

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**SISTEMA TERMOELÉCTRICO**  
(Thermoelectric System)

Para acceder al Título de  
Graduado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Autor: Rubén García Rodríguez

10 - 2014

<b>TÍTULO</b>	<b>SISTEMA TERMoeLECTRICO</b> (Thermoelectric System)			
<b>AUTOR</b>	<b>Rubén García Rodríguez</b>			
<b>DIRECTOR</b>	<b>Pablo Pedro Sánchez Espeso</b>			
<b>TITULACIÓN</b>	<b>GRADUADO EN INGENIERIA DE TECNOLOGIAS DE TELECOMUNICACIÓN</b>	<b>FECHA</b>	10-2014	<b>TOMO I DE I</b>

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

**CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

**Realizado por: Rubén García Rodríguez**

**Director del TFG: Pablo Pedro Sánchez Espeso**

---

**Título: “Sistema Termoeléctrico”**

**Title: “Thermoelectric System”**

**Presentado a examen el día: 13 de Octubre de 2014**

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

**Composición del Tribunal:**

Presidente (Apellidos, Nombre): Sánchez, Pablo

Secretario (Apellidos, Nombre): Ugarte, Íñigo

Vocal (Apellidos, Nombre): Fernández, Víctor

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG

(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº

(a asignar por Secretaría)

*Dedicado a Ana, Hugo y Lucas*

# INDICE

1.	INTRODUCCION .....	8
1.2	Propósito de este documento .....	8
2.	REQUERIMIENTOS .....	8
3.	DISEÑO .....	9
3.1	Sistemas Termoeléctricos .....	9
3.2	Sistema Termoeléctrico PELTIER .....	10
3.3	Ecuaciones Peltier .....	11
3.4	Esquema de bloques del sistema .....	13
3.5	Listado de principales componentes .....	15
3.5.1	Células PELTIER .....	15
3.5.2	Relés .....	16
3.5.3	Sensor de temperatura .....	17
3.5.4	Fuente de Alimentación .....	18
3.5.5	Microcontrolador + pantalla táctil .....	19
3.5.6	Refrigerador .....	20
3.5.7	Filtro AC .....	21
3.6	Diagrama eléctrico .....	21
3.7	Cálculos .....	23
3.7.1	Consumo de Potencia .....	23
3.7.2	Consideraciones térmicas .....	25
3.8	Software .....	26
3.8.1	PID .....	27
3.9	Diseño Mecánico .....	30
4.	PRESUPUESTO .....	39
4.1	Gastos recurrentes .....	39
4.2	Gastos no recurrentes .....	40
4.3	Precio de venta del sistema .....	40
5.	CONCLUSIONES .....	42

# ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Principio de una célula PELTIER</i> .....	10
<i>Ilustración 2. Curvas características de una célula PELTIER</i> .....	13
<i>Ilustración 3. Diagrama de bloques del sistema termoeléctrico</i> .....	14
<i>Ilustración 4. Relé SSR25-DD</i> .....	16
<i>Ilustración 5. Sonda de temperatura PT100</i> .....	17
<i>Ilustración 6. Fuente de alimentación</i> .....	18
<i>Ilustración 7. Tarjeta de control y pantalla táctil</i> .....	19
<i>Ilustración 8. Ventilador y disipador</i> .....	20
<i>Ilustración 9. Filtro AC</i> .....	21
<i>Ilustración 10. Diagrama eléctrico</i> .....	22
<i>Ilustración 11. Velocidad del aire en el ventilador</i> .....	25
<i>Ilustración 12. Respuesta del ventilador</i> .....	26
<i>Ilustración 13. Ecuación de la respuesta PID</i> .....	27
<i>Ilustración 14. Esquema del sistema PID</i> .....	27
<i>Ilustración 15. Diagrama de flujo</i> .....	29
<i>Ilustración 16. Placa base</i> .....	30
<i>Ilustración 17. Placa base con células PELTIER y sondas de temperatura</i> .....	30
<i>Ilustración 18. Placa base con disipador</i> .....	31
<i>Ilustración 19. Placa base con disipador explosionada</i> .....	31
<i>Ilustración 20. Placa base con disipador explosionada y aislante térmico</i> .....	32
<i>Ilustración 21. Disipador con relés</i> .....	33
<i>Ilustración 22. Flujo de aire sobre el disipador</i> .....	33
<i>Ilustración 23. Chasis inferior</i> .....	34
<i>Ilustración 24. Chasis superior con placa base y disipador</i> .....	35
<i>Ilustración 25. Sistema PELTIER completo</i> .....	35
<i>Ilustración 26. Sistema PELTIER completo</i> .....	36
<i>Ilustración 27. Sistema PELTIER completo explosionado</i> .....	36
<i>Ilustración 28. Plano placa base</i> .....	37
<i>Ilustración 29. Plano sistema PELTIER completo</i> .....	38

