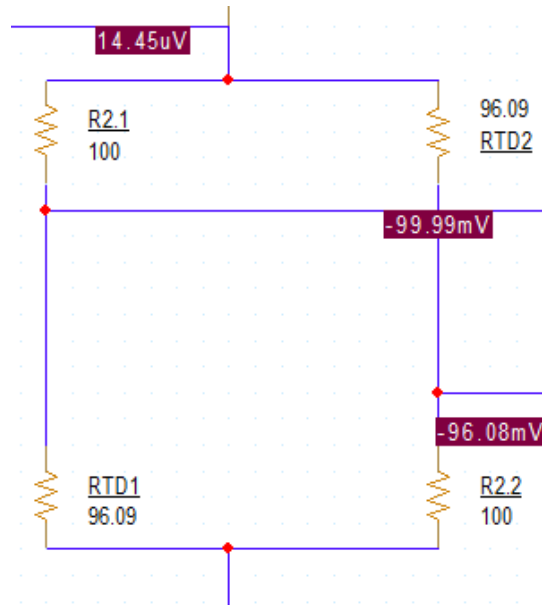
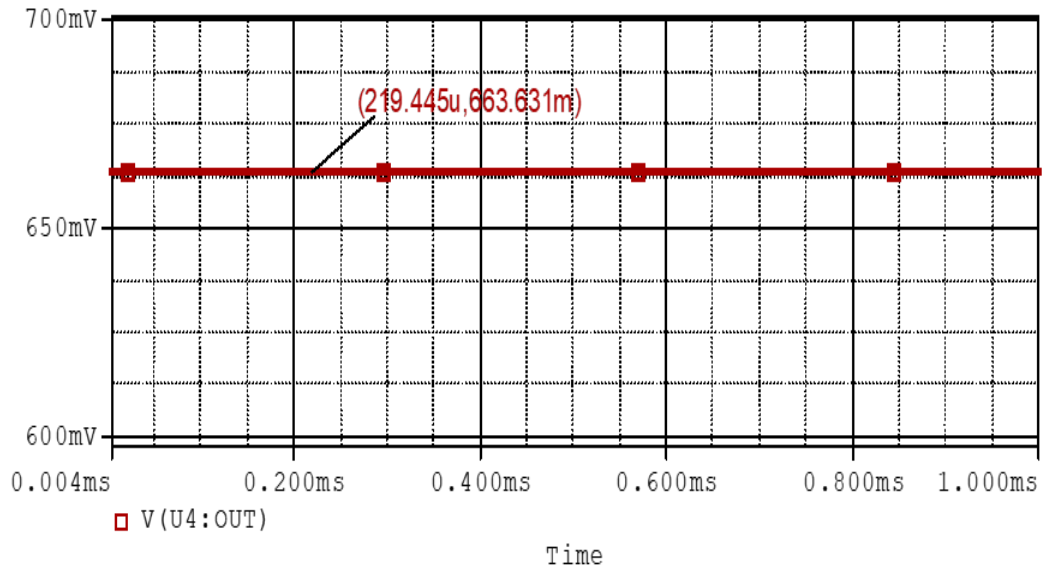


Figura 34. Diferencial de voltaje a -10 °C.



Gráfica 10. Señal de entrada nominal al microcontrolador a -10 °C.

25 °C:

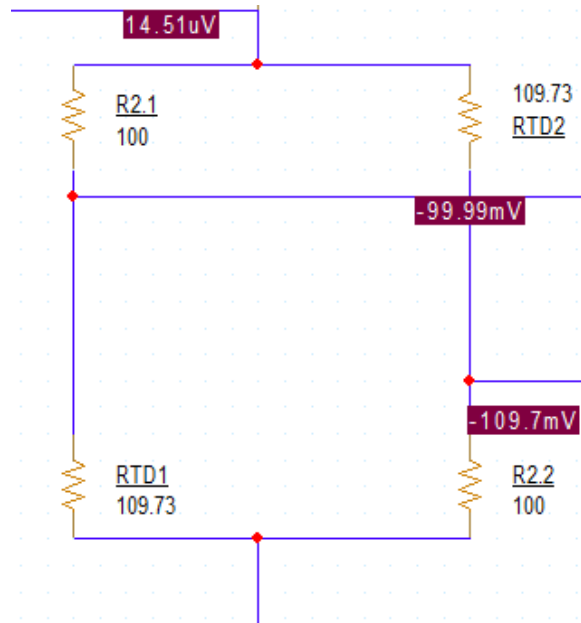
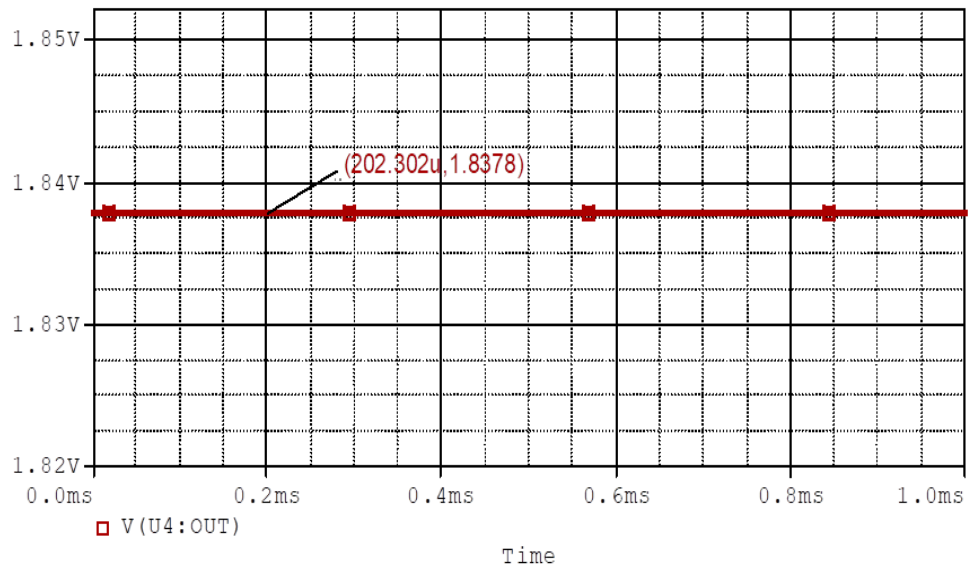


Figura 35. Diferencial de voltaje a 25 °C.



Gráfica 11. Señal de entrada nominal al microcontrolador a 25 °C.

100 °C:

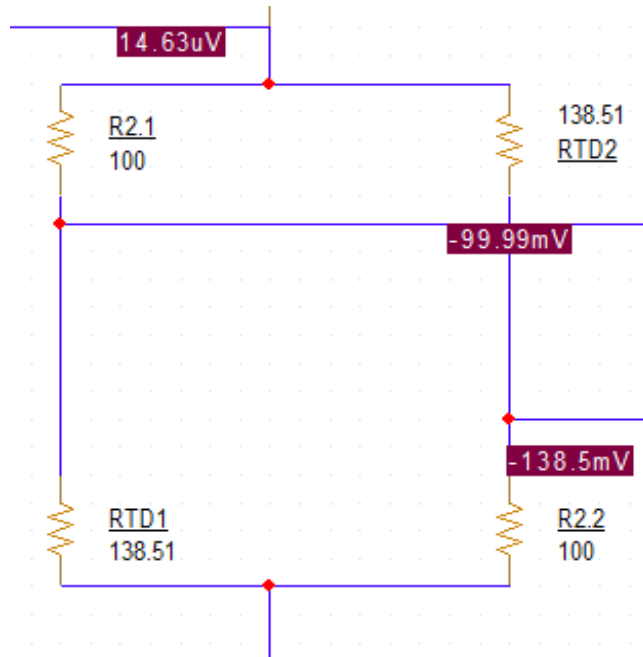
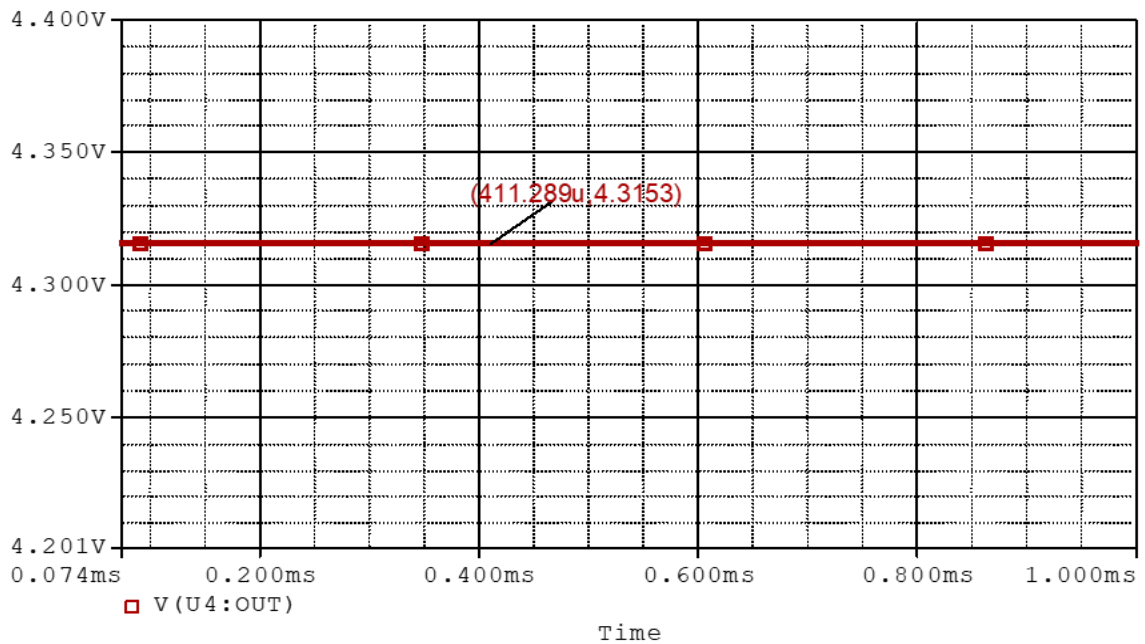


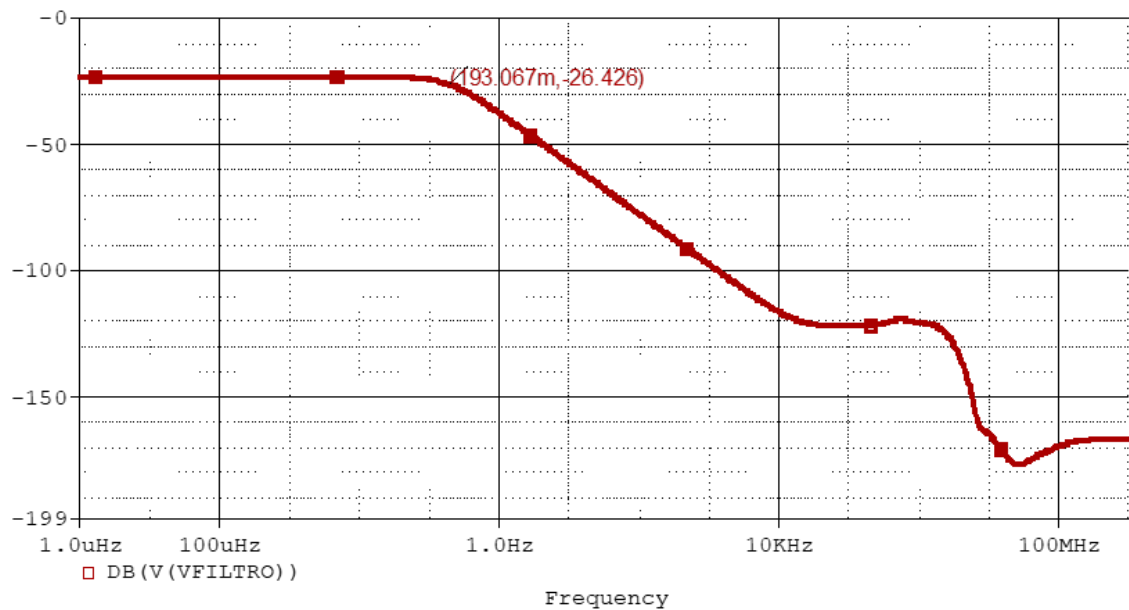
Figura 36. Diferencial de voltaje a 100 °C.



Gráfica 12. Señal de entrada nominal al microcontrolador a 100 °C.

Echando un vistazo a las figuras 34, 35 y 36, y a las gráficas 10, 11 y 12 de cada temperatura simulada se puede observar que siguen el mismo patrón, una señal de continua de un valor equivalente al obtenido con las ecuaciones 2.8 y 2.18 para el  $\Delta V$  de la etapa diferencial y la función de transferencia del sistema respectivamente, indicadas en el bloque de diseño del CST.

Para el análisis en frecuencia se ha simulado 1 V de corriente alterna y se ha observado en la gráfica 13 que la caída de -3 dB se produce en los 0.194 Hz aproximadamente, por tanto el ancho de banda del sistema se encuentra dentro de las especificaciones.



Gráfica 13. Análisis en frecuencia del sistema.

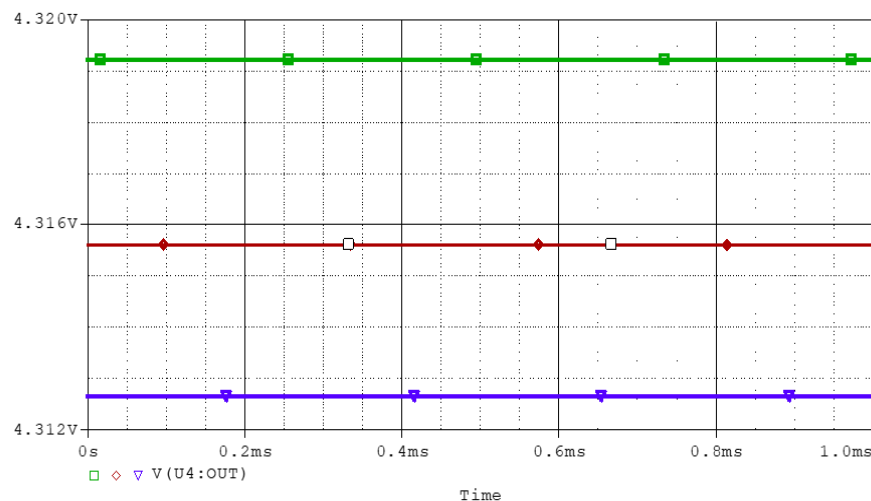
### 5.3.3. WC del CST

El análisis de WC (Worst Case) permite evaluar el comportamiento de los circuitos electrónicos en unas condiciones no ideales para su funcionamiento para tener en cuenta el caso con mayor porcentaje de error en el sistema. Para ello se ha empleado el mismo software de simulación que para el diseño del CST (Pspice TI) ya que cuenta con las herramientas necesarias para simular varias de estas condiciones.

Se aplica el WC para el CST debido a que se pueden crear perturbaciones en la señal que varíen su magnitud. Para el CM con las PWM y la pantalla LCD, al igual que el CP, funcionan con valores nominales indicados por el fabricante o las tensiones diseñadas para su funcionalidad, por tanto no pueden afectar en gran medida a ninguna señal y se desestima su análisis.

Dentro del Worst Case analysis se incluyen parámetros como la temperatura a la que están los componentes que puede afectar a la tolerancia de sus resistencias internas y por ende a la señal a medir. También se registra un error funcional derivado de las tolerancias de los componentes en un análisis de Montecarlo. Por último, también se aplica un pequeño análisis EMC (Electromagnetic compatibility) para ver la variación provocada con aumentos y disminuciones de las tensiones de alimentación de los amplificadores operacionales derivado de posibles ondas electromagnéticas que varían las tensiones de los amplificadores. Aunque es verdad que en algunos Worst Case analysis se incluyen varios tipos de análisis más, por las características y finalidad de este diseño no son necesarios.

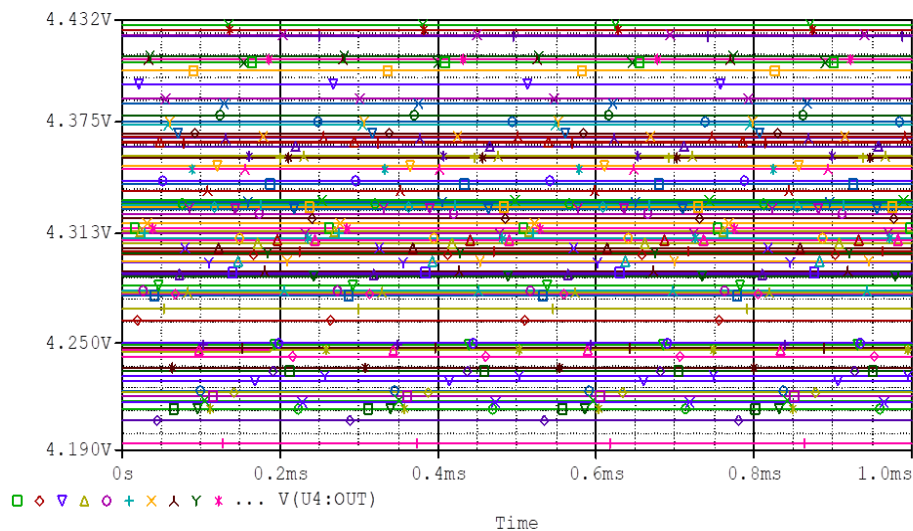
Para el análisis dependiendo de la temperatura se ha decidido simular los componentes del circuito de la PCB para 15, 25 y 35 °C que se esperan a temperatura ambiente. En dichos elementos no se incluyen las RTD de la plancha de aluminio ni las de la sonda ya que no van incluidas en la PCB. Para este análisis se simula con las RTD a 100 °C en la gráfica 14.



Gráfica 14. Simulación de temperatura a 100 °C.

Si tomamos en cuenta el valor nominal del sistema con las RTD a 100 °C de 4.315 V se observa que el mayor incremento de tensión es de 4 mV, lo cual se traduce en un error de 0.12 °C que entra dentro de las especificaciones.

El análisis de Montecarlo consiste en simular las variaciones de la tolerancia en las resistencias y cómo afecta al comportamiento del circuito. En este análisis se ha simulado un total de 100 casos.



Gráfica 15. Simulación de Montecarlo a 100 °C.

Observando y midiendo en la gráfica 15, el mayor  $\Delta V$  se registra en 115 mV que se traduce en un error máximo de aproximadamente 3.5 °C con todas las resistencias de un 1 % de tolerancia excepto  $R_{2,1}$ ,  $R_{2,2}$  Y  $R_G$  que al ser más sensibles deben tener una tolerancia del 0.5%. Este error se disminuye en la lectura de la temperatura del microcontrolador al tomar muchas muestras, lo cuál reduce la influencia de las tolerancias y de ruido a la entrada. Además, este error puede reducirse utilizando componentes con menor tolerancia y mayor calidad, aunque ello conlleve a un aumento del coste.

Por último, para el análisis de EMC se concluye que no varía la tensión nominal del circuito ya que en el posterior análisis de derating se ha rebajado la tensión de alimentación en los operacionales por debajo del 15% que recomienda el fabricante y no tiene efecto sobre la tensión de medida, ya que al trabajar en tensiones menores de +5 V no repercute dicha variación.

---

TMP	Montecarlo	EMC
0.12 °C	3.46 °C	0.00 °C

Tabla 7. Tabla resumen de errores máximos en temperatura.

Como se puede observar en la tabla 7, se puede concluir que el CST cumple satisfactoriamente las especificaciones esperadas con un error máximo de 3.6 °C.



### 5.3.4. “Derating” del CST

El análisis de “derating” de la tabla 8 consiste en comprobar que todos los componentes del circuito electrónico funcionen con unos valores de porcentaje de tensión, potencia y temperatura menores a los que indica como máximos el fabricante con el fin de extender la vida útil de dichos elementos. Para ello se han medido parámetros como la tensión o la potencia para cada componente y se han aplicado los márgenes de operación que se usan normalmente en aplicaciones de vuelo de las ECSS ya que son los márgenes utilizados en la empresa DAS Photonics S.L.

Referencia	Valor	Parámetro	Máximo soportable	Margen Aplicado	Máximo Permitido	Estrés aplicado	¿Cumple?
R1.1 R5.1 R6 R8 R9 R10 R11	1k	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	2.00	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	7.00	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.00	SI
R2.1 R2.2	100	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	0.10	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	0.10	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.00	SI
RG	470	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	0.0385	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	0.003157	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.00	SI
R3 R4	82k	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	0.50	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	0.134	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.00	SI
R5.2	10k	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	4.50	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	2.00E-10	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.0	SI
R1.2	1.5k	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	3.00	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	6.00E+00	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.00	SI

RTD1 RTD2	100	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	0.1385	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	0.00	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.00	SI
R7	2.2k	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	1.00	SI
		Power (mW)	100.00	50.00%	50.00	4.55E-04	SI
		TCASE (°C)	155.00	110.00	110.00	60.00	SI
C1	10u	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	3.31	SI
		TCASE (°C)	125.00	90.00	110.00	60.00	SI
C2 C3 C4 C5	4.7u	Voltage (V)	50.00	60.00%	30.00	15.00	SI
		TCASE (°C)	125.00	90.00	110.00	74.00	SI
L1 L2	100nF	Intensidad	2.00	20.00%	0.40	0.04	SI
		TCASE (°C)	125.00	90.00	11250.00	74.00	SI
U1,U3,U4,U5	NA	Supply voltage (VCC) (V)	15.00	90%	13.50	13.50	SI
		Input voltage (VIN)(V)	15.00	90%	13.50	3.50	SI
		Output current (Iout)(mA)	1000.00	80%	800.00	3.60	SI
		Power (mW)	600.00	60%	360.00	339.90	SI
		Tj(°C)	85.00	60.00	60.00	60.00	SI
U2	NA	Supply voltage (VCC) (V)	15.00	90%	13.50	13.50	SI
		Input voltage (VIN)(V)	12.50	90%	11.25	3.50	SI
		Output current (Iout)(mA)	1000.00	80%	800.00	4.00E-02	SI
		Power (mW)	600.00	60%	360.00	234.10	SI
		Tj(°C)	85.00	60.00	60.00	60.00	SI

Tabla 8. Tabla de derating CST.

### 5.3.5. Análisis de modos y efectos de fallo.

El análisis FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) consiste en analizar los posibles fallos que pueden producirse en los componentes del sistema y conocer sus efectos tanto para el bloque perteneciente al componente como para el conjunto en su totalidad. La severidad de los daños se suele en una escala de 1 al 4, siendo el 1 poco significativo, 2 fallo moderado, 3 fallo del sistema al que pertenece y el 4 que compromete a sistemas ajenos al suyo propio.

Para este sistema se ha considerado su análisis para el bloque CST y CP en la tabla 9 ya que tanto para el bloque CA como el CM presentan consecuencias parecidas. En el caso del CA, si un pin, una entrada o una salida funcionan de forma incorrecta provocarán que los convertidores donde sucedan no funcionen y por tanto no alimentarán al resto del circuito, por tanto serían de una severidad de nivel 4. Respecto al circuito CM presenta severidades de distinta índole, desde el nivel 4 en caso de que fallen las salidas PWM y por tanto no controlen el circuito CP, de nivel 3 en caso de que fallen los pines de la pantalla LCD provocando que el usuario no sepa del estado actual de la plancha, y por último de nivel 2 o 1 como sería el fallo del LED de encendido o el pin de lectura de la sonda. en resumen, las fallas que pueden producirse en el Arduino se basan en el cortocircuito de los pines y toda acción que controlan deja de funcionar.

Para la referenciar la tabla 9 se ha usado la misma referencia que en la tabla 8 del análisis de derating para los componentes del bloque CST y la tabla 32 de referencias de los planos para el CP.

Parte	Modo de fallo	Efectos locales	Efectos en el sistema	Daño	Síntomas Observables
R1,1	OC	Pérdida de la señal de referencia	No circula corriente por las RTD	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	SC	Fijación errónea de la corriente de referencia	Alteración de la tensión diferencial	3	No se mide correctamente la temperatura
R1,2	OC	Pérdida de la señal de referencia	No circula corriente por las RTD	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	SC	Fijación errónea de la corriente de referencia	Alteración de la tensión diferencial	3	No se mide correctamente la temperatura
R2,1	OC	Error en el diferencial de tensión	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
	SC	Error en el diferencial de tensión	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
R2,2	OC	Error en el diferencial de tensión	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
	SC	Error en el diferencial de tensión	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
RTD1	OC	Pérdida de la señal de medida	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
	SC	Pérdida de la señal de medida	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
RTD2	OC	Pérdida de la señal de medida	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
	SC	Pérdida de la señal de medida	Medición errónea de la señal	3	No se mide correctamente la temperatura
RG	OC	Pérdida de la amplificación	La señal no se ve amplificada	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	SC	Pérdida de la señal de medida	Saturación de U2	3	Medición permanente de -13 V a la salida
R3	OC	Pérdida de la señal de medida	No circula corriente en la entrada U3	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	SC	Pérdida de la señal de medida	Saturación negativa de U3	3	Medición permanente de -13 V a la salida

R4	OC	Pérdida del filtro paso bajo	Saturación negativa de U3	3	Medición permanente de -13 V a la salida
	SC	Pérdida de la señal de medida	No circula casi corriente a la salida de U3	3	Medición permanente de 1 V a la salida
R5,1	OC	Pérdida de la señal de referencia	No circula corriente por U4	3	Salida sin offset
	SC	Variación de la ganancia del offset	Alteración de la señal del offset	3	Pérdida salida del sistema
R5,2	OC	Pérdida de la señal de referencia	No circula corriente por U4	3	Salida sin offset
	SC	Variación de la ganancia del offset	Alteración de la señal del offset	3	Pérdida salida del sistema
R6	OC	Pérdida de la referencia a masa del U3	Mal funcionamiento del filtro	3	Señal comprometida
	SC	Menor resistencia a la entrada del filtro	Mayor tensión por el U3	1	No influye en la señal de medida
R7	OC	Pérdida de la señal de referencia del offset	No circula corriente por U4	3	Salida sin offset
	SC	Pérdida de la señal de referencia del offset	No circula corriente por U4	3	Salida sin offset
R8	OC	Pérdida del efecto del offset	Alteración del funcionamiento del restador	3	Salida comprometida
	SC	Mal funcionamiento del restador	Saturación de U5	3	Medición permanente de 13.5 V a la salida
R9	OC	Mal funcionamiento del restador	Saturación de U5	3	Medición permanente de 13.5 V a la salida
	SC	Pérdida del efecto del offset	Alteración del funcionamiento del restador	3	Salida comprometida
R10	OC	Pérdida de la señal de medida	No suma las señales	3	Medida del offset a la salida
	SC	Error en la adaptación de la señal de medida	Alteración del funcionamiento del restador	3	Medida de la mitad de la señal
R11	OC	Error en la adaptación de la señal de medida	Alteración del funcionamiento del restador	3	Medida de la mitad de la señal
	SC	Pérdida de la señal de medida	No suma las señales	3	Medición permanente de 1 V a la salida

C1	OC	Pérdida del elemento capacitivo	Pérdida del filtrado de la señal	2	La señal medida no estará filtrada
	SC	Pérdida del elemento capacitivo	Pérdida del filtrado de la señal	2	La señal medida no estará filtrada
C2	OC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
	SC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
C3	OC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
	SC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
C4	OC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
	SC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
C5	OC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
	SC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
L1	OC	Fallo en la alimentación	Sin alimentación en los AO	4	Pérdida salida del sistema
	SC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
L2	OC	Fallo en la alimentación	Sin alimentación en los AO	4	Pérdida salida del sistema
	SC	Pérdida de efectividad en el filtrado de la alimentación	Aumenta un poco la inestabilidad a la entrada de los AO	1	Despreciables
U1	OC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida

U1	SC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	OC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	SC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	OC (Vout)	Pérdida de la intensidad de referencia	Puente Wheatstone como divisor de tensión	3	Salida a 5 V de la etapa sensora
	SC (Vout)	Pérdida de la intensidad de referencia	Puente Wheatstone como divisor de tensión	3	Salida a 5 V de la etapa sensora
	OC (VIN-)	Pérdida de la intensidad de referencia	Pérdida de la medición	3	Salida comprometida
	SC (VIN-)	Pérdida de la intensidad de referencia	Pérdida de la medición	3	Salida comprometida
	OC (VIN+)	Pérdida de la referencia en el pin	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	SC (VIN+)	Ninguno	Ninguno	1	Ninguno
U2	OC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	SC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	OC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	SC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	OC (Vout)	Sin tensión de salida	Sin funcionamiento	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	SC (Vout)	Sin tensión de salida	Sin funcionamiento	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	OC (VIN-)	Amplificación del terminal -	Sobreganancia de la señal	3	Salida comprometida
	SC (VIN-)	Amplificación del terminal -	Sobreganancia de la señal	3	Salida comprometida
	OC (VIN+)	Amplificación del terminal +	Sobreganancia de la señal	3	Salida comprometida
	SC (VIN+)	Amplificación del terminal +	Sobreganancia de la señal	3	Salida comprometida

U2	OC (REF)	Pérdida de la referencia	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	SC (REF)	Ninguno	Ninguno	1	Ninguno
	OC (RG)	Pérdida de la ganancia de la señal	Salida de tensión pequeña	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	SC (RG)	Pérdida de la ganancia de la señal	Salida de tensión pequeña	3	Medición permanente de 1 V a la salida
U3	OC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	SC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	OC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	SC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
	OC (Vout)	Sin tensión de salida	Sin funcionamiento	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	SC (Vout)	Sin tensión de salida	Sin funcionamiento	3	Medición permanente de 1 V a la salida
	OC (VIN-)	Alteración de la señal	Pérdida de la medición	3	Salida comprometida
	SC (VIN-)	Alteración de la señal	Pérdida de la medición	3	Salida comprometida
	OC (VIN+)	Pérdida de la referencia en el pin	Alteración de la señal de medición	3	Salida comprometida
SC (VIN+)	Cortocircuito de R6	Ninguno	1	Ninguno	
U4	OC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador
	SC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador
	OC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador



U4	SC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador
	OC (Vout)	Sin tensión de salida	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador
	SC (Vout)	Sin tensión de salida	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador
	OC (VIN-)	Alteración de la ganancia del offset	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador
	SC (VIN-)	Pérdida de la funcionalidad de U4	Alteración de la señal de offset	3	Alteración del rango de entrada del microcontrolador
	OC (VIN+)	Pérdida de la referencia en el pin	Alteración de la señal de offset	3	Salida comprometida
	SC (VIN+)	Ninguno	Ninguno	1	Ninguno
U5	OC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal medida	3	Salida comprometida
	SC (+Vcc)	Pérdida de la alimentación positiva	Alteración de la señal medida	3	Salida comprometida
	OC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal medida	3	Salida comprometida
	SC (-Vcc)	Pérdida de la alimentación negativa	Alteración de la señal medida	3	Salida comprometida
	OC (Vout)	Sin tensión de salida	Sin funcionamiento	3	Pérdida total de la señal
	SC (Vout)	Sin tensión de salida	Sin funcionamiento	3	Pérdida total de la señal
	OC (VIN-)	Pérdida de la referencia en el pin	Sin funcionamiento	3	Pérdida salida del sistema
	SC (VIN-)	Pérdida de la referencia en el pin	Ninguno	3	Salida comprometida
	OC (VIN+)	Pérdida de la referencia en el pin	Pérdida de la funcionalidad de U5	3	Pérdida salida del sistema
	SC (VIN+)	Pérdida de la referencia en el pin	Ninguno	3	Salida comprometida

CP1	OC	No funciona	Compromete el funcionamiento de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
	SC	Subida de tensión y corriente en la rama	Rotura por corriente de la otra célula Peltier de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
CP2	OC	No funciona	Compromete el funcionamiento de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
	SC	Subida de tensión y corriente en la rama	Rotura por corriente de la otra célula Peltier de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
CP3	OC	No funciona	Compromete el funcionamiento de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
	SC	Subida de tensión y corriente en la rama	Rotura por corriente de la otra célula Peltier de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
CP4	OC	No funciona	Compromete el funcionamiento de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
	SC	Subida de tensión y corriente en la rama	Rotura por corriente de la otra célula Peltier de la rama	3	Pérdida de la mitad de potencia del sistema
SSH1 SSH2 SSC1 SSC2	VCC OC	No funciona	Compromete el funcionamiento del "switch"	4	Pérdida del funcionamiento del sistema
	VCC SC	No funciona	Compromete el funcionamiento del "switch"	4	Pérdida del funcionamiento del sistema
	GND OC	No funciona	Compromete el funcionamiento del "switch"	4	Pérdida del funcionamiento del sistema
	GND SC	No funciona	Compromete el funcionamiento del "switch"	4	Pérdida del funcionamiento del sistema
	PWM +OC	No funciona la conmutación	Compromete el funcionamiento del "switch"	4	Pérdida del funcionamiento del sistema

	PWM +SC	No funciona la conmutación	Compromete el funcionamiento del “switch”	4	Pérdida del funcionamiento del sistema
VENT	VCC OC	No funciona	No funciona el ventilador	4	Pérdida de disipación y calentamiento anómalo en las células Peltier
	VCC SC	No funciona	No funciona el ventilador	4	Pérdida de disipación y calentamiento anómalo en las células Peltier
	GND OC	No funciona	No funciona el ventilador	4	Pérdida de disipación y calentamiento anómalo en las células Peltier
	GND SC	No funciona	No funciona el ventilador	4	Pérdida de disipación y calentamiento anómalo en las células Peltier
	PWM +OC	No funciona la regulación	No funciona el ventilador	4	Pérdida de disipación y calentamiento anómalo en las células Peltier
	PWM +SC	No funciona la regulación	No funciona el ventilador	4	Pérdida de disipación y calentamiento anómalo en las células Peltier

Tabla 9. Análisis FMEA.

### 5.3.6. Simulaciones del circuito digital

Para visualizar el comportamiento del circuito digital de la interfaz de usuario, teniendo en cuenta los cambios hechos para su simulación señalados en apartado 5.2.3.3, se han planteado cuatro casos diferentes.

Cabe destacar que en la pantalla LCD no muestra correctamente el carácter “°C” debido al modelo del simulador. La mayoría de pantallas LCD comerciales emplea la sentencia `lcd.print("\337C")`; para mostrar los grados Celsius, o en su defecto, viene indicado por el fabricante. A efectos prácticos de los resultados mostrados resulta un inconveniente poco significativo.

En la primera simulación en la figura 37, se emula un caso en reposo, en concreto, la situación del encendido del sistema. La temperatura ambiente, y por ende en la plancha, es la misma que la del objetivo que por defecto está a 23 °C. En este caso no debería estar activa ninguna señal PWM, las temperaturas que deben mostrarse en la pantalla deben ser las mismas y el led de encendido estar siempre activo.

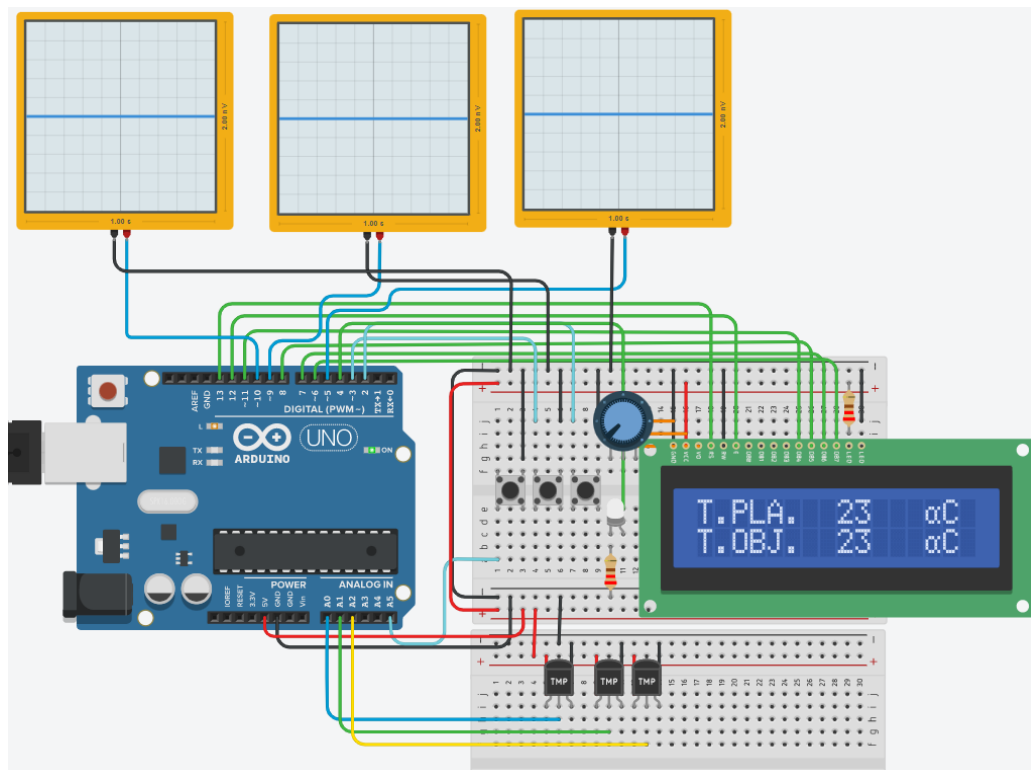


Figura 37. Plancha en estado de reposo.

En la figura 38 y 39 se simulan las situaciones en las que el CP debe estar calentando o enfriando continuamente con los ventiladores funcionando a su tope de capacidad para mantener la cara de la célula Peltier cercana al disipador a temperatura constante.

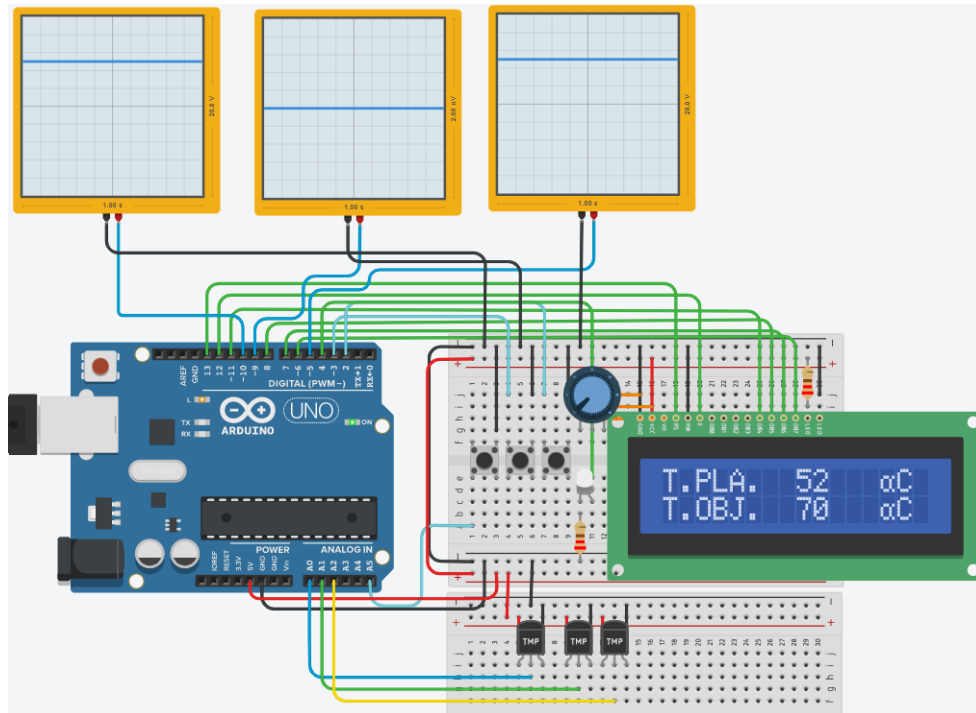


Figura 38. Plancha a 52°C calentando hasta 70 °C.

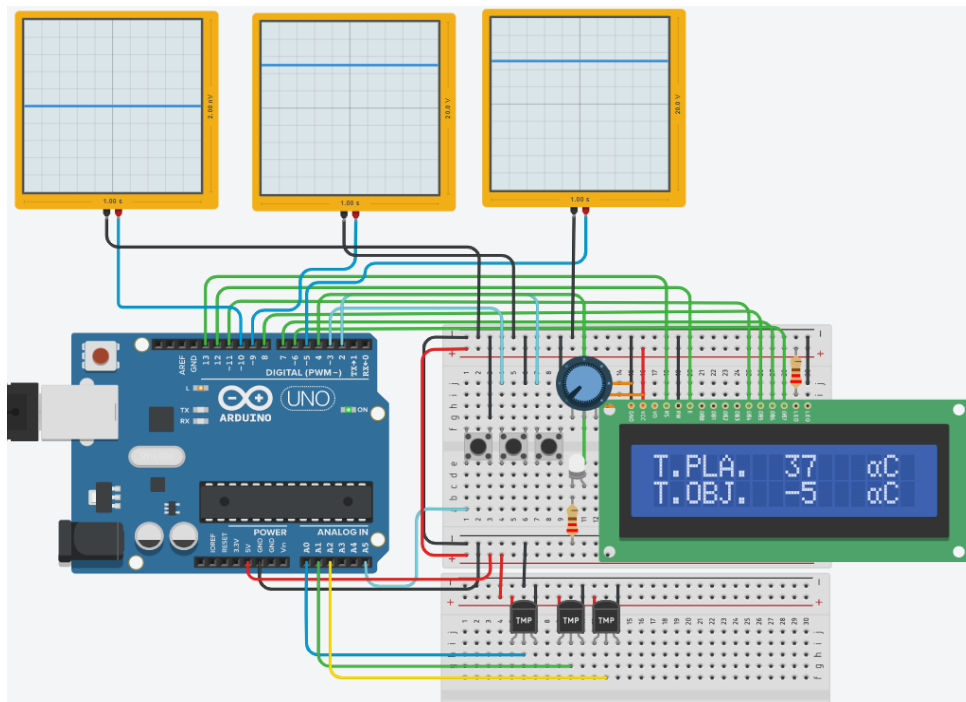


Figura 39. Plancha a 37 °C enfriando hasta -5 °C.

Por último, la figura 40 representa la temperatura en la sonda, que puede diferir de la temperatura en la plancha ya que sirve para medir la temperatura de los componentes que están encima de la plancha, aún así, la temperatura de referencia que controla el sistema sigue siendo la de la plancha. Para mostrar esto, en el simulador se simula el mismo caso que la figura 38 de temperatura en la plancha y temperatura objetivo, pero en la sonda se simula como si estuviera a 74 °C. De esta manera, aunque en la sonda indique más temperatura, la variable de control del sistema es la temperatura en la plancha y las PWM muestran que el sistema está calentando.

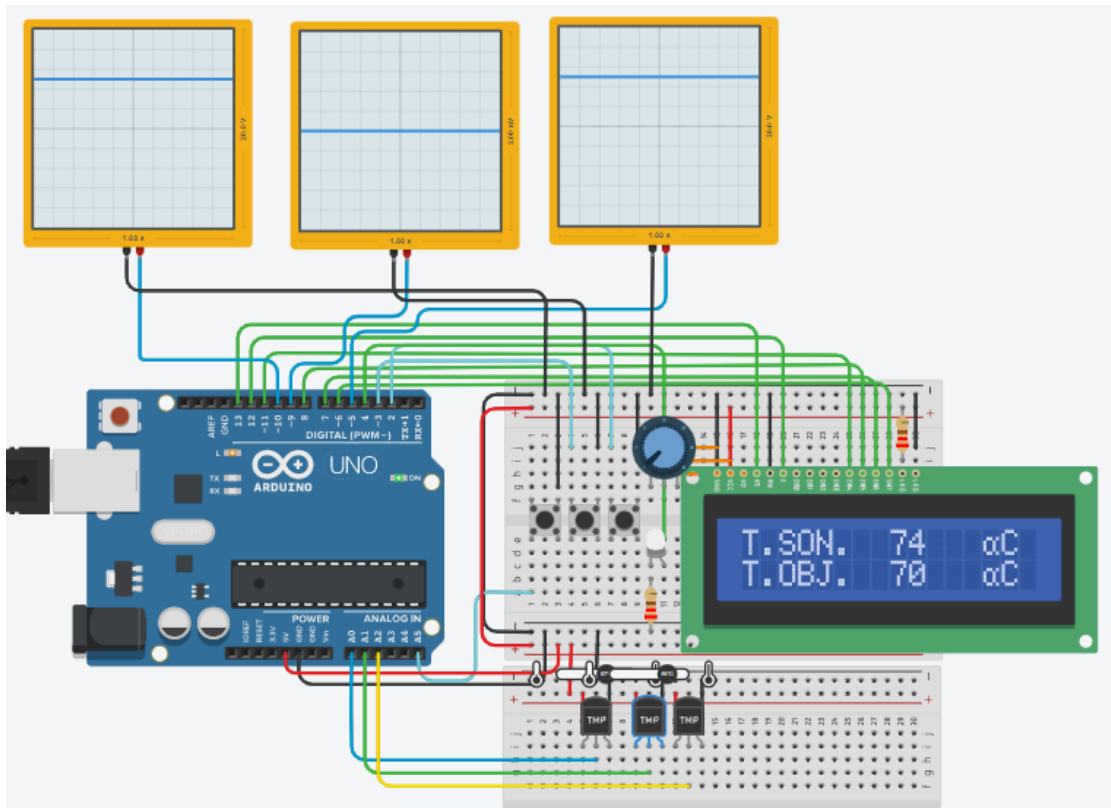


Figura 40. Plancha a 52 °C calentando hasta 70 °C con la sonda a 74 °C.