# TABLAS

Tabla 1. Especificaciones del sistema .....	9
Tabla 2. Especificaciones EC1-12706.....	16
Tabla 3. Especificaciones SSR-25D.....	17
Tabla 4. Especificaciones de la fuente de alimentación H10064 .....	19
Tabla 5. Especificaciones del ventilador .....	21
Tabla 6. Consumos del sistema .....	24
Tabla 7. Gastos recurrentes .....	39
Tabla 8. Gastos no recurrentes .....	40

## **1. INTRODUCCION**

El sistema propuesto en este proyecto es el diseño de una placa que pueda mantener una temperatura estable en toda su superficie entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y que ésta sea seleccionable por el usuario.

El sistema no ha de estar basado en sistemas de compresión y expansión de gases y ha de ser lo más compacto posible.

Dicho sistema ha de ser capaz también de generar ciclos de temperatura/tiempo controlados con el fin de realizar ensayos de sistemas o materiales.

Uno de los principales usos de este tipo de sistemas se encuentra en los test en laboratorios.

### **1.2 Propósito de este documento**

El presente documento contiene el diseño completo de un sistema de control de temperatura basado en el efecto PELTIER.

Dicho diseño comprende desde los requerimientos hasta los planos de fabricación.

## **2. REQUERIMIENTOS**

La siguiente tabla muestra las especificaciones esperadas para el producto que se desarrolla en este proyecto.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	COMENTARIOS
Potencia calorífica	100	W	Para temperatura ambiente igual a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta T$
Rango temperatura en placa base	+100 a -20	$^{\circ}\text{C}$	Para temperatura ambiente igual a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con una carga térmica en placa base de 0 W
Alimentación	100 ~ 250	VAC	Con conector IEC
Interface PC	USB serie		



PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	COMENTARIOS
Consumo máximo del sistema	500	W	Potencia consumida a 220VAC
Tamaño	400 x 300 x 200	mm	
Peso	< 5	Kg	

*Tabla 1. Especificaciones del sistema*

Como principales características para el sistema se pueden citar los siguientes:

- Entrada de alimentación estándar universal 100 a 250 VAC.
- Calienta o enfría.
- Funcionamiento silencioso: el sistema de ventilación se ha diseñado teniendo en cuenta este parámetro.
- Libre de mantenimiento, sin gas ni filtros.
- Adaptable para diferentes usos.
- Sistema de control con panel táctil de fácil uso.
- Regulador PID sintonizable.
- Sensores RTD internos.
- Sistema de creación de perfiles de fácil uso.
- Sistema de control externo mediante USB.

### **3. DISEÑO**

#### **3.1 Sistemas Termoeléctricos**

Un sistema termoeléctrico es aquel que se sirve de la electricidad para obtener una diferencia de temperatura o viceversa.

Se denominan fenómenos termoeléctricos o termoelectricidad a tres fenómenos, el efecto SEEBECK, el efecto PELTIER y el calor de Thomson. El presente proyecto comprende únicamente un sistema basado en el efecto PELTIER.