## 5.4. Conclusiones y revisión de especificaciones

Especificación	Comportamiento	Sí/No
1. Temperatura en la plancha de -10 a 100 °C	Con la potencia aplicada, el control implementado y una temperatura de unión de 138 °C de las células Peltier sumado a la baja resistencia térmica en la cara de la plancha, el sistema cumple con el rango.	Sí
2. Tolerancia de máximo 4 °C en el circuito de medición	Error máximo medido en el análisis de WC de 3.6 °C y sobreoscilación menor del 1 % en el PI. Además, se puede calibrar posteriormente vía software.	Sí
3. Potencia superior a 700 W de energía eléctrica	La potencia máxima aplicada al circuito CP es de 720 W .	Sí
4. Disipación de calor forzada	Disipador “Pin Fin” acoplado a dos ventiladores con regulación PWM con circuito de medición en el disipador.	Sí
5. Sonda de temperatura externa	Sonda externa con circuito de medición propio y visualización en pantalla LCD.	Sí
6. Sistema de control PI	Control PI con regulación PWM en el circuito CP.	Sí
7. Sistema portátil y ligero	Dimensiones de la carcasa menores a 400 x 400 x 300 mm y un peso menor de 15 kg.	Sí
8. Principios mínimos de seguridad	La carcasa de la plancha térmica está hecha de ABS, un material aislante eléctricamente que aislará al usuario. Las rendijas diseñadas para la entrada y salida del aire son de un grosor inferior al dedo de un niño.	Sí
9. Sistema duradero en el tiempo	Las células Peltier pueden durar más de 100.000 horas de uso, esto sumado a unos rangos de poco estrés en los componentes electrónicos garantiza la viabilidad del sistema a largo plazo.	Sí
10. Fuente primaria de la red eléctrica	El sistema se alimenta de la tensión de la red eléctrica que pasa por un filtro comercial y un conjunto de convertidores.	Sí
11. Programación de la temperatura objetivo	Dos botones en la interfaz de usuario para definir la temperatura objetivo programados mediante interrupciones para agilizar la actualización del algoritmo	Sí

Tabla 10. Matriz de cumplimiento de especificaciones.

Con la tabla 10 se han analizado las características y los comportamientos del sistema para cada especificación planteada como objetivo de la plancha térmica para laboratorio diseñada, las cuáles se puede decir que se han cumplido satisfactoriamente.

Para la realización de esta propuesta de una plancha térmica para test en laboratorio para la empresa DAS Photonics S.L. se ha comprobado, simulado y analizado el funcionamiento de tres circuitos medidores de temperatura iguales mediante PSpice for TI al igual que el manejo de consumos del circuito de las células Peltier, se ha diseñado una interfaz de usuario con Tinkercad e implementado el control de temperatura con Arduino IDE y Matlab. Adicionalmente se ha realizado el diseño de la carcasa en 3D mediante el programa Solidworks y el diseño de las PCB con Altium por lo que en el futuro sólo quedaría su montaje y testeo .

Por tanto, después de comprobar su comportamiento, se puede concluir que la plancha térmica resulta útil y viable para su finalidad a largo plazo. A nivel personal, este trabajo me ha ayudado a poner en perspectiva y afianzar todos los conocimientos que he conseguido durante estos años en el grado y me ha enseñado cuáles son los puntos de vista más importantes a tener en cuenta de cara a diseñar un proyecto, por tanto me siento satisfecho.



## **6. Bibliografía**

### **6.1. Fuentes generales**

#### **Aplicaciones de células Peltier:**

*Aplicaciones de las células de Peltier – Soloelectronics.com.* (2016, May 29). Soloelectronics.com. Retrieved June 16, 2022, from <https://soloelectronics.com/2016/05/29/aplicaciones-de-las-celulas-de-peltier/>

#### **Lenguaje Arduino:**

*Arduino.cc.* (n.d.). Arduino - Home. Retrieved June 16, 2022, from <https://www.arduino.cc/>

#### **Linealización de sistemas continuos:**

Casanova Calvo, V., Salt Llobregat, J. J., Cuenca Lacruz, Á., & Correcher Salvador, A. (2016). *Control automático: tiempo continuo y tiempo discreto* (Universidad Politécnica de Valencia, Ed.). Reverté.

#### **Librería de PID para Arduino UNO:**

*Librería Arduino PIDController.* (2021, May 1). Luis Llamas. Retrieved June 16, 2022, from <https://www.luisllamas.es/libreria-arduino-pidcontroller/>

#### **Porcentajes de beneficio industrial y gastos generales:**

*Ministerio de Hacienda.* (n.d.). Expediente 40/19. <https://www.hacienda.gob.es/Lists/DGPatrimonio/junta%20consultiva/informes/informes%202020/2019-040gastosgrales.pdf>

#### **Efecto Peltier:**

Patterson, G., & Sobral, M. (2007, December 5). *EFECTO PELTIER.* Retrieved June 16, 2022, from <http://materias.df.uba.ar/labo4aa2014c1/files/2012/07/Efecto-Peltier.pdf>

## 6.2. Hojas de características

### Arduino:

*Arduino® UNO R3*. (2022, 06 15). Arduino Documentation. Retrieved June 16, 2022, from <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>

### Condensadores:

*C0805c Capacitor series*. (2020, April 17). Kemet. Retrieved June 20, 2022, from <https://connect.kemet.com:7667/gateway/IntelliData-ComponentDocumentation/1.0/download/datasheet/C0805C106K8RACTU.pdf>

### Resistencias:

*D/CRCW-P Lead (Pb)-Bearing Thick Film, Rectangular, Semi-Precision Chip Resistors*. (2022, June 7). Vishay. Retrieved June 16, 2022, from <https://www.vishay.com/docs/20009/dcrcwp.pdf>

### “Switch” estado sólido:

*DC switching solid state relays*. (2021, August 31). Gavazzi Automation. Retrieved June 17, 2022, from [https://gavazziautomation.com/images/PIM/DATASHEET/ENG/SSR\\_RM1D.pdf](https://gavazziautomation.com/images/PIM/DATASHEET/ENG/SSR_RM1D.pdf)

### Pantalla LCD:

*DISPLAY LCD DATASHEET*. (2008, October 29). XIAMEN AMOTEC DISPLAY CO.,LTD. Retrieved June 17, 2022, from [https://components101.com/sites/default/files/component\\_datasheet/16x2%20LCD%20Datasheet.pdf](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/16x2%20LCD%20Datasheet.pdf)

### RTD:

*005-0714 Thin Film Elements Pt100 & Pt1000.pub*. (n.d.). Farnell. Retrieved June 17, 2022, from <https://www.farnell.com/datasheets/1918818.pdf>

### INA101:

*High Accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER*. (1998, July). Texas Instrument. Retrieved June 16, 2022, from [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina101.pdf?ts=1655204076643&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA101%253Futm\\_source%253Dgoogle%2526ut](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina101.pdf?ts=1655204076643&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA101%253Futm_source%253Dgoogle%2526ut)

m\_medium%253Dcpc%2526utm\_campaign%253Dasc-null-null-GPN\_EN-cpc-pf-google-ww  
e%2526utm\_content%253DINA

### **LDO +8 V:**

*High-Current Low Dropout Regulators*. (2016-2019). Microchip Technology. Retrieved July 4, 2022, from <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MIC2915x-30x-50x-75x-High-Current-Low-Dropout-Regulators-DS20005685B.pdf>

### **LDO +5 V:**

*LM2931AT-5.0 Datasheet(PDF) - Texas Instruments*. (2013). ALLDATASHEET.ES. Retrieved July 4, 2022, from <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/517664/TI1/LM2931AT-5.0.html>

### **Ventiladores:**

*140×140×38mm*. (n.d.). SANYO DENKI. Retrieved June 30, 2022, from [https://www.sanyodenki.com/archive/document/product/cooling/catalog\\_E\\_pdf/San\\_Ace\\_140GV38\\_E.pdf](https://www.sanyodenki.com/archive/document/product/cooling/catalog_E_pdf/San_Ace_140GV38_E.pdf)

### **Lámina de grafito:**

*Panasonic Industry PGS Graphite Sheets*. (2021, April 1). EYG type. Retrieved June 17, 2022, from <https://mediap.industry.panasonic.eu/assets/imported/industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/AYA0000/AYA0000C27.pdf>

### **Célula Peltier:**

*Peltier Cooler-196W*. (2021, January 7). Farnell-multicom PRO RoHS Compliant. Retrieved June 17, 2022, from <https://www.farnell.com/datasheets/3179205.pdf>

### **Convertidor AC/DC:**

RECOM Power GmbH. (2022, Marzo). *RACM 1200-V Series*. recom-power.com from <https://g.recomcdn.com/media/Datasheet/pdf/.fSR5Ll8X/.t0fdae02d8c3a59867e39/Datasheet-437/RACM1200-V.pdf>

### **Convertidor +24 V:**

*TEP 160 Datasheet.* (2022, April 27). Traco Power. Retrieved June 17, 2022, from [https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tep160\\_datasheet.pdf](https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tep160_datasheet.pdf)

### **Convertidor DC/DC $\pm$ 15 V:**

*THM 6 Datasheet.* (2022, March 10). Traco Power. Retrieved June 17, 2022, from [https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/thm6\\_datasheet.pdf](https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/thm6_datasheet.pdf)

### **Inductancias:**

*SMT Power Inductor.* (2003, January 1). MOUSER.  
<https://www.mouser.es/datasheet/2/445/78439369047-2936550.pdf>

### **TL081:**

*TL081 data sheet, product information and support | TI.com.* (n.d.). Texas Instruments. Retrieved June 17, 2022, from <https://www.ti.com/product/TL081>

### **Filtro de red:**

*Customer Drawing P-Series.* (1997, April 2). Tyco Electronics. Retrieved June 17, 2022, from <https://www.farnell.com/cad/1649805.pdf>

### **Disipador:**

*Heat Sink Datasheet Sparse.* (n.d.). Cool Innovations Advanced Heat Sinks.  
<https://coolinnovations.com/datasheets/3-9797XXM.pdf>

### 6.3. Figuras externas

#### Tabla de resistencias normalizadas:

*D008 Resistencias*. (n.d.). Electrónica para aficionados. Retrieved June 17, 2022, from <http://electronicamagomiguelon.blogspot.com/p/d008-resistencias.html>

#### Tabla de inductancias normalizadas:

*Inductancias normalizadas*. (2019, March 2). Serie de resistencias, condensadores, inductores. Retrieved June 17, 2022, from <https://electroexp.com/es/ryady-nominalov-radiodetalej.html>

#### Tabla de valores de las RTD PT100:

*SENSORES DE TEMPERATURA RESISTENCIAS TERMOELÉCTRICAS*. (n.d.). Universitat Politècnica de València. Retrieved June 17, 2022, from [https://poliformat.upv.es/access/content/group/GRA\\_12160\\_2021/Presentaciones/SeIV\\_SensoresTemperatura\\_RTDS\\_20\\_21.pdf](https://poliformat.upv.es/access/content/group/GRA_12160_2021/Presentaciones/SeIV_SensoresTemperatura_RTDS_20_21.pdf)

#### Tabla de condensadores normalizados:

*Valores Comerciales de Capacitores*. (n.d.). Reparación Técnica. Retrieved June 17, 2022, from <https://tecnicoreparacion.blogspot.com/2012/06/valores-comerciales-de-capacitores.html>

#### Caras de la Células Peltier:

*Generar frío con una Célula Peltier cerámica TEC1-12706*. (2016, October 6). Mi Arduino Uno tiene un BLOG. Retrieved July 28, 2022, from <https://miaridinounotieneunblog.blogspot.com/2016/10/generar-frio-con-una-celula-peltier.html>

#### Teorema de Thevenin:

*Teorema de Thevenin explicado para que lo Entiendas*. (2019, November 7). Teorema. Retrieved July 28, 2022, from <https://www.teorema.top/teorema-de-thevenin/>

## 7. Anexo

### 7.1. Extractos específicos de datasheets

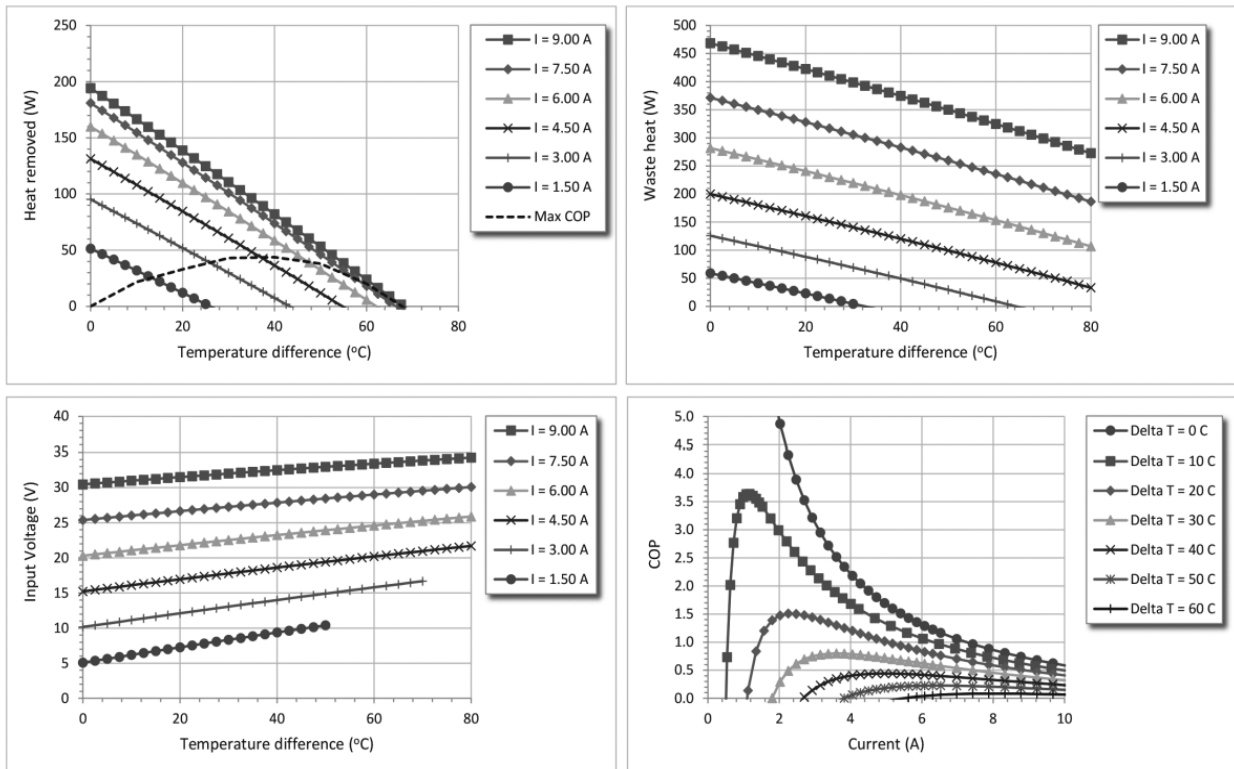
#### 7.1.1. Células Peltier

### Specifications

I <sub>max</sub>	9A
V <sub>max</sub>	35.9V DC
P <sub>c</sub> max	196W
ACR	3.1Ω
ΔT <sub>max</sub>	68°C
Max hot side temperature	90°C

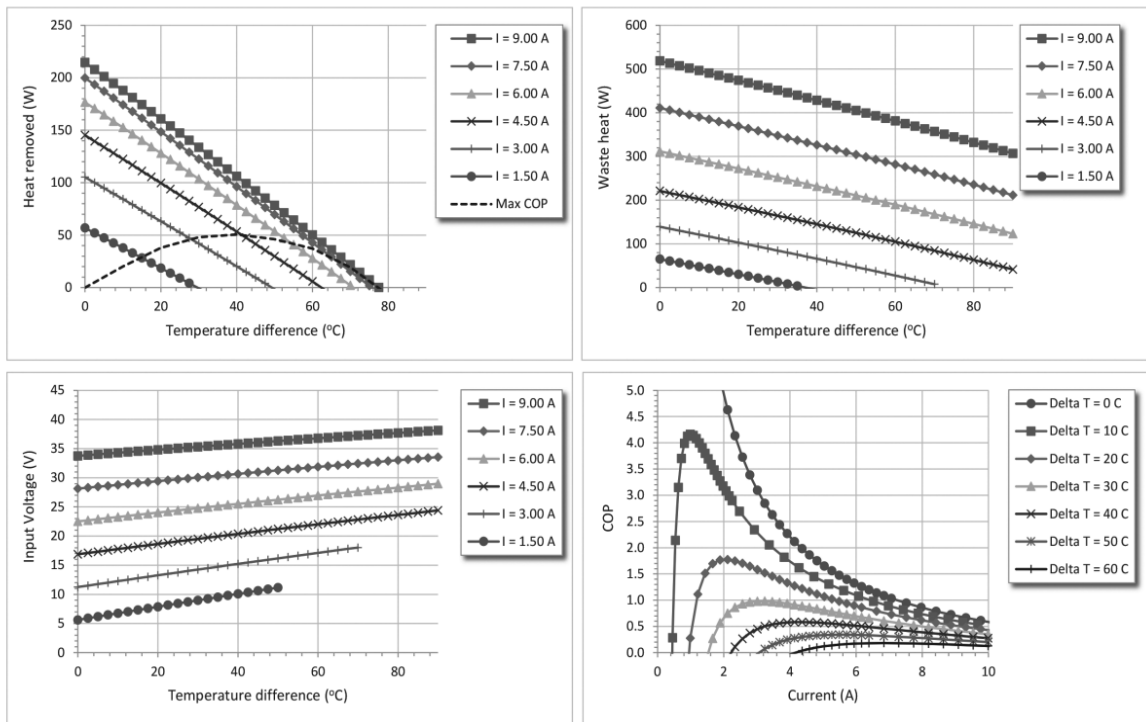
Tabla 11 .Tabla de valores nominales de la célula Peltier (*Peltier Cooler-196W*, 2021).

### At hot side temperature 25°C



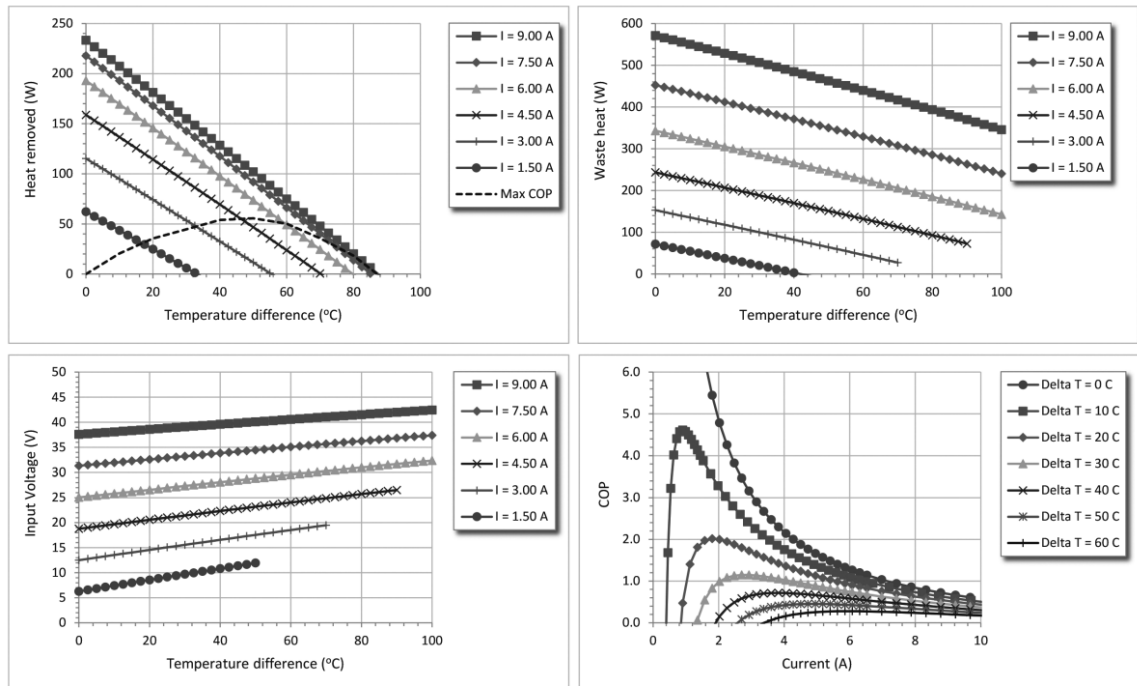
Gráfica 16. Gráficas de comportamiento a 25 °C (*Peltier Cooler-196W*, 2021).

### At hot side temperature 50°C



Gráfica 17. Gráficas de comportamiento a 50 °C (*Peltier Cooler-196W*, 2021).

### At hot side temperature 75°C



Gráfica 18. Gráficas de comportamiento a 75 °C (*Peltier Cooler-196W*, 2021).

## 7.1.2. Convertidor AC/DC

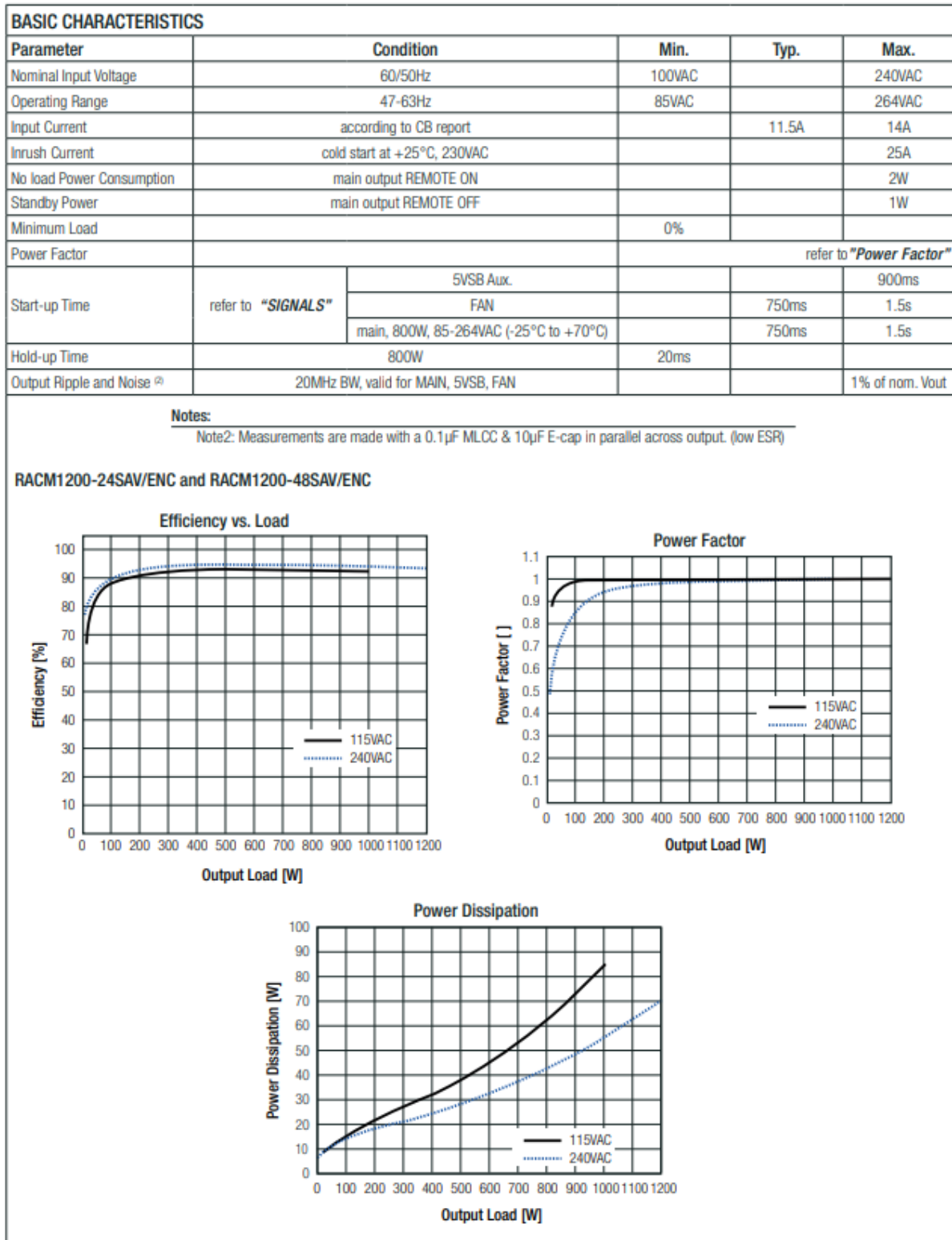


Figura 41. Características principales del convertidor AC/DC (RECOM Power GmbH).



### 7.1.3. Convertidor DC/DC 24 V

Models				
Order Code	Input Voltage Range	Output Voltage nom.	Output Current max.	Efficiency typ.
TEP 160-2412	16.5 - 36 VDC (24 VDC nom.)	12 VDC	13'000 mA	92 %
TEP 160-2413		15 VDC	10'000 mA	92 %
TEP 160-2415		24 VDC	6'500 mA	93 %
TEP 160-2416		28 VDC	5'500 mA	93 %
TEP 160-2418		48 VDC	3'300 mA	92 %
TEP 160-4812	33 - 75 VDC (48 VDC nom.)	12 VDC	16'000 mA	92 %
TEP 160-4813		15 VDC	13'000 mA	93 %
TEP 160-4815		24 VDC	8'000 mA	92 %
TEP 160-4816		28 VDC	7'000 mA	92 %
TEP 160-4818		48 VDC	4'000 mA	92 %
TEP 160-48153		53 VDC	3'700 mA	92 %

Tabla 12. Características de salida del convertidor de 24 V (*TEP 160 Datasheet, 2022*).

### 7.1.4. Convertidor DC/DC $\pm 15$ V

Models						
Order Code	Input Voltage Range	Output 1		Output 2		Efficiency typ.
		Vnom	I <sub>max</sub>	Vnom	I <sub>max</sub>	
THM 6-0510	4.5 - 9 VDC (5 VDC nom.)	3.3 VDC	1'800 mA			82 %
THM 6-0511		5 VDC	1'200 mA			86 %
THM 6-0512		12 VDC	500 mA			86 %
THM 6-0513		15 VDC	400 mA			88 %
THM 6-0515		24 VDC	250 mA			87 %
THM 6-0521		+5 VDC	600 mA	-5 VDC	600 mA	84 %
THM 6-0522		+12 VDC	250 mA	-12 VDC	250 mA	87 %
THM 6-0523		+15 VDC	200 mA	-15 VDC	200 mA	88 %
THM 6-1210	9 - 18 VDC (12 VDC nom.)	3.3 VDC	1'800 mA			84 %
THM 6-1211		5 VDC	1'200 mA			86 %
THM 6-1212		12 VDC	500 mA			89 %
THM 6-1213		15 VDC	400 mA			89 %
THM 6-1215		24 VDC	250 mA			89 %
THM 6-1221		+5 VDC	600 mA	-5 VDC	600 mA	85 %
THM 6-1222		+12 VDC	250 mA	-12 VDC	250 mA	89 %
THM 6-1223		+15 VDC	200 mA	-15 VDC	200 mA	88 %
THM 6-2410	18 - 36 VDC (24 VDC nom.)	3.3 VDC	1'800 mA			83 %
THM 6-2411		5 VDC	1'200 mA			86 %
THM 6-2412		12 VDC	500 mA			89 %
THM 6-2413		15 VDC	400 mA			89 %
THM 6-2415		24 VDC	250 mA			89 %
THM 6-2421		+5 VDC	600 mA	-5 VDC	600 mA	85 %
THM 6-2422		+12 VDC	250 mA	-12 VDC	250 mA	89 %
THM 6-2423		+15 VDC	200 mA	-15 VDC	200 mA	89 %
THM 6-4810	36 - 75 VDC (48 VDC nom.)	3.3 VDC	1'800 mA			83 %
THM 6-4811		5 VDC	1'200 mA			87 %
THM 6-4812		12 VDC	500 mA			88 %
THM 6-4813		15 VDC	400 mA			89 %
THM 6-4815		24 VDC	250 mA			88 %
THM 6-4821		+5 VDC	600 mA	-5 VDC	600 mA	85 %
THM 6-4822		+12 VDC	250 mA	-12 VDC	250 mA	88 %
THM 6-4823		+15 VDC	200 mA	-15 VDC	200 mA	87 %

Tabla 13. Características de salida del convertidor de 15 V (*THM 6 Datasheet, 2022*).

## 7.1.5. Convertidor INA101

# SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL

At +25°C with ±15VDC power supply and in circuit of Figure 1, unless otherwise noted.

PARAMETER	INA101AM, AG			INA101SM, SG			INA101CM, CG			INA101HP, KU			UNITS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
<b>GAIN</b>	1		1000	*		*	*		*	*		*	V/V
Range of Gain		$G = 1 + (40k/R_G)$			*	*		*	*		*	*	V/V
Gain Equation		$\pm(0.04 + 0.00016G$	$\pm(0.1 + 0.0003G$		*	*		*	*		$\pm(0.1 +$	$\pm(0.3 +$	%
Error from Equation, DC <sup>(1)</sup>		$-0.02/G)$	$-0.05/G)$								$0.00015G)$	$0.0002G)$	
Gain Temp. Coefficient <sup>(3)</sup>											$-0.05/G)$	$-0.10/G)$	
G = 1		2	5		*	*		*	*		*	*	ppm/°C
G = 10		20	100		*	*		10	*		*	*	ppm/°C
G = 100		22	110		*	*		11	*		*	*	ppm/°C
G = 1000		22	110		*	*		11	*		*	*	ppm/°C
Nonlinearity, DC <sup>(2)</sup>		$\pm(0.002 + 10^{-5} G)$	$\pm(0.005 + 2 \times 10^{-5} G)$		$\pm(0.001$	$\pm(0.002$		$\pm(0.001$	$\pm(0.002$		$\pm(0.002$	$\pm(0.002$	% of p-p FS
					$+10^{-5} G)$	$+10^{-5} G)$		$+10^{-5} G)$	$+10^{-5} G)$		$+10^{-5} G)$	$+10^{-5} G)$	
<b>RATED OUTPUT</b>													V
Voltage	±10	±12.5		*	*		*	*		*	*		mA
Current	±5	±10		*	*		*	*		*	*		Ω
Output Impedance		0.2			*			*			*		pF
Capacitive Load		1000			*			*			*		

Tabla 14. Características del INA101 (*High Accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER*, 1998).

## 7.1.6. Amplificador Operacional TL081

### 6.6 Recommended Operating Conditions: All Other Devices

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT	
V <sub>cc+</sub>	Supply voltage	5	15	V	
V <sub>cc-</sub>	Supply voltage	-5	-15	V	
V <sub>cm</sub>	Common-mode voltage	V <sub>cc-</sub> + 4 V <sub>cc+</sub> - 4		V	
T <sub>A</sub>	Ambient temperature	TL08xM	-55	125	°C
		TL08xQ	-40	125	
		TL08xI	-40	85	
		TL08xC	0	70	

Tabla 15. Características del TL081 (*TL081 Data Sheet, Product Information and Support* | TI.com, n.d.).

### 7.1.7. “Switch” de estado sólido

**Selection guide**

Rated output voltage	Control voltage	Maximum rated operational current*			
		10 ADC	20 ADC	50 ADC	100 ADC
1-60 VDC	4-32 VDC	RM1D060D10	RM1D060D20	RM1D060D50	RM1D060D100
1-200 VDC	4.5-32 VDC	-	RM1D200D20	RM1D200D50	-
1-500 VDC		RM1D500D10	-	-	-

Tabla 16. Rangos de tensión del “switch” (*DC Switching Solid State Relays*, 2021).

RM1D200D..

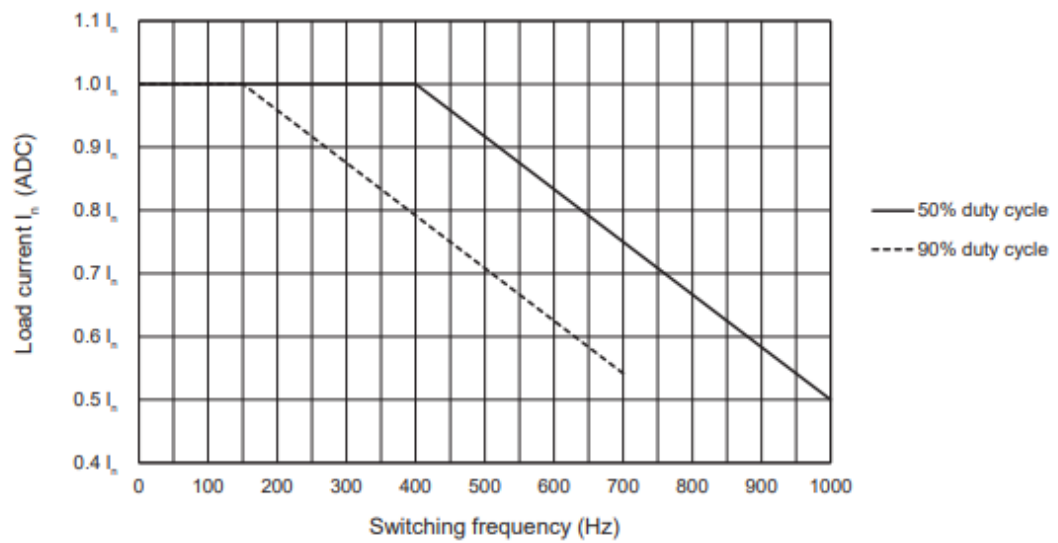


Fig. 5 Current derating vs. switching frequency\*

Gráfica 19. Rangos de conmutación del “switch” (*DC Switching Solid State Relays*, 2021).

## 7.1.8. Arduino

### Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

Figura 42. Características del Arduino UNO (*Arduino® UNO R3*, 2022).

## 7.1.9. Ventiladores

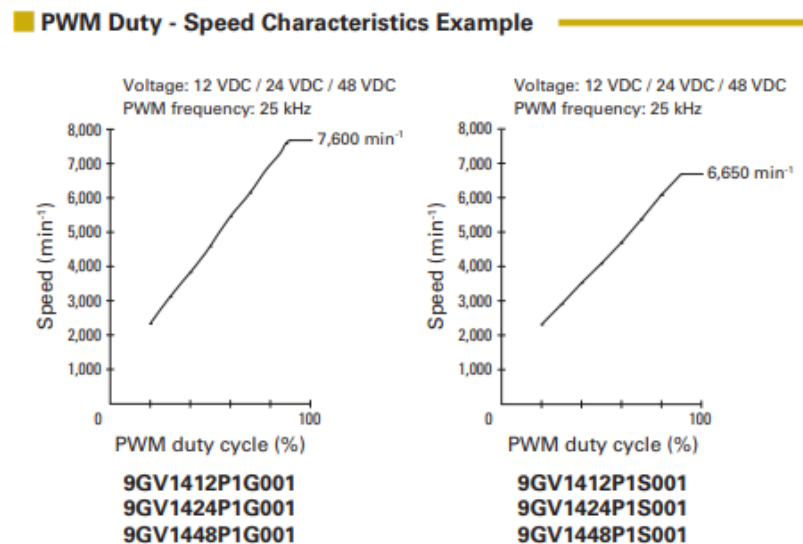


Figura 43. Características del PWM del ventilador (*140×140×38 mm, Sanyo Denki*).

### 7.1.10. LDOs

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Output Voltage	$V_{OUT}$	-1	—	1	%	$I_{OUT} = 10 \text{ mA}$
		-2	—	2		$10 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{FL}$ , $(V_{OUT} + 1V) \leq V_{IN} \leq 26V$ (Note 3)
Line Regulation		—	0.06	0.5	%	$I_{OUT} = 10 \text{ mA}$ , $(V_{OUT} + 1V) \leq V_{IN} \leq 26V$
Load Regulation		—	0.2	1	%	$V_{IN} = V_{OUT} + 1V$ , $10 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1.5A$ (Note 3, Note 4)

Tabla 17. Características de LDO de 8 V (*High-Current Low Dropout Regulators*, 2016-2019).

### LM2931, NCV2931 Series

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_{in} = 14 \text{ V}$ ,  $I_O = 10 \text{ mA}$ ,  $C_O = 100 \mu\text{F}$ ,  $C_{O(ESR)} = 0.3 \Omega$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  [Note 5])

Characteristic	Symbol	LM2931-5.0/NCV2931-5.0			LM2931A-5.0/NCV2931A-5.0			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>FIXED OUTPUT</b>								
Output Voltage	$V_O$							V
$V_{in} = 14 \text{ V}$ , $I_O = 10 \text{ mA}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		4.75	5.0	5.25	4.81	5.0	5.19	
$V_{in} = 6.0 \text{ V to } 26 \text{ V}$ , $I_O \leq 100 \text{ mA}$ , $T_A = -40^\circ \text{ to } +125^\circ\text{C}$		4.50	—	5.50	4.75	—	5.25	

Tabla 18. Características de LDO de 5 V. (*LM2931AT-5.0 Datasheet(PDF)* - Texas Instruments, 2013).

### 7.1.10. Disipador

THE PIN FIN APPROACH: Round pin formations produce outstanding cooling power

P/N	Height in(mm)	Base in(mm)	Weight lb(g)	Thermal Resistance in $^\circ\text{C/W}$			
				0(0)*	200(1)	400(2)	600(3)
3-979710M	1.00(25.4)	0.38(9.5)	4.34(1969)	0.64	0.184	0.097	0.066
3-979712M	1.20(30.5)	0.38(9.5)	4.68(2122)	0.53	0.136	0.072	0.050
3-979714M	1.40(35.6)	0.38(9.5)	5.01(2274)	0.48	0.107	0.057	0.044
3-979715M	1.50(38.1)	0.38(9.5)	5.18(2350)	0.46	0.097	0.053	0.041
3-979716M	1.60(40.6)	0.38(9.5)	5.35(2426)	0.43	0.088	0.050	0.039
3-979718M	1.80(45.7)	0.38(9.5)	5.69(2579)	0.38	0.075	0.045	0.035
3-979720M	2.00(50.8)	0.38(9.5)	6.02(2731)	0.34	0.066	0.041	0.032
3-979722M	2.20(55.9)	0.38(9.5)	6.36(2884)	0.30	0.058	0.038	0.029
3-979724M	2.40(61.0)	0.38(9.5)	6.69(3036)	0.27	0.052	0.035	0.027
3-979725M	2.50(63.5)	0.38(9.5)	6.86(3112)	0.25	0.050	0.034	0.026

Tabla 19. Características del disipador.

## 7.2. Tablas de componentes

### 7.2.1. Resistencias

#### Series de resistencias eléctricas, E6 - E12 - E24 - E48, norma IEC

E6	1.0		1.5		2.2		3.3		4.7		6.8													
E12	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	3.9	4.8	5.6	6.8	8.2												
E24	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
E48	1.0	1.05	1.10	1.15	1.21	1.27	1.33	1.40	1.47	1.54	1.62	1.69												
	1.78	1.87	1.96	2.05	2.15	2.26	2.37	2.49	2.61	2.74	2.87	3.01												
	3.16	3.32	3.48	3.65	3.83	4.02	4.22	4.42	4.64	4.87	5.11	5.36												
	5.62	5.90	6.19	6.49	6.81	7.15	7.50	7.87	8.25	8.66	9.09	9.53												

■ Tolerancia de las series: E6 20% - E12 10% - E24 5% - E48 2%

Valores de la resistencias en  $\Omega$ ,  $K\Omega$ ,  $M\Omega$  IEC = Comisión Eléctrica Internacional

Tabla 20. Tabla de resistencias normalizadas (*D008 Resistencias*, n.d.).

### 7.2.2. Bobinas

Кодовое обозначение		пкФ (pF)	нФ (nF)	мкФ ( $\mu$ F)
E3	E6			
101	101	100,0	0.1	0.0001
	151	150,0	0.15	0.00015
221	221	220,0	0.22	0.00022
	331	330,0	0.33	0.00033
471	471	470,0	0.47	0.00047
	681	680,0	0.68	0.00068
102	102	1000,0	1.0	0.001
	152	1500,0	1,5	0.0015
222	222	2200,0	2,2	0.0022
	332	3300,0	3,3	0.0033
472	472	4700,0	4,7	0.0047
	682	6800,0	6,8	0.0068

Tabla 21 .Tabla de inductancias normalizadas (*Inductancias Normalizadas*, 2019).

### 7.2.3. RTD

Pt<sup>°C</sup>

TABLE 29 100Ω Platinum RTD — 0.00385 coefficient  
temperature in °C

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
-200	18.52											-200
-190	22.83	22.40	21.97	21.54	21.11	20.68	20.25	19.82	19.38	18.95	18.52	-190
-180	27.10	26.67	26.24	25.82	25.39	24.97	24.54	24.11	23.68	23.25	22.83	-180
-170	31.34	30.91	30.49	30.07	29.64	29.22	28.80	28.37	27.95	27.52	27.10	-170
-160	35.54	35.12	34.70	34.28	33.86	33.44	33.02	32.60	32.18	31.76	31.34	-160
-150	39.72	39.31	38.89	38.47	38.05	37.64	37.22	36.80	36.38	35.96	35.54	-150
-140	43.88	43.46	43.05	42.63	42.22	41.80	41.39	40.97	40.56	40.14	39.72	-140
-130	48.00	47.59	47.18	46.77	46.36	45.94	45.53	45.12	44.70	44.29	43.88	-130
-120	52.11	51.70	51.29	50.88	50.47	50.06	49.65	49.24	48.83	48.42	48.00	-120
-110	56.19	55.79	55.38	54.97	54.56	54.15	53.75	53.34	52.93	52.52	52.11	-110
-100	60.26	59.85	59.44	59.04	58.63	58.23	57.82	57.41	57.01	56.60	56.19	-100
-90	64.30	63.90	63.49	63.09	62.68	62.28	61.88	61.47	61.07	60.66	60.26	-90
-80	68.33	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.11	64.70	64.30	-80
-70	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73	68.33	-70
-60	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73	72.33	-60
-50	80.31	79.91	79.51	79.11	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73	76.33	-50
-40	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70	80.31	-40
-30	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67	84.27	-30
-20	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62	88.22	-20
-10	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55	92.16	-10
0	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	96.09	0
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	103.90	0
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	107.79	10
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	111.67	20
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	115.54	30
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	119.40	40
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	123.24	50
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	127.08	60
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	130.90	70
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	134.71	80
90	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	138.51	90
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	142.29	100
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69	146.07	110

Tabla 22. Tabla de valores óhmicos de las RTD empleadas (*SENSORES DE TEMPERATURA RESISTENCIAS TERMOELÉCTRICAS*, n.d.).

## 7.2.4. Condensadores

TABLA # 1

TABLA DE VALORES COMERCIALES DE CAPACITORES							
CÓDIGO	pF	nF	uF	CÓDIGO	pF	nF	uF
105K	1.000.000	1.000	1	102K	1.000	1	0.001
824K	820.000	820	0.82	821K	820	0.82	0.00082
804K	800.000	800	0.80	801K	800	0.80	0.00080
704K	700.000	700	0.70	701K	700	0.70	0.00070
684K	680.000	680	0.68	681K	680	0.68	0.00068
604K	600.000	600	0.60	601K	600	0.60	0.00060
564K	560.000	560	0.56	561K	560	0.56	0.00056
504K	500.000	500	0.50	501K	500	0.50	0.00050
474K	470.000	470	0.47	471K	470	0.47	0.00047
404K	400.000	400	0.40	401K	400	0.40	0.00040
394K	390.000	390	0.39	391K	390	0.39	0.00039
304K	300.000	300	0.30	331K	330	0.33	0.00030
274K	270.000	270	0.27	301K	300	0.30	0.00027
254K	250.000	250	0.25	271K	270	0.27	0.00025
224K	220.000	220	0.22	251K	250	0.25	0.00022
204K	200.000	200	0.20	221K	220	0.22	0.00020
184K	180.000	180	0.18	181K	180	0.18	0.00018
154K	150.000	150	0.15	151K	150	0.15	0.00015
124K	120.000	120	0.12	121K	120	0.12	0.00012
104K	100.000	100	0.10	101K	100	0.10	0.00010
823K	82.000	82	0.082	820K	82	0.082	0.00082
803K	80.000	80	0.080	800K	80	0.080	0.00080
703K	70.000	70	0.070	700K	70	0.070	0.00070
683K	68.000	68	0.068	680K	68	0.068	0.00068
603K	60.000	60	0.060	600K	60	0.060	0.00060
563K	56.000	56	0.056	560K	56	0.056	0.00056
503K	50.000	50	0.050	500K	50	0.050	0.00050
473K	47.000	47	0.047	470K	47	0.047	0.00047
403K	40.000	40	0.040	400K	40	0.040	0.00040
393K	39.000	39	0.039	390K	39	0.039	0.00039
333K	33.000	33	0.033	330K	33	0.033	0.00033
303K	30.000	30	0.030	300K	30	0.030	0.00030
273K	27.000	27	0.027	270K	27	0.027	0.00027
253K	25.000	25	0.025	250K	25	0.025	0.00025
223K	22.000	22	0.022	220K	22	0.022	0.00022
203K	20.000	20	0.020	200K	20	0.020	0.00020
183K	18.000	18	0.018	180K	18	0.018	0.00018
153K	15.000	15	0.015	150K	15	0.015	0.00015
123K	12.000	12	0.012	120K	12	0.012	0.00012
103K	10.000	10	0.010	100K	10	0.010	0.00010
822K	8.200	8.2	0.0082	829K	8200000000	82000000	82.000
802K	8.000	8	0.0080	809K	8000000000	80000000	80.000
702K	7.000	7	0.0070	709K	7000000000	70000000	70.000
682K	6.800	6.8	0.0068	689K	6800000000	68000000	68.000
602K	6.000	6	0.0060	609K	6000000000	60000000	60.000

Tabla 23. Tabla de condensadores normalizados (*Valores Comerciales De Capacitores*, n.d.).



## 7.3. Códigos de programación

### 7.3.1. Código del PI

```
>> G=tf([67.623],[0.82 1])

G =

      67.62
-----
    0.82 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> GBA=G/67.623

GBA =

      67.62
-----
    55.45 s + 67.62

Continuous-time transfer function.

>> GBC=GBA/(1+GBA)

GBC =

      3750 s + 4573
-----
    3075 s^2 + 1.125e04 s + 9146

Continuous-time transfer function.

>> pidtune(GBC,'PID')

ans =

      Kp + Ki * ----
                  s

      with Kp = 2.99, Ki = 13.3

Continuous-time PI controller in parallel form.

>> pidTuner(GBC,PI)
```

Código 1. Programación de la obtención del PI.

### 7.3.2. Código del microcontrolador

```
#include <LiquidCrystal.h> // Librería del lcd
#include <PIDController.h> // Librería del PID
#define SUM          3    // Interrupción pin Sumar
#define RES          2    // Interrupción pin Restar
#define ON           A5   // Pin para BSonda
#define L            4    // Pin para LED
#define TEMP         A0   // Pin leer T en plancha
#define SOND         A1   // Pin leer T en sonda
#define DIS          A2   // Pin leer T en disipador
#define CAL          10   // Pin señal para calentar
#define ENF          9    // Pin señal para enfriar
#define VENT         5    // Pin señal ventilador
PIDController pid;      // Variables para el PI
int PID;

// Pines del LCD correspondientes a RS, E, DB4, DB5, DB6, DB7

LiquidCrystal lcd(13, 12, 11, 8, 7, 6);

void Escribirlcd(int temp,int pos1, int pos2); // Declaración de funciones
void LeerTemp();
void Sumar();
void Restar();
void Calentar();
void Enfriar();
void Reposo();
void Actuadora();

int  Tob=23; // Variable Tobjetivo con valor inicial a temperatura ambiente
float Tpla=22; // Variable T en la plancha
float Tsond; // Variable T en la sonda
float Tdis; // Variable T en el disipador
float valort; // Variables auxiliares
float valors;
float valord;

void setup() {

    //Declaración de pines
    pinMode(ON, INPUT_PULLUP);
    pinMode(SUM, INPUT_PULLUP);
    pinMode(RES, INPUT_PULLUP);
    pinMode(L, OUTPUT);
```

```
//Asignación de interrupciones
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SUM),
Sumar, FALLING);

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RES),
Restar, FALLING);

//Inicialización de pantalla lcd
lcd.begin(16, 2);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("T.PLA.");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("T.OBJ.");
lcd.setCursor(13, 0);
lcd.print("\337C");
lcd.setCursor(13, 1);
lcd.print("\337C");
lcd.setCursor(0,1);
Escribirlcd(Tob,8,1);

interrupts(); // Se habilitan las interrupciones

digitalWrite(L,HIGH);// Se enciende el led de funcionamiento

//Inicialización del PI
pid.begin(); // inicializa PI
pid.setpoint(Tob); // establece el setpoint con el valor T objetiva
pid.tune(22.257, 63.881, 0); // Establece KP, KI y KD
pid.limit(0, 255); // limita la salida a un valor analógico de +5 V
}

void loop() {

LeerTemp(); // Lee la temperatura

//Lee el pulsador y actualiza los valores del display con la T en la sonda o la plancha

if(digitalRead(A5)==1){ // Actualiza T en la plancha
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("T.PLA.");
Escribirlcd(Tpla,8,0);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("T.OBJ.");
lcd.setCursor(13, 0);
lcd.print("\337C");
lcd.setCursor(13, 1);
lcd.print("\337C");
}
}
```

```
else{ // Actualiza T en la sonda
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("T.SON.");
Escribirlcd(Tsond,8,0);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("T.OBJ.");
lcd.setCursor(13, 0);
lcd.print("\337C");
lcd.setCursor(13, 1);
lcd.print("\337C");

}
//Aplica la función actuadora
Actuadora();

//Actualiza Tobjetivo en el display
Escribirlcd(Tob,8,1);
}

//Función de escribir en la pantalla del lcd
void Escribirlcd(int temp,int pos1,int pos2){
String caracter = String(temp);
lcd.setCursor(pos1, pos2);
lcd.print(caracter);
}

//Sumar Tob
void Sumar(){
Tob++;
}

//Restar TOB
void Restar(){
Tob--;
}
```

```
void LeerTemp(){
  valort=0;
  valors=0;
  for(int i=0;i<100;i++){ //lee 100 veces las temperaturas
    valort= valort + analogRead(TEMP);
    valors= valors + analogRead(SOND);
    valord= valord + analogRead(DIS);
  }

  //Actualización de las temperaturas
  Tpla = (valort/100 -204)/67.623;
  Tsond =(valors/100 -204)/67.623;
  Tdis =(valord/100 -204)/67.623;
}

void Actuadora(){ //Analiza si calentar, enfriar o reposo
  pid.setpoint(Tob); // Actualiza el setpoint
  if((Tob-0.5)>Tpla)
  {Calentar();
  analogWrite(VENT,255); // Activa al 100% el ventilador
  }
  else if((Tob+0.5)<Tpla)
  {Enfriar();
  analogWrite(VENT,255); // Activa al 100% el ventilador
  }
  else {Reposo(); analogWrite(VENT,0);} // Deja el sistema en reposo
}

void Calentar(){
  //Aplicación del PID en el pin que calienta
  analogWrite(ENF,0); /* Desactivación del otro pin para evitar
  que se active todo el puente a la vez*/
  PID = pid.compute(Tpla); // compara el setpoint con la señal recibida
  analogWrite(CAL, PID); // ejecuta la operación resultante del PI
}

void Enfriar(){
  //Aplicación del PID en el pin que enfría
  analogWrite(CAL,0); // Desactivación del otro pin
  PID = pid.compute(Tpla); /* Let the PID compute the value,
  returns the optimal output*/
  analogWrite(ENF, PID);
}

void Reposo(){ // Deja en reposo el sistema
  analogWrite(ENF,0);
  analogWrite(CAL,0);
}
}
```

Compilado

Código 2. Programación del microcontrolador.

## **7.4. Manual de usuario**

### **7.4.1. Funcionamiento del dispositivo**

Lo primero de todo para poner en funcionamiento el dispositivo es pulsar el “switch” de alimentación, con lo cuál se debe encender el led blanco para indicarlo.

Entonces se debe encender la pantalla LCD mostrando la temperatura de la plancha de aluminio como TPLA y la temperatura objetivo como TOBJ. Para aumentar los grados de la temperatura objetivo debe pulsarse el botón derecho, y para bajarlos el botón izquierdo.

Para visualizar la temperatura de la sonda se debe mantener pulsado el botón central y se visualizará como TSOND.

El sistema también cuenta con una ranura USB que conecta con el microcontrolador para poder reprogramarse a gusto del usuario para establecer nuevas pendientes de temperatura modificando el PI, añadir un pequeño desplazamiento de la señal al leer la temperatura para compensar posibles disminuciones de prestación de los componentes con el paso del tiempo o alterar la velocidad de los ventiladores. Para realizar las modificaciones oportunas se puede emplear el software Arduino IDE o similar y con el código anexo modificar lo que el usuario crea conveniente.

Por último, para apagar el dispositivo se pulsa de nuevo el “switch” de alimentación y el led blanco debe apagarse.

Se recomienda dejar reposar la plancha térmica entre cada rampa de temperatura para que disipe el calor acumulado y pueda volver a temperatura ambiente.

### **7.4.2. Condiciones ambientales de uso**

El diseño de este dispositivo está basado en los rangos de temperatura que se pueden dar en cualquier sala limpia, es decir, un rango comprendido entre 19 y 25 °C. Se recomienda el uso de este dispositivo en dichas condiciones porque de otra manera pueden alterar las prestaciones especificadas en los cálculos de esta memoria. Se recomienda el uso de guantes protectores por parte del usuario cuando se pretenda subir la temperatura más allá de 50 °C.

### **7.4.3. Limpieza y mantenimiento**

Para el mantenimiento de la plancha térmica es suficiente con evitar que se derramen líquidos y ácidos sobre las superficies de metal o por las rendijas para que no entren en el interior del dispositivo.

En cuanto a las labores de limpieza, es recomendable esperar un mínimo de una hora después de su uso para que la plancha tenga tiempo suficiente de enfriarse. En cuanto a



productos a utilizar entre otras cosas, con seguir con los mismos criterios de limpieza que para el resto del material en la sala limpia es suficiente.

Por último, en caso de estar almacenado mucho tiempo y el dispositivo esté lleno de polvo, es posible desmontar la cara frontal de la carcasa y limpiar el interior con una pistola de aire a presión.



# PLIEGO DE CONDICIONES





## **1. Objeto del pliego de condiciones.**

El objeto de este documento es fijar las condiciones técnicas mínimas que deben cumplir los sistemas implicados en la plancha térmica para laboratorio con el fin de especificar los requisitos de durabilidad, fiabilidad y seguridad.

El ámbito de ejecución de este documento se extiende a todos los subsistemas que forman parte de la instalación. Se podrán adoptar, por la propia naturaleza del diseño y de su desarrollo tecnológico, soluciones diferentes a las demostradas en este documento, siempre y cuando estas se justifiquen de forma adecuada y cumplan de forma precisa las exigencias mínimas presentadas en este documento.

Se tiene que desarrollar, analizar e implementar un sistema de acondicionamiento para señales de temperatura, un sistema de disipación para la células Peltier y un sistema de control de temperatura para dichas células con el objetivo de ser controladas y monitorizadas por el usuario.

## **2.Normativa.**

Como el objetivo de la plancha térmica no tiene fines comerciales, la normativa indicada a continuación hace referencia a aquellas normas que afectan directa o indirectamente a las características o métodos de montaje de los componentes del sistema:

**UNE-EN 55014-1** - Regula los parámetros de emisión para aparatos electrodomésticos, herramientas eléctricas y análogos.

**UNE-EN 60335-1** - Regula los requisitos generales de seguridad para aparatos electrodomésticos, herramientas eléctricas y análogos.

**UNE-EN 60115-8-1:2015** - Resistencias fijas de película de baja potencia de montaje superficial para equipos electrónicos generales.

**UNE-EN 60062:2016** - Códigos para el marcado de resistencias y de condensadores. Codificación por colores.

**UNE-EN IEC 60974-1:2018** - Regula los métodos de soldadura.

**DIN/IEC 60751** - Regula los valores nominales de las resistencias termoelectricas de platino.

### **3. Materiales.**

#### **3.1. Materiales electrónicos**

##### **Resistencias:**

El valor óhmico de las resistencias debe corresponderse con el valor indicado en los planos al igual que su valor de tolerancia de 0.5 o 1 % o inferior.

Deben seguir un empaquetado SMD 0603, poder disipar una resistencia superior a 10 0.5 W y cumplir con las normas UNE-EN 60115-8-1:2015 y UNE-EN 60062:2016.

##### **Resistencias termométricas:**

Su valor óhmico a 0 °C debe ser 100  $\Omega$ , aguantar un rango de temperaturas mucho más extenso que de -10 °C a 100 °C, debe cumplir con la norma DIN/IEC 60751, tener una estabilidad de  $\pm 0.05$  % o inferior, ser de película metálica hechas de platino de pequeño tamaño.

##### **Condensadores:**

Deben estar hechos de cerámica, tener los valores nominales indicados en los planos, una tolerancia del 10 % y tener un empaquetado SMD 0603.

##### **Bobinas:**

Su valor óhmico en corriente continua debe ser del orden de m $\Omega$  y tolerancia igual o inferior al 10 %. Para corriente alterna, deben tener un valor de 4.7  $\mu$ H, una tolerancia igual o inferior a 20 % y una frecuencia de resonancia del orden de MHz.

##### **Amplificadores operacionales:**

Deben tener características semejantes al modelo TL081 de Texas Instrument en cuanto a rangos de atenuación en frecuencia que no afecten a frecuencias entre 0 y 2 Hz, 2 V/V de ganancia,  $\pm 15$  V alimentación, muy poco offset y estar compensados en temperatura.

##### **Amplificadores de instrumentación:**

Deben tener la capacidad de obtener una ganancia superior a 100 V/V, soportar corrientes del orden de mA y tensiones de 12.5 V a la entrada además de introducir poco offset y no verse alterada la señal en función de la temperatura. Es decir, características iguales al INA101 de Texas Instrument.

**Convertidor AC/DC:**

El convertidor debe tener un rendimiento superior al 90 %, factor de potencia cercano a la unidad, buena disipación térmica, una potencia máxima igual o superior a 1100 W soportar corrientes del orden de 20 A o superiores.

**Convertidor DC/DC de +24 V:**

Debe ofrecer una salida de tensión nominal de + 24 V, poder alimentarse con una tensión de 48 V, poseer una eficiencia superior al 90 %, una potencia igual o superior a 150 W y tener la posibilidad de poder soldarse en una PCB.

**Convertidor DC/DC de  $\pm 15$  V:**

Debe poseer al menos dos salidas de voltaje de +15 V y -15 V respectivamente, poder ser alimentada con 48 V de corriente continua, tener un rendimiento superior al 90 %, una potencia igual o superior a 3 W y tener la posibilidad de poder soldarse en una PCB.

**LDO:**

Deben poder alimentarse con +15 V de corriente continua, ofrecer una salida de +5 V a +12 V y 100 mA de corriente de salida.

**Células Peltier:**

Deben tener una superficie mayor a 40 x 40 mm y menor de 5 mm de grosor, poder ser alimentadas con tensiones superiores a 40 V, tener una resistencia nominal base de 3  $\Omega$ , soportar corrientes mayores a 9 A y una potencia igual o superior a 190 W en su pico de operación.

También deben tener una temperatura de ruptura de al menos 130 °C.

**“Switch” de estado sólido:**

Se deben poder controlar con señal PWM de 5 V de amplitud, soportar tensiones de entrada de 48 V y corrientes igual o superiores a 20 A.

**Microcontrolador:**

El microcontrolador debe poder programarse con lenguaje de C Ansi/C++ y poder realizar las mismas funciones que un ARDUINO UNO modelo R3, es decir, tener al menos tres pines de entrada analógica, dos pines hábiles para interrupciones, tres pines con salida PWM, siete salidas E/S y poder ser reprogramable.

**PCB:**

La PCB debe tener dos capas, estar hecha de material FR-4 mejorado, tener un grosor de 1.55 mm, capa externa de cobre de 18  $\mu\text{m}$ , ser de color verde y tener la leyenda blanca.

**Cableado:**

Debe ser de calibre 12 AWG y aislante TW o RH.

**Cableado unifilar:**

Unifilar de cobre estañado de 1.4 mm de diámetro.

**Enchufe:**

Tipo C del estándar establecido por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) con clavija Schurter.

**Filtro de red:**

Debe soportar los 230 V de corriente alterna, tener un “switch” que permita cortar la alimentación y clavija de entrada Schurter.

**Ventiladores:**

Deben ser controlables con una señal PWM, tener un consumo menor de 60 W, un ruido por debajo de los 75 dBA y alimentarse con 24 V de continua, de tamaño 140 x 140 mm, un grosor inferior a 5 cm y un caudal superior a 4  $\text{m}^3/\text{min}$

**Pantalla LCD:**

Pantalla LCD con simbología compatible con la tabla ASCII con 2 filas y 16 columnas de escritura.

**LED:**

De color blanco y corriente máxima superior a 23 mA.



**Botones:**

Compatibles con soldadura en PCB.

**Conector USB:**

Conectores USB 3.0 hembra con encaje a presión.

### **3.2. Materiales mecánicos**

#### **Lámina de grafito:**

Debe tener una conductividad térmica de  $1300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , tener el área y las dimensiones de un folio A4 y tener un grosor de  $50 \mu\text{m}$ .

#### **Disipador:**

Debe ser de tipo “Pin Fin” y que pueda llegar a alcanzar una resistencia térmica menor de  $0.035 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

#### **Carcasa:**

Debe tener la forma y dimensiones descritas en los planos y estar hecha de un material eléctricamente aislante.

#### **Plancha de metal:**

Debe ser de aluminio de dimensiones comparables a un formato A4, de 3 cm de grosor y realizar las modificaciones del plano 9.

#### **Tornillos de metal:**

De acero inoxidable y de punta estrellada de 4 mm de grosor y 9.5 mm de largo.

#### **Tornillos de plástico:**

Deben ser de punta estrellada de 4 mm de grosor y 9.5 mm de largo.

## **4. Control de ejecución.**

En primer lugar, se encargan los componentes diseñados a medida a otras empresas externas, como viene a ser la fabricación de la carcasa o la PCB expuestas en los planos, y cargar el código del anexo en el Arduino.

Siguiendo el plano 12 de la PCB se procede a soldar cada componente en los terminales correspondientes. El material empleado para la soldadura debe ser estaño y se recomienda seguir los contenidos de la norma UNE-EN IEC 60974-1:2018 para la realización de esta actividad. Se deben montar los tres circuitos del bloque CST, los pines de los dos convertidores DC/DC, los dos LDO y algunos de los componentes del circuito CM tal como se indica en el plano 11.

Seguidamente, se montan siguiendo el plano 10 de ensamble el filtro de red, el convertidor AC/DC de +48 V, los cuatro “switch” de estado sólido y atornillar la PCB y el Arduino.

Una vez montados estos componentes, se procede a comprobar su funcionamiento. Para ello, se debe conectar los pines del Arduino a los terminales de la PCB, terminar de montar y conectar los componentes del circuito CM, que no van soldados en la placa, con dos RTD en una placa board de pruebas siguiendo los esquemas del plano 3 del CM, el plano 1 del CST y el plano 11 de la PCB. Se conecta el filtro de red con el convertidor AC/DC y este con la PCB en los terminales de entrada correspondientes.

Cuando se presione el “switch” del filtro de red, el sistema debe encenderse. Se debe regular el LDO que alimenta el Arduino a +8 V y el de la señal de referencia del CST a +5 V, comprobándose con un multímetro. El Arduino debe tener activas las luces de funcionamiento, la pantalla tener las palabras programadas y el LED blanco debe encenderse.

Con un multímetro hay que medir cada salida de los circuitos del CST a una temperatura cercana a los 25 °C y debe medir una tensión aproximada de 1.84 V. Adicionalmente, hay que pulsar los botones para comprobar que interactúan correctamente con la pantalla. Para comprobar las señales PWM, se debe emplear un osciloscopio. Con una temperatura objetivo mayor que la temperatura medida en la salida del circuito de la plancha, se debe visualizar una onda continua en el pin que controla la señal SH. Además, la salida en el pin que controla la señal SC debe estar a nivel bajo. En el caso contrario, con una temperatura objetivo menor, su funcionamiento debe ser a la inversa.

Para comprobar el funcionamiento de los ventiladores, se deben alimentar con el convertidor de +24 V e introducir una señal PWM. Los ventiladores deben girar a mayor o menor velocidad dependiendo del ciclo de trabajo de la señal.

Antes de ensamblar la plancha de aluminio se debe comprobar cada célula Peltier además de cada “switch” de estado sólido. Para ello, se conecta el puente en H del plano 2 utilizando el convertidor de AC/DC como fuente de alimentación. Se introduce una señal PWM del 100 % en los “switch” de señal SH del plano 2 para que la corriente fluya por las células Peltier y caliente una cara la cual se debe medir con un termómetro y observar cómo varía su



temperatura. Repetir el proceso con los “switch” de señal SC y comprobar que la misma cara ahora enfría.

Una vez comprobado el funcionamiento de cada conjunto y componente del sistema, se procede a modificar la plancha de aluminio y taladrar los orificios para los tornillos como en el plano 9. Posteriormente, se deberán hacer coincidir los mismos orificios en el disipador con los de la plancha teniendo sumo cuidado de taladrar la menor superficie posible en caso de que el fabricante no los realice a medida. En caso de que el disipador no cuadre con las medidas de la carcasa se debe cortar por los lados hasta que cuadren.

Con la plancha y el disipador preparados, se coloca sobre una superficie la plancha de aluminio y, arriba de ella, la primera lámina de grafito, recortada al tamaño de 297 x 210 mm de forma que coincida con la plancha. Se deben conectar las cuatro células Peltier cerca de cada esquina del disipador el cual se debe ubicar encima, con la segunda lámina de grafito recortada a las dimensiones del disipador, sin que se crucen con los orificios de los tornillos. Las células Peltier se conectan dos ramas en paralelo con dos células en serie cada una y los cables deben sobresalir por la parte ancha de la plancha. Una vez juntadas las partes, se ensamblan utilizando tornillos de plástico en los orificios, con lo cuál, se unen todas las partes como un bloque ensamblado. Los tornillos deben ser, sí o sí, de plástico aislante térmicamente, porque si son de metal pueden alterar el comportamiento de la disipación del sistema.

Los cables para la conexión de las células Peltier y el resto del circuito CP deben tener la longitud necesaria para pasar por unos orificios de la pieza 5 y poder conectarse con los “switch” que forman el puente en “H”. Estos cables se pueden fijar por tema de comodidad y seguridad a la pared de la pieza 1 a criterio del operario de montaje, como por ejemplo bridas, pero sin usar métodos que estén comprometidos por la temperatura como la silicona caliente.

Con este bloque ensamblado, se introduce la pieza 4 con los ventiladores atornillados en la viga inferior de la pieza 1, la plancha ensamblada va colocada en la viga superior y se realizan las conexiones de las células Peltier con los “switch” de estado sólido y los ventiladores siguiendo el esquema eléctrico del plano 2. Por último, se colocan dos RTD pegadas con un pegamento conductor térmicamente a la plancha de aluminio en los extremos, y otras dos al lado del disipador de la misma manera. Las RTD de la plancha de aluminio van conectadas al circuito A, en los terminales RTD1.A y RTD2.A, y las RTD del disipador al circuito C en los pines RTD1.C y RTD2.C del CST de la PCB, respectivamente, siguiendo las conexiones del plano 1 del circuito de medición.

Con los componentes de la parte superior de la carcasa montados y conectados, se procede a montar los periféricos del circuito CM comprobados en la placa board en la pieza 2, la sonda debe trasvasar el agujero izquierdo correspondiente a la cara frontal de la pieza 2 del plano 6. El LED va ubicado en el orificio redondo de la cara frontal de la pieza 2, la pantalla LCD en el orificio rectangular de la parte de arriba de la pieza 2 y los botones en los orificios de al lado. En el orificio rectangular de la cara frontal se colocan los conectores USB hembra en cascada que conecta con la entrada del Arduino. Una vez fijados los componentes en la



pieza 2, se conectan los dos cables de la sonda en los pines RTD1.B y RTD2.B luego de montar las RTD en la sonda pasiva. La pantalla LCD, los botones y el LED se conectan siguiendo el plano 3. Por último, se atornilla la pieza 2 a la pieza 1.

Para terminar el montaje, se atornilla la pieza 3 en la cara frontal de la pieza 1 y se realiza una pequeña inspección para ver que no queda nada suelto antes de proceder a realizar la prueba de servicio.

## 5. Prueba de servicio.

Para la realización de la prueba de servicio de la plancha térmica se necesita un termopar calibrado para medir la temperatura en la plancha de aluminio. Para esta prueba de servicio se realizan cinco rampas con diferentes temperaturas en cada una de ellas, se anota en cada una de ellas la temperatura que mide el sensor de la plancha interno indicado en la pantalla LCD, la temperatura en la plancha medida con la propia sonda de temperatura y con el termopar.

Para un resultado satisfactorio no debe haber más de 4 °C de diferencia entre el sensor interno y el de la sonda con el termopar calibrado. Además, dentro de las temperaturas alcanzadas en las rampas deben abarcar rangos de -5 a 80 °C para considerarse válidos.

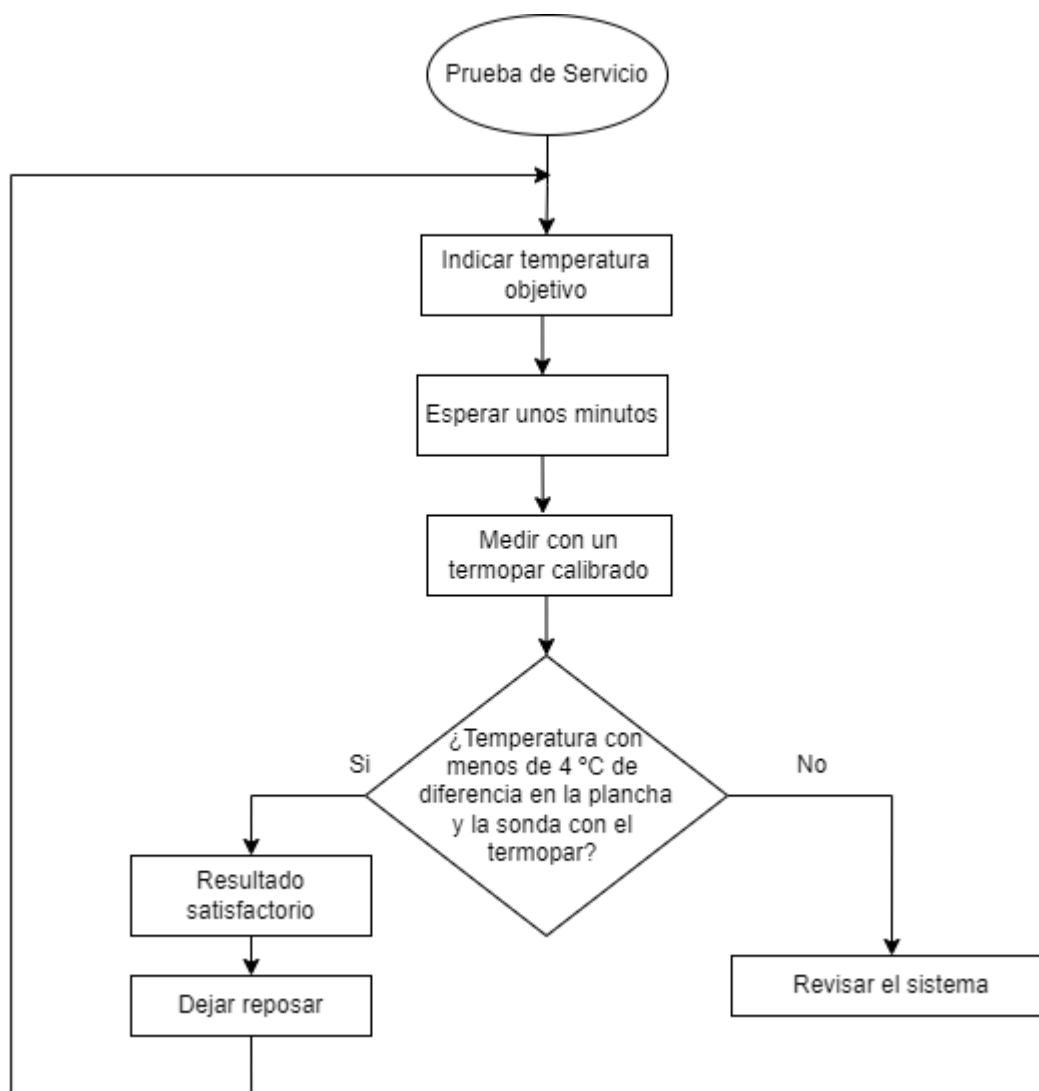


Figura 44. Flujoograma para la prueba de servicio.



# PRESUPUESTOS

## 1.Precios unitarios

1.Precios unitarios de los componentes			
Ref	Unidades	Descripción	€/unidad
R1	ud	Resistencia de 0.5 %	0.24 €
R2	ud	Resistencia de 1%	0.24 €
R3	ud	RTD de película metálica	8.61 €
C1	ud	Condensador de 10%	0.15 €
L1	ud	Bobina de 4.7 $\mu$ H y 10 %	0.25 €
U1	ud	TL081	1.73 €
U2	ud	INA101	9.65 €
U3	ud	Arduino UNO	23.20 €
S1	ud	“Switch” de 20 A	81.22 €
V1	ud	Ventilador	148.00 €
D1	ud	AC/DC	428.88 €
D2	ud	DC/DC 24 V	189.98 €
D3	ud	DC/DC +15 V	14.87 €
D4	ud	LDO	1.55 €
G1	ud	Lámina de Grafito	32.44 €
G2	ud	Disipador	200.00 €
G3	ud	Célula Peltier	135.76 €
A1	ud	Display LCD	11.72 €
A2	ud	Botón	0.47 €
A3	ud	Led blanco	0.39 €
A4	ud	Conector USB hembra	1.56 €
A5	ud	PCB	200.00 €
A6	ud	Sonda pasiva	15.00 €
A7	ud	Potenciómetro	1.25 €
D5	ud	Filtro de red	20.00 €
G4	ud	Carcasa	300.00 €
G5	ud	Plancha Aluminio	100.00 €
Ing	h	Diseño de ingeniero electrónico junior	50.00 €
Om	h	Operario montaje	40.00 €
TC	h	Medios auxiliares	2%

Tabla 24. Tabla de precios unitarios de cada componente.

La tabla 24 corresponde a una variante de BoM (lista de materiales) con el precio aproximado de cada componente. Se ha basado en proveedores como Farnell o Mouser Electronics para estimar un precio aproximado de referencia en el mercado y en el coste de ingeniero se ha estimado el coste que le supondría a la empresa que un ingeniero diseñara este sistema, con las licencias de software y demás herramientas incluidas.

## 2. Precios descompuestos

Para los precios descompuestos se ha tomado en cuenta el ensamble de los componentes más grandes y del CP en la carcasa más su revisión en la tabla 26 y por otra parte la soldadura y conexión de los componentes en las dos PCB con su integración en la carcasa y una revisión del sistema incluida en la tabla 25:

2.Precios descompuestos					
2.1. Montaje de los componentes eléctricos del CST Y CM					
Ref	Unidades	Descripción	€/unidad	Cantidad	Parcial
CEL		Montaje de los componentes electrónicos en la PCB			
R1	ud	Resistencia de 0.5 %	0.24 €	17	4.08 €
R2	ud	Resistencia de 1 %	0.24 €	32	7.68 €
C1	ud	Condensador de 10%	0.15 €	7	1.04 €
L1	ud	Bobina de X $\mu$ H y 10 %	0.25 €	2	0.50 €
U1	ud	TL081	1.73 €	12	20.76 €
U2	ud	INA101	19.65 €	3	58.95 €
D2	ud	DC/DC 24 V	189.98 €	1	189.98 €
D3	ud	DC/DC +15 V	14.87 €	1	14.87 €
D4	ud	LDO	2.80 €	2	5.60 €
A5	ud	PCB	200.00 €	1	200.00 €
A6	ud	Sonda pasiva	15.00 €	1	15.00 €
A7	ud	Potenciómetro	1.25€	1	1.25€
Mano de obra					
Ing	h	Diseño ingeniero electrónico	50.00 €	100	5,000.00 €
Om	h	Operario montaje y revisión	40.00 €	8	320.00 €
TC	h	Medios auxiliares	2%	5,839.71 €	116.79 €
				<b>Subtotal</b>	<b>5,956.50 €</b>

Tabla 25. Precios descompuestos de CEL.

2.2. Montaje de componentes en la carcasa					
Ref	Unidades	Descripción	€/unidad	Cantidad	Parcial
CA		Montaje de los componentes de la carcasa sin las PCB			
S1	ud	“Switch” de 20 A	81.22 €	4	324.88 €
V1	ud	Ventilador	148.00 €	2	296.00 €
R3	ud	RTD de película metálica	8.61 €	6	51.66 €
D1	ud	AC/DC	428.88 €	1	428.88 €
G1	ud	Lámina de Grafito	32.44 €	2	64.88 €
G2	ud	Disipador	200.00 €	1	200.00 €
G3	ud	Célula Peltier	135.76 €	4	543.04 €
A4	ud	Conector USB hembra	0.78 €	2	1.56 €
D5	ud	Filtro de red	20.00 €	1	20.00 €
G4	ud	Carcasa	300.00 €	1	300.00 €
G5	ud	Plancha Aluminio	100.00 €	1	100.00 €
U3	ud	Arduino UNO	23.20 €	1	23.20 €
A1	ud	Display LCD	11.72 €	1	11.72 €
A2	ud	Botón	0.47 €	3	1.41 €
A3	ud	Led blanco	0.39 €	1	0.39 €
<b>Mano de obra</b>					
Ing	h	Diseño ingeniero electrónico	50.00 €	100	5,000.00 €
Om	h	Operario montaje y revisión	40.00 €	5	200.00 €
TC	h	Medios auxiliares	2%	7,567.62 €	151.35 €
				<b>Subtotal</b>	<b>7,718.97 €</b>

Tabla 26. Precios descompuestos de CAR.

### 3. Presupuestos generales

En la tabla 27 se obtiene el presupuesto total del proyecto sin considerar factores como el IVA, gastos generales ni beneficio industrial. Dichos impuestos están aplicados en la tabla 28 si se diera el caso de querer comercializar el sistema. Se ha estimado un 13 % de gastos generales, 6 % de beneficio industrial y un 21 % de IVA establecidos por decreto ley (*Ministerio De Hacienda*).

3. Presupuestos Generales				
3.1. Presupuesto General (PEM)				
Descripción				Precio €
PLA	Unión de los precios descompuestos sin impuestos			
CEL	Montaje de los componentes electrónicos en la PCB			5,956.50 €
CA	Montaje de los componentes de la carcasa sin las PCB			7,718.97 €
			<b>Subtotal</b>	<b>13,675.47 €</b>

Tabla 27. Presupuesto general.

3.2 Presupuesto Con Impuestos (PEC)				
Unidades	Descripción	Precio	Cantidad	Parcial
ud	PLA sin impuestos	13,675.47 €	1	13,675.47 €
%	Beneficio industrial	6%	13,675.47 €	820.53 €
%	Gastos generales	13%	13,675.47 €	1,777.81 €
%	IVA	21%	13,675.47 €	2,871.85 €
			<b>Subtotal</b>	<b>19,145.66 €</b>

Tabla 28. Presupuesto general con impuestos y gastos de comercialización.

Por tanto, el presupuesto de inversión del proyecto asciende a DIECINUEVE MIL CIENTO CUARENTA Y CINCO CON SESENTA Y SEIS €.

Adicionalmente se ha calculado en la tabla 29 el precio concurrente que tendría la plancha térmica sin considerar las horas de su diseño ni su coste a cargo de un ingeniero junior, el cual se refleja en la unión de los precios descompuestos, sino su precio en materiales y mano de obra.



<b>Precio recurrente</b>				
PLA	Unión de los precios descompuestos			13,675.47 €
Ing	Diseño ingeniero electrónico			-10,000.00 €
			<b>Subtotal</b>	<b>3,675.47€</b>

Tabla 29. Precio concurrente.

Por último en la tabla 30 se calcula el precio recurrente con los impuestos aplicados.

<b>Precio recurrente con impuestos</b>				
ud	Precio recurrente sin impuestos	3,675.47 €	1	3,675.47 €
%	Beneficio industrial	6%	3,675.47 €	220.53 €
%	Gastos generales	13%	3,675.47 €	477.81 €
%	IVA	21%	3,675.47 €	771.85 €
			<b>Subtotal</b>	<b>5,145.66 €</b>

Tabla 30. Precio concurrente con impuestos.

Como dato de referencia a nivel de mercado, el precio de un producto con este tipo de funcionalidad pero con una plancha de un tamaño mayor al de un folio formato A4 rondaría aproximadamente unos 6800 €. Por tanto el coste concurrente de la plancha térmica es aceptable a nivel de mercado y además cuenta con el valor añadido del diseño personalizado a las necesidades de la empresa, como la sonda externa de temperatura, la reprogramación y ser fácilmente transportable.



# PLANOS

## 1.Explicación de los planos.

Los planos expuestos corresponden en este orden a los esquemas eléctricos de los circuitos diseñados en este diseño, el diseño de la carcasa, el ensamble del sistema y por último los planos de diseño de la PCB.

El esquema eléctrico del plano 1 es un circuito de medición de la temperatura CST. En el sistema hay en total tres circuitos CST, sin embargo los tres son iguales y sólo cambia la ubicación física de las RTD en el sistema, no así su conexión. Por tanto, se ha incluido el plano de uno de estos circuitos, aunque en los planos de la PCB sí van montados los tres circuitos y su referencia es la misma, sólo cambia su terminación, sea en .A , .B o .C. Por ejemplo R2.A o R2.B . El circuito A corresponde al circuito de medición de la plancha térmica, el B el de la sonda externa y el C el del disipador. Los planos 2 y 3 corresponden a los circuitos CP y CM. La carcasa está definida por los planos desde el 4 hasta el 10 y la PCB en los planos 11 y 12.

Se ha indicado en el punto 2 de los planos dos tablas con las referencias utilizadas en los planos, la tabla 31 con los elementos de los planos de la PCB y la 32 con los que no pertenecen a ella, es decir, referencias de los esquemas eléctricos y del plano explosionado.

Adicionalmente se ha incluido un diagrama de bloques con las tomas de masa para el sistema en la figura 44.

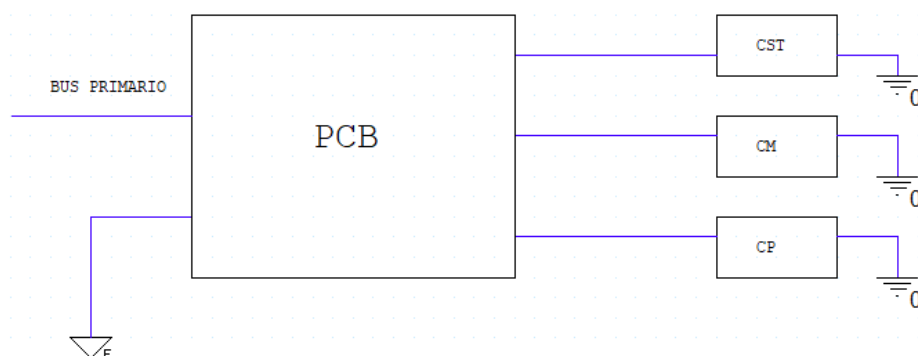


Figura 45. Diagrama de masas del sistema.

## 2. Referencias de los componentes.

Referencia	Descripción
R1.1.A	Resistencia de 1.5 k $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R1.2.A	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R2.1.A	Resistencia de 100 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R2.2.A	Resistencia de 100 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
RTD1.A	Terminales para RTD
RTD2.A	Terminales para RTD
RG.A	Resistencia de 470 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R3.A	Resistencia de 82 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R4.A	Resistencia de 82 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R5.1A	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R5.2.A	Resistencia de 10 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R6.A	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R7.A	Resistencia de 2.2 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R8.A	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R9.A	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R10.A	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R11.A	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
U1.A	TL081
U2.A	INA101
U3.A	TL081
U4.A	TL081
U5.A	TL081
C1.A	Condensador de 10 $\mu$ F, 10 % tolerancia
R1.1.B	Resistencia de 1.5 k $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R1.2.B	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R2.1.B	Resistencia de 100 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R2.2.B	Resistencia de 100 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
RTD1.B	Terminales para RTD
RTD2.B	Terminales para RTD
RG.B	Resistencia de 470 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R3.B	Resistencia de 82 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R4.B	Resistencia de 82 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R5.1B	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia

R5.2.B	Resistencia de 10 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R6.B	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R7.B	Resistencia de 2.2 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R8.B	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R9.B	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R10.B	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R11.B	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
U1.B	TL081
U2.B	INA101
U3.B	TL081
U4.B	TL081
U5.B	TL081
C1.B	Condensador de 10 $\mu$ F, 10 % tolerancia
R1.1.C	Resistencia de 1.5 k $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R1.2.C	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R2.1.C	Resistencia de 100 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R2.2.C	Resistencia de 100 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
RTD1.C	Terminales para RTD
RTD2.C	Terminales para RTD
RG.C	Resistencia de 470 $\Omega$ , 0.5 % tolerancia
R3.C	Resistencia de 82 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R4.C	Resistencia de 82 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R5.1.C	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R5.2.C	Resistencia de 10 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R6.C	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R7.C	Resistencia de 2.2 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R8.C	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R9.C	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R10.C	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
R11.C	Resistencia de 1 k $\Omega$ , 1 % tolerancia
U1.C	TL081
U2.C	INA101
U3.C	TL081
U4.C	TL082
U5.C	TL083
C1.C	Condensador de 10 $\mu$ F, 10 % tolerancia
C2	Condensador de 4.7 $\mu$ F, 10 % tolerancia

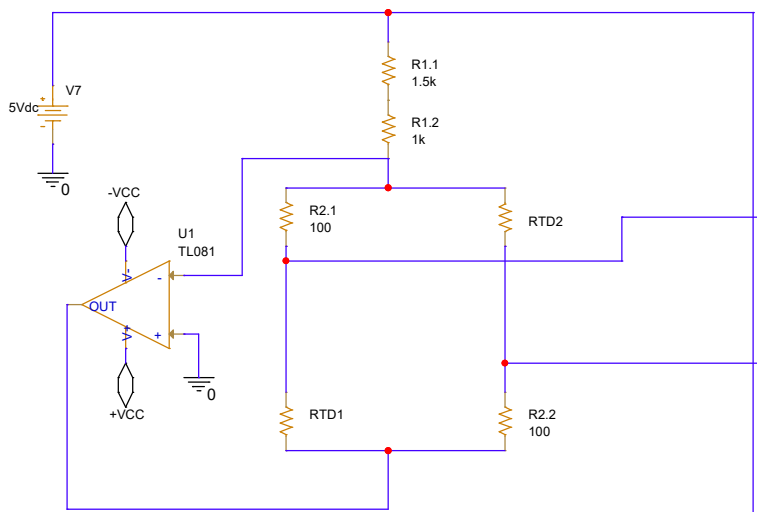
C3	Condensador de 4.7 $\mu$ F, 10 % tolerancia
C4	Condensador de 4.7 $\mu$ F, 10 % tolerancia
C5	Condensador de 4.7 $\mu$ F, 10 % tolerancia
L1	Condensador de 4.7 $\mu$ F, 10 % tolerancia
L2	Condensador de 4.7 $\mu$ F, 10 % tolerancia
R12	Resistencia de 220 $\Omega$ , 1 % tolerancia
RV1	Potenciómetro de 1 k $\Omega$
DC/DC 1	Convertidor de +24 V
DC/DC 2	Convertidor de $\pm$ 15 V
LDO 1	LDO +8 V
LDO 2	LDO +5 V
LED +	Terminal para el cátodo
LED -	Terminal para el ánodo
VCC 24	Vcc para los ventiladores
VCC ARD	Vcc para el Arduino
VEE	Terminal para el pin VEE del display LCD
VDD	Terminal para el pin VDD del display LCD
VSS	Terminal para el pin VSS del display LCD
RW	Terminal para el pin RW del display LCD
GND ARD	Terminal para la masa del Arduino
GND P1	Terminal para la masa de un pulsador
GND P2	Terminal para la masa de un pulsador
GND P3	Terminal para la masa de un pulsador
GND VENT	Terminal para la masa de los ventiladores
GND H	Terminal para la masa del puente H
GND AC	Terminal para la masa del AC/DC

Tabla 31. Lista de referencias de los componentes de la PCB.

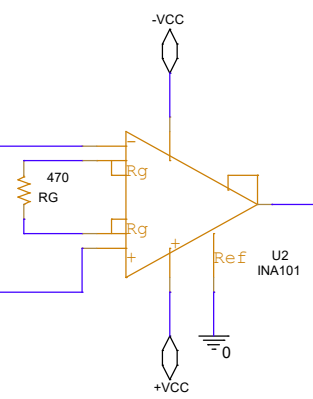
Referencia	Descripción
D2	Led blanco
ADX	Pines de entrada analógica
IOX	Pines de entrada/salida
LCD1	Display LCD
CP1	Célula Peltier
CP2	Célula Peltier
CP3	Célula Peltier
CP4	Célula Peltier
SSH1	“Switch” de estado sólido
SSH2	“Switch” de estado sólido
SSC1	“Switch” de estado sólido
SSC2	“Switch” de estado sólido
VENT 1	Ventilador 1
VENT 2	Ventilador 2
VENT	Señal PWM del ventilador
SH	Señal PWM para calentar
SC	Señal PWM para enfriar
CST PLA	Salida señal sensor de la plancha
CST SOND	Salida señal sensor de la sonda
CST DIS	Salida señal sensor del disipador
P1	Pieza 1
P2	Pieza 2
P3	Pieza 3
P4	Pieza 4
PA	Plancha de aluminio
PD	Disipador
AC	Convertidor de +48V
ARD	Arduino
PCB	PCB con elementos soldados
SW	Bloque de 4 “switch”
VE	Ventiladores

Tabla 32. Lista de referencias de los componentes externos a la PCB.

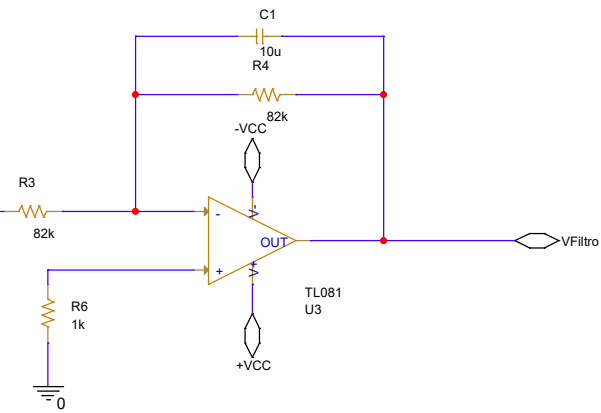
ETAPA DE SENSADO



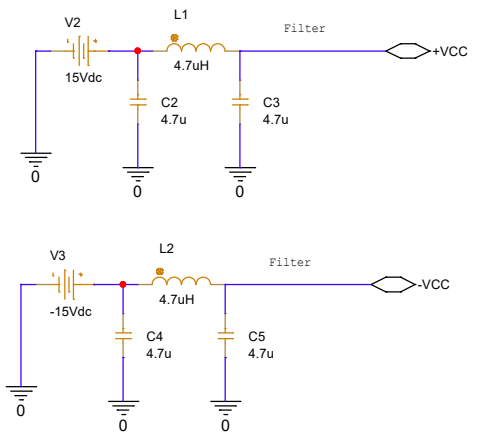
ETAPA DE AMPLIFICACIÓN



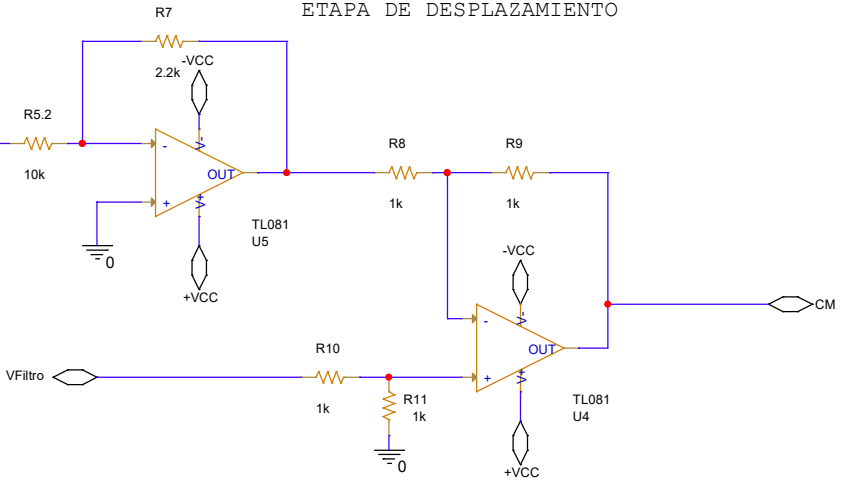
FILTRO PASO BAJO



FILTRO EMC

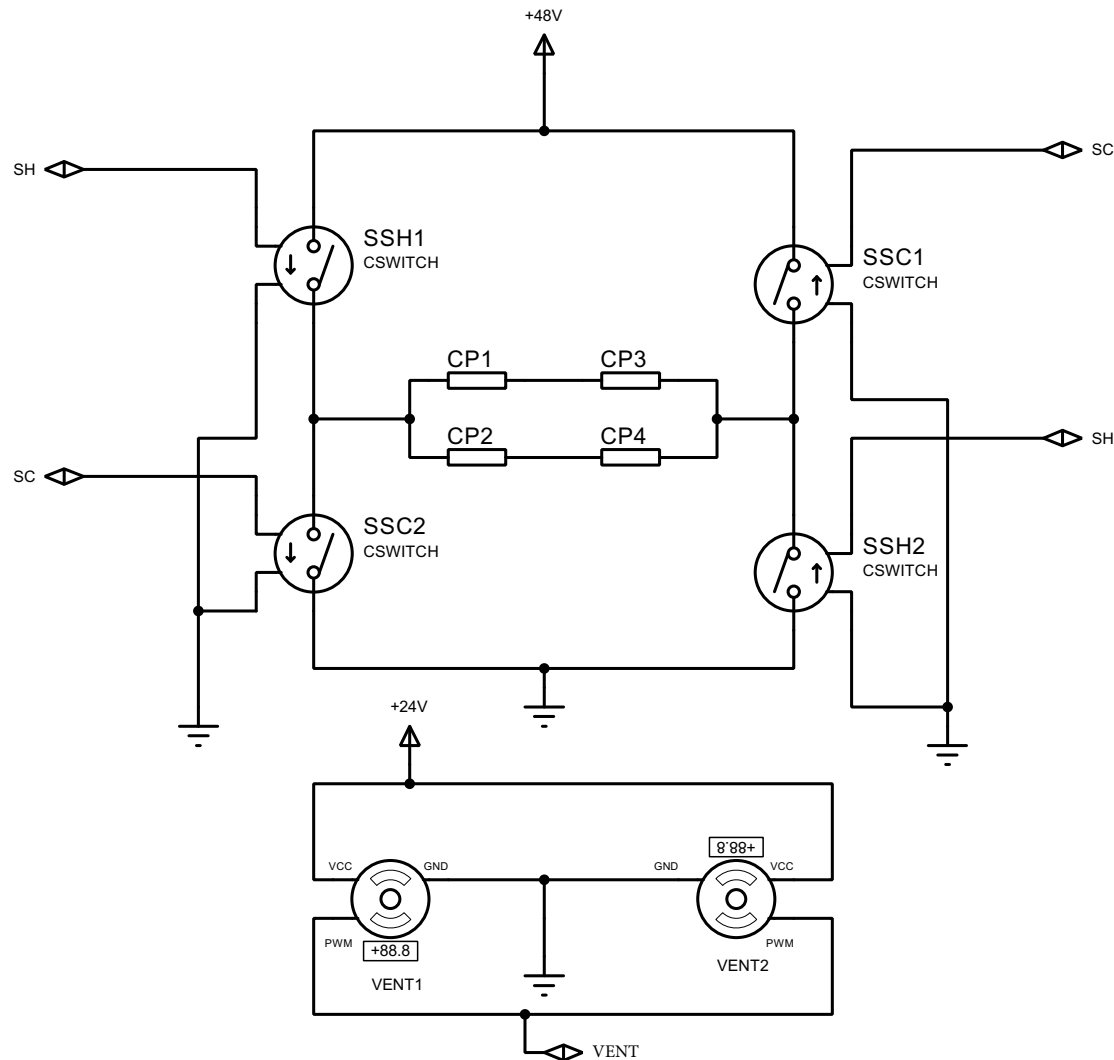


ETAPA DE DESPLAZAMIENTO

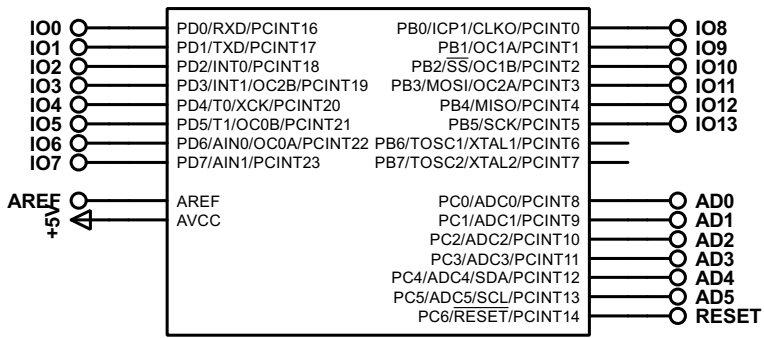


	NOMBRE:	FECHA:	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO: TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier ALUMNO: David Tomas Company
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:		Nº DEL PLANO:
	Esquema eléctrico del circuito CST		1

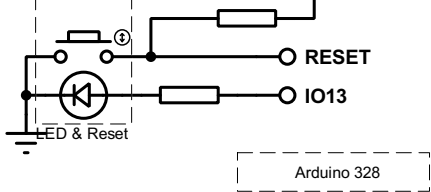
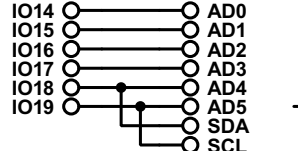
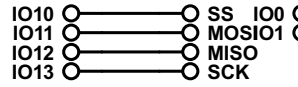




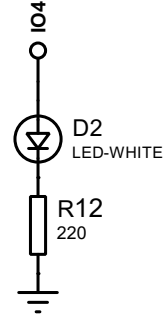
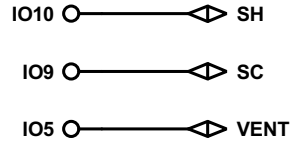
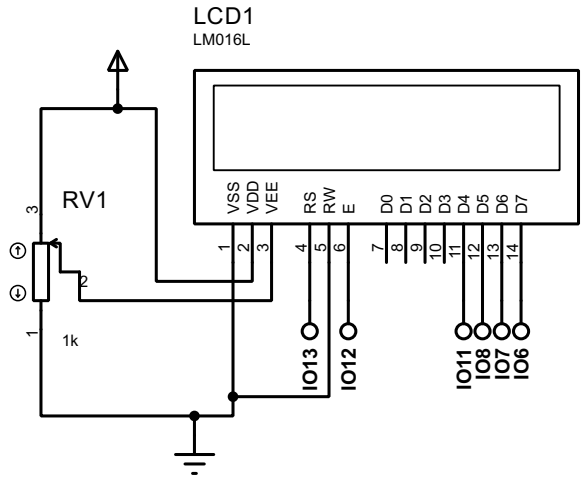
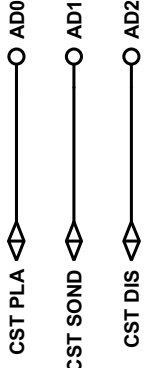
	NOMBRE:	FECHA:	ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células betaer.
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	ALUMNO: David Tomas Company
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO: Esquema eléctrico del circuito CP		Nº DEL PLANO: 2



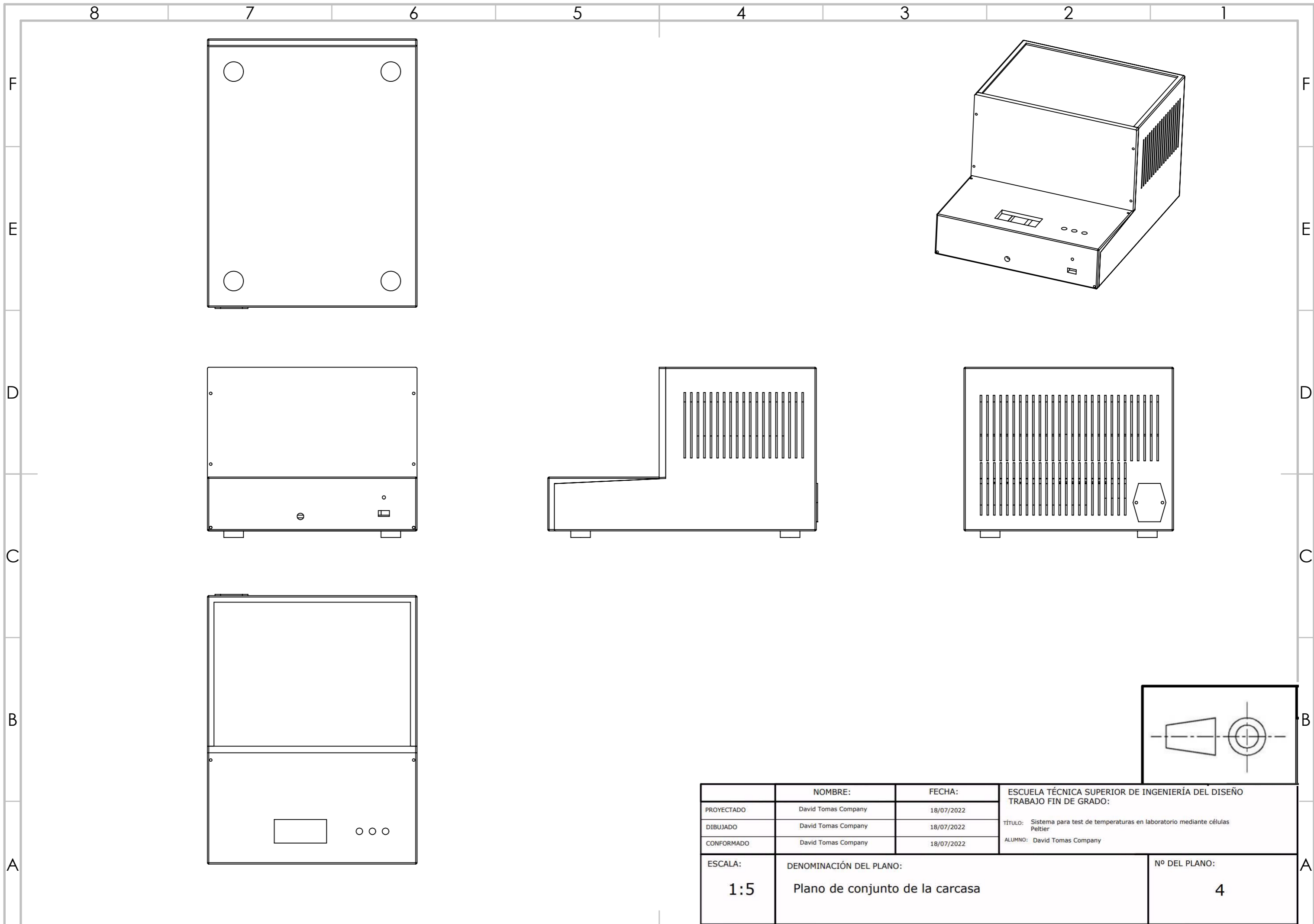
ARDUINO UNO



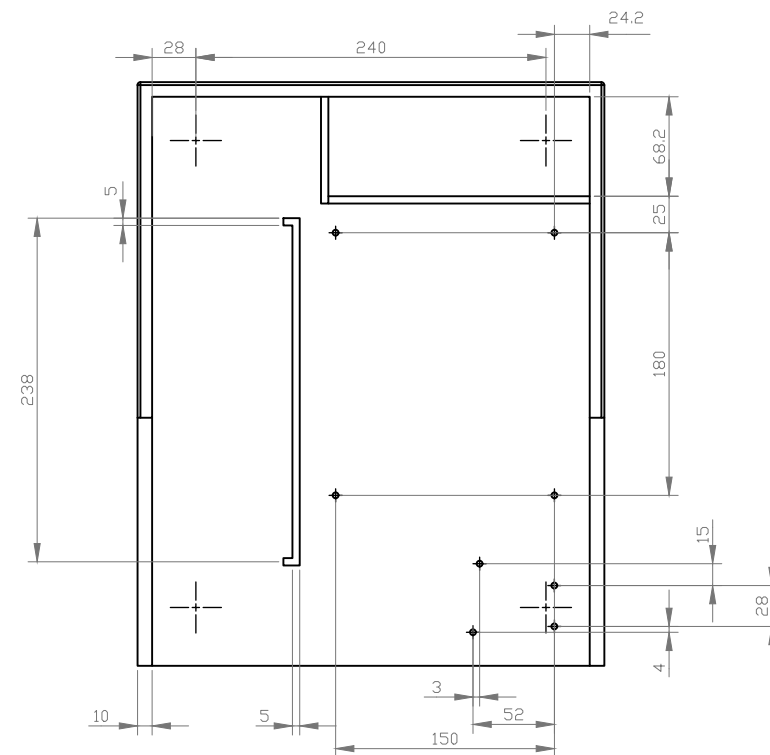
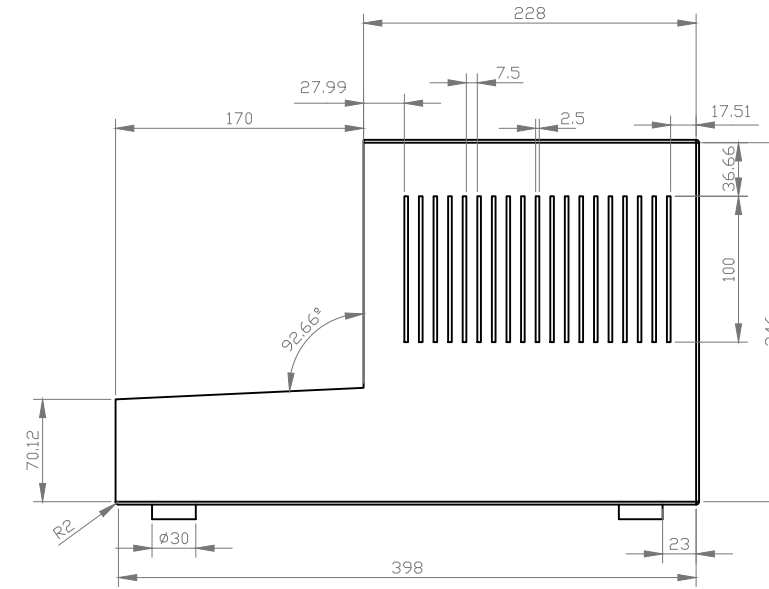
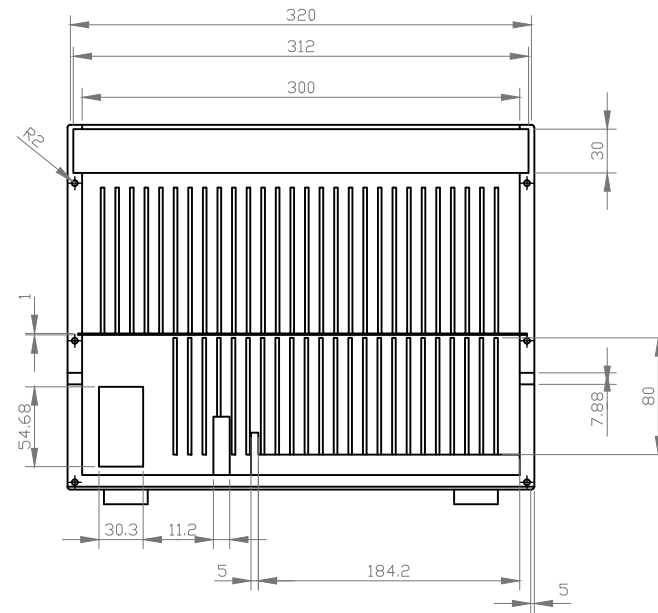
Arduino 328



NOMBRE:		FECHA:		ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:	
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022		TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier.	
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022		ALUMNO: David Tomas Company	
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022			
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:			Nº DEL PLANO:	
	Esquema eléctrico del circuito CM			3	



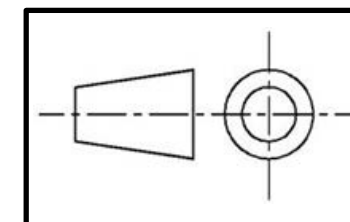
	<b>NOMBRE:</b>	<b>FECHA:</b>	<b>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO</b> <b>TRABAJO FIN DE GRADO:</b> TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier ALUMNO: David Tomas Company
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	
CONFIRMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
<b>ESCALA:</b>	<b>DENOMINACIÓN DEL PLANO:</b>		<b>Nº DEL PLANO:</b>
<b>1:5</b>	<b>Plano de conjunto de la carcasa</b>		<b>4</b>



Todos los tornillos tienen el mismo diámetro y los no acotados están a la misma distancia de los extremos que sus semejantes.

Las rejillas superiores son de las mismas dimensiones y todas tienen el mismo paso

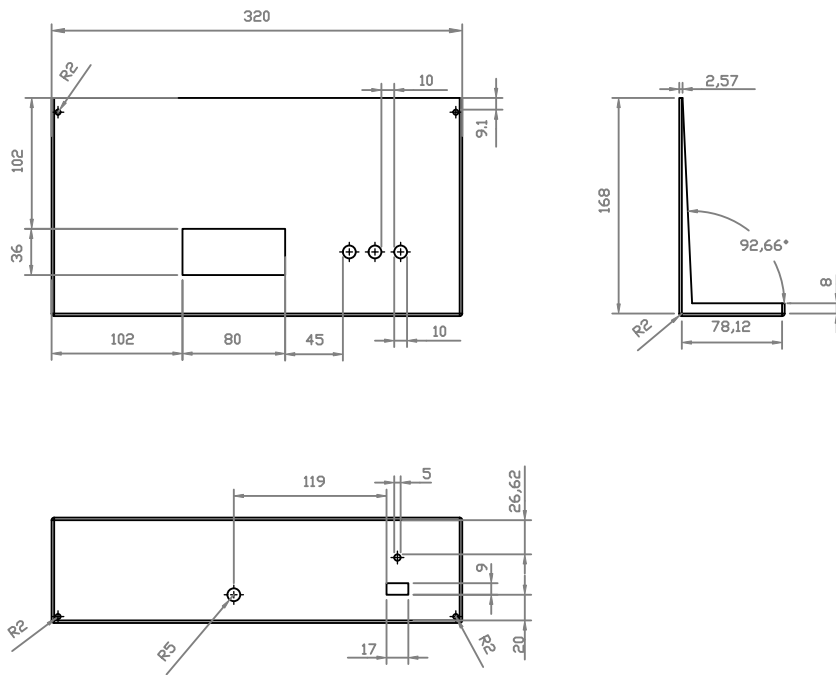
Todos los bordes tienen el mismo radio



Tolerancias generales (mm):

Lineales:  $\pm 0.1$   
 Angulares:  $\pm 0.05$   
 Entre pasadores:  $\pm 0.01$

	NOMBRE:	FECHA:	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier ALUMNO: David Tomas Company
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:		Nº DEL PLANO:
1:5	Pieza 1		5

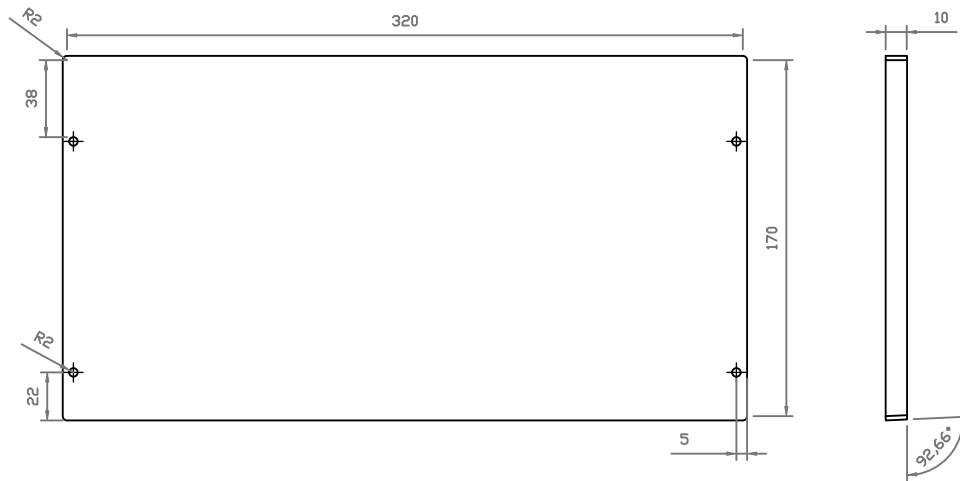


Todos los agujeros en los extremos tienen el mismo diámetro y están a la misma distancia

Todos los bordes tienen el mismo radio

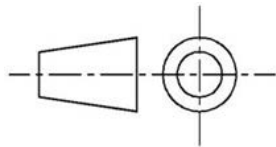
	Tolerancias generales (mm):
	Lineales: $\pm 0.1$ Angulares: $\pm 0.05$ Entre pasadores: $\pm 0.01$

	NOMBRE:	FECHA:	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier ALUMNO: David Tomas Company
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:		Nº DEL PLANO:
1:5	Pieza 2		6



Todos los agujeros tienen el mismo diámetro y están a la misma distancia de los extremos

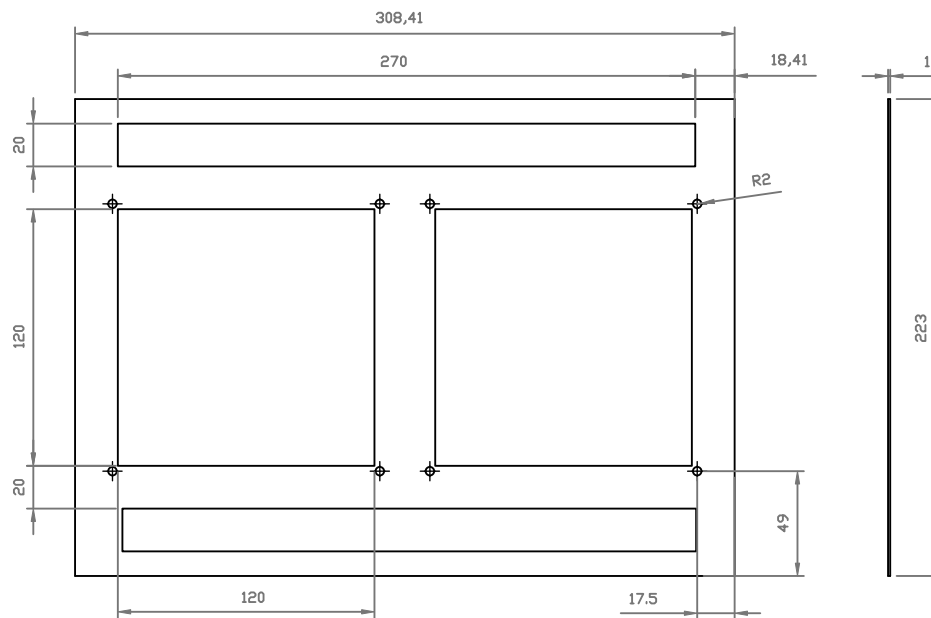
Todos los bordes tienen el mismo radio



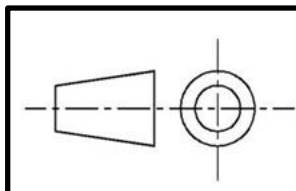
Tolerancias generales (mm):

Lineales:  $\pm 0.1$   
 Angulares:  $\pm 0.05$   
 Entre pasadores:  $\pm 0.01$

	NOMBRE:	FECHA:	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	ALUMNO: David Tomas Company
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:		Nº DEL PLANO:
1:5	Pieza 3		7



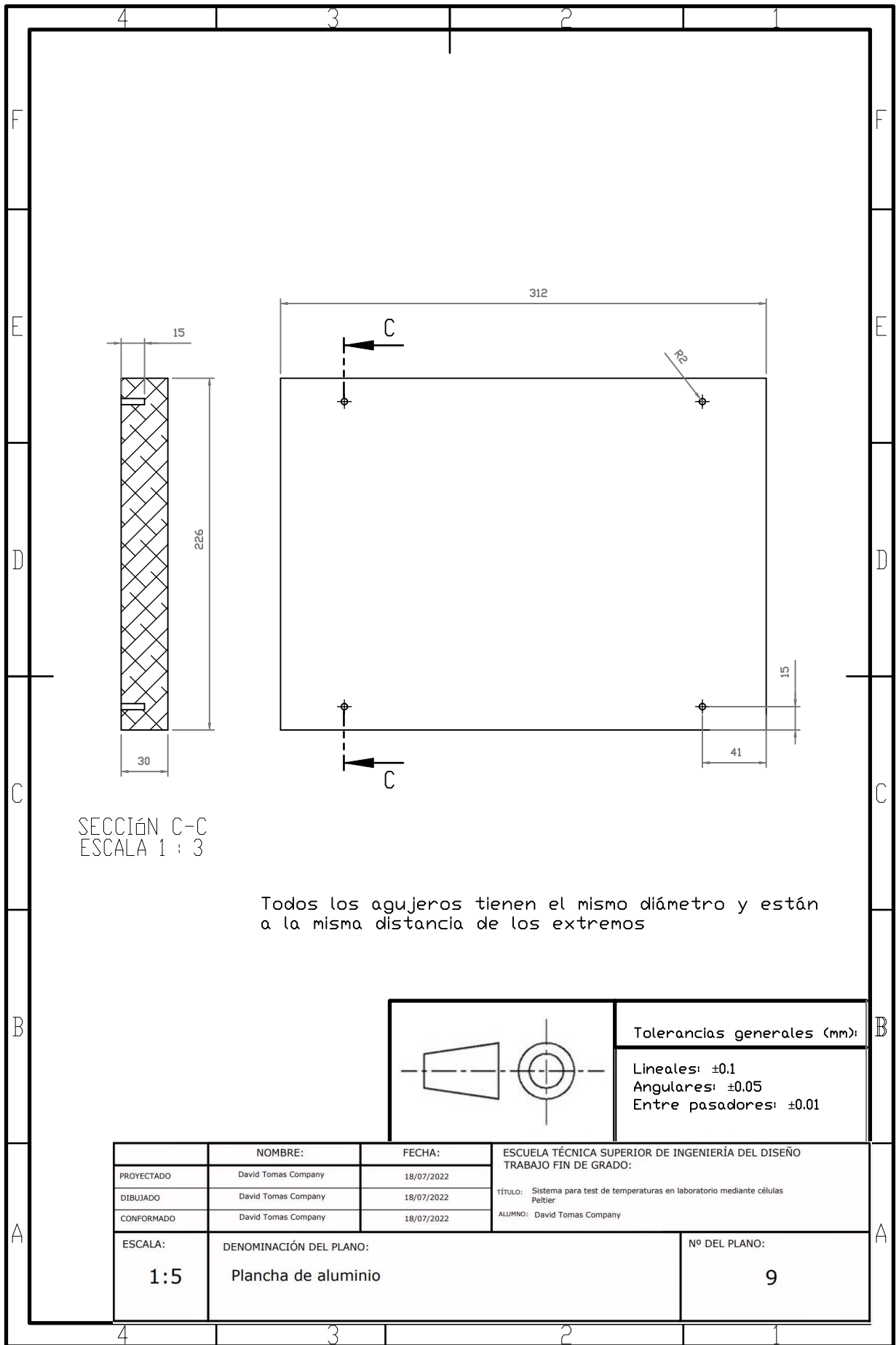
Todos los agujeros tienen el mismo diámetro y están a la misma distancia de los extremos



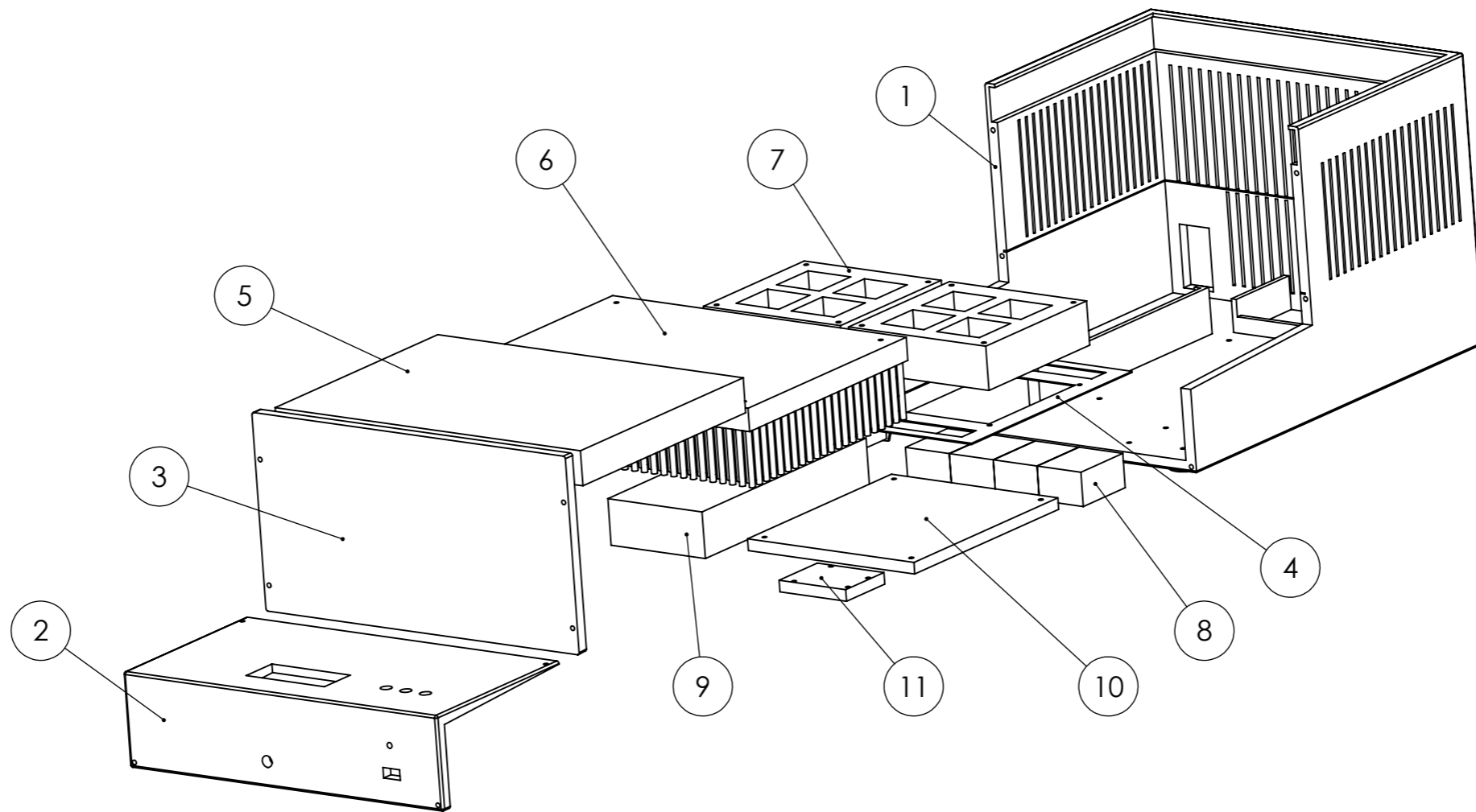
Tolerancias generales (mm):

Lineales:  $\pm 0.1$   
 Angulares:  $\pm 0.05$   
 Entre pasadores:  $\pm 0.01$

	NOMBRE:	FECHA:	ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	ALUMNO: David Tomas Company
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:		Nº DEL PLANO:
1:5	Pieza 4		8

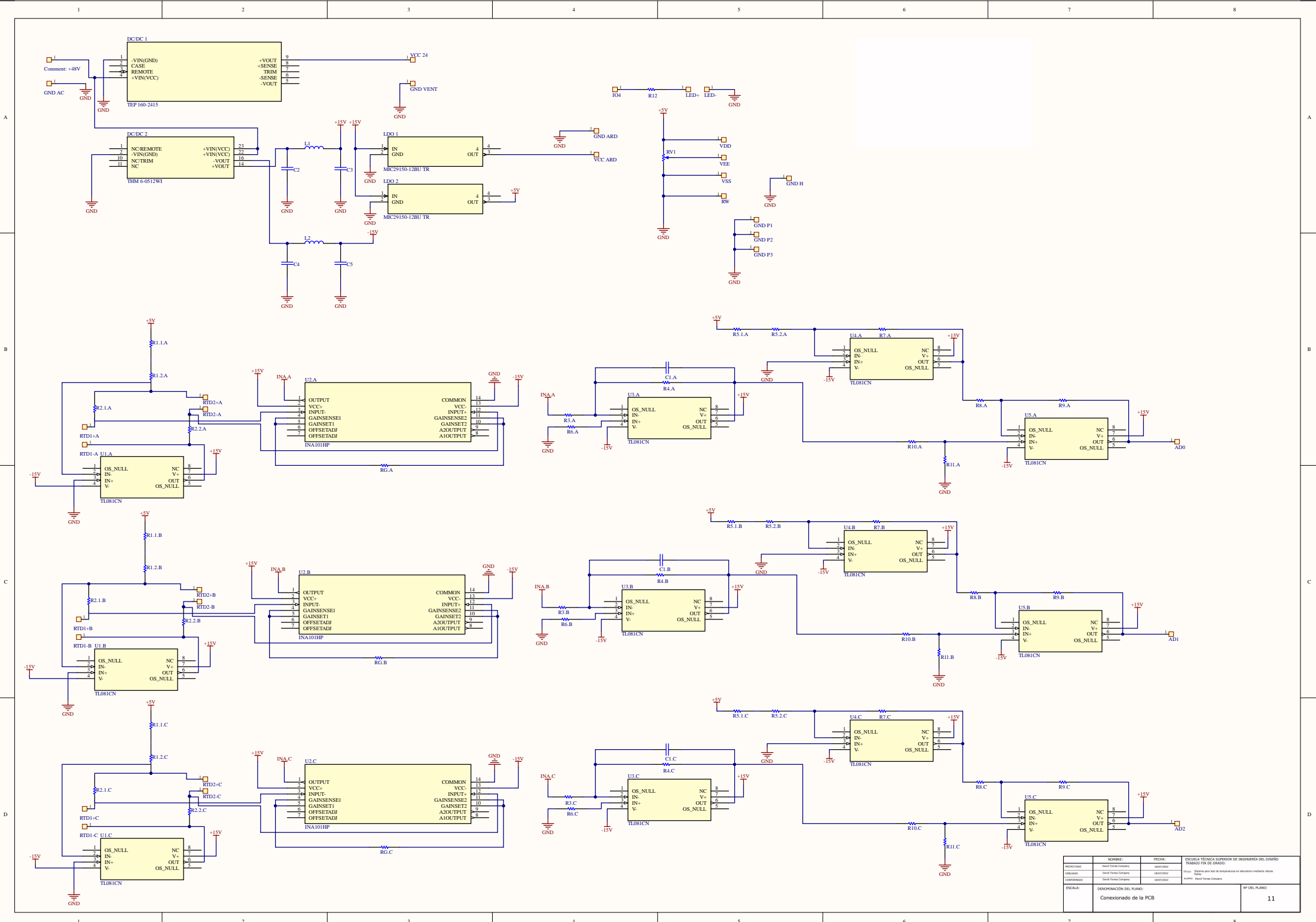




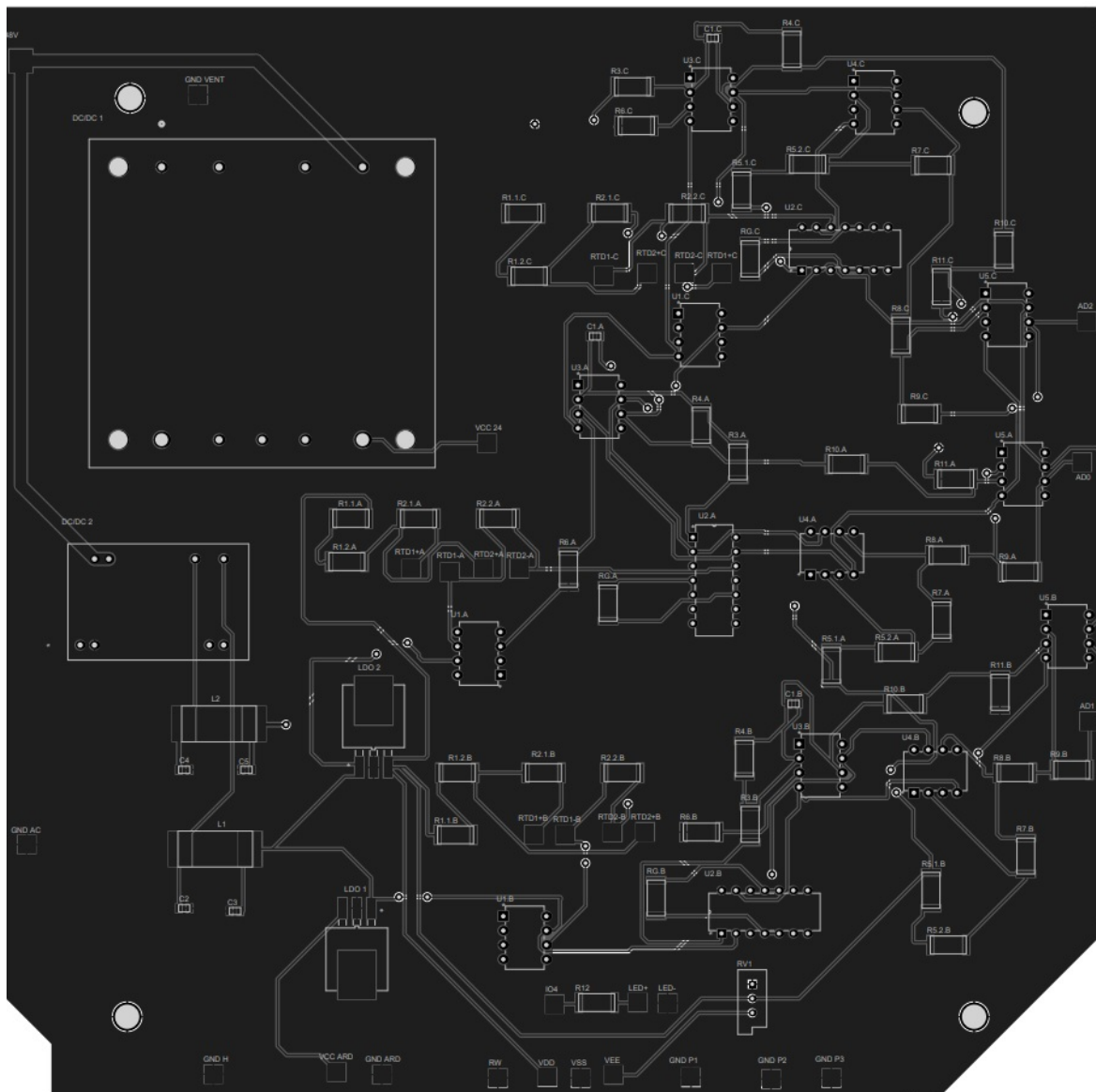


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	P1	PIEZA 1	1
2	P2	PIEZA 2	1
3	P3	PIEZA 3	1
4	P4	PIEZA 4	1
5	PA	PLANCHA DE ALUMINIO	1
6	PD	DISIPADOR	1
7	VE	VENTILADORES	2
8	SW	BLOQUE DE 4 "SWITCH"	1
9	AC	CONVERTIDOR AC/DC	1
10	PCB	PCB	1
11	ARD	ARD	1

	NOMBRE:	FECHA:	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier ALUMNO: David Tomas Company
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:		Nº DEL PLANO:
1:5	Explosionado		10



NOMBRE:		FECHA:	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
DISEÑO DE PCB		18/01/2022	TRABAJO FIN DE GRADO
DISEÑADOR:		David Torres González	TEMA: Diseño para tests de temperatura en laboratorio mediante células de fibra
COORDINADOR:		David Torres González	ASIGNATURA: Diseño de Hardware
ESCALA:		1:1	Nº DEL PLANO:
DENOMINACIÓN DEL PLANO:		11	



	NOMBRE:	FECHA:	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO TRABAJO FIN DE GRADO:  TÍTULO: Sistema para test de temperaturas en laboratorio mediante células Peltier ALUMNO: David Tomas Company
PROYECTADO	David Tomas Company	18/07/2022	
DIBUJADO	David Tomas Company	18/07/2022	
CONFORMADO	David Tomas Company	18/07/2022	
ESCALA:	DENOMINACIÓN DEL PLANO:		Nº DEL PLANO:
	PCB		12