En 1834 el físico francés Jean C. A. Peltier descubrió el efecto que lleva su nombre. Este dice que si una corriente pasa a través de un Termopar, la temperatura de una parte de este circuito aumenta y la temperatura en la otra sección disminuye, por lo que concluye

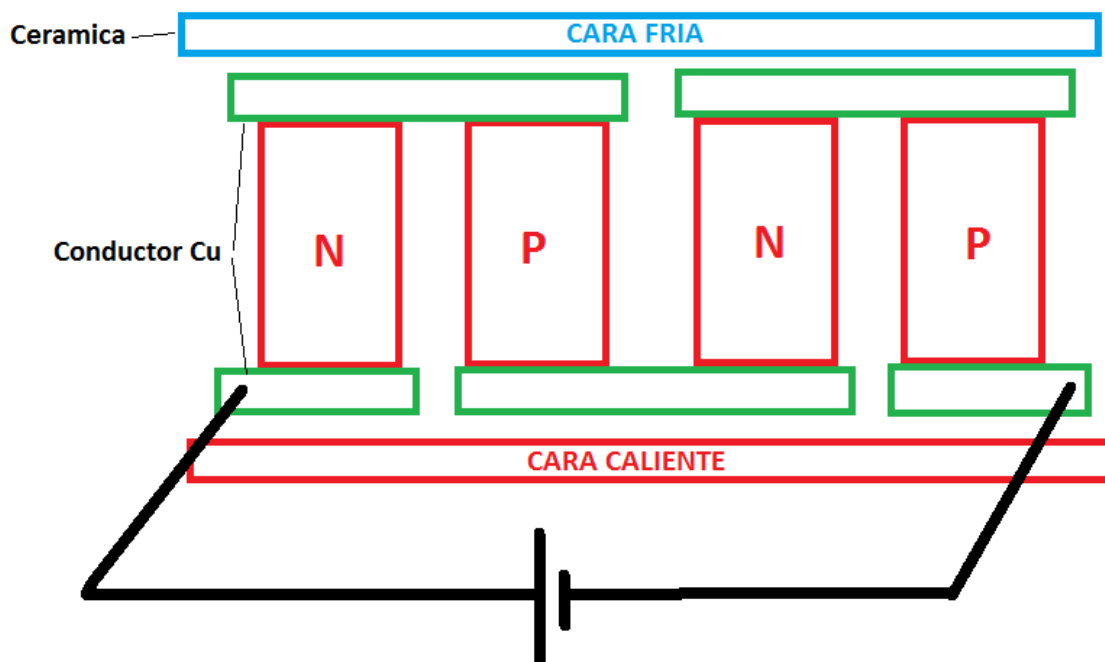
que el calor es transferido desde una unión a otra. La cantidad de calor que se transmite es proporcional a la corriente generada.

### 3.2 Sistema Termoelectrico PELTIER

Las células PELTIER son unos dispositivos termoelectricos que se caracterizan por la aparición de una diferencia de temperatura entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente.

Ésta es una alternativa a la clásica refrigeración mediante compresión de vapores con cambio de fase, en la que se establece un determinado ciclo para un gas que es comprimido para su posterior expansión, con la correspondiente absorción de calor. Como consecuencia, en todo circuito frigorífico se requiere de un condensador, evaporador, circuito de expansión y refrigerantes. La refrigeración termoelectrica supone una alternativa a los sistemas utilizados habitualmente.

Si bien el efecto PELTIER es conocido desde 1834, su aplicación práctica necesitó del desarrollo de los semiconductores, ya que éstos resultan ser buenos conductores de la electricidad pero pobres conductores del calor. La circulación de una corriente eléctrica a través de dos materiales semiconductores con diferente densidad de electrones libres produce que se libere o se absorba energía. La transferencia de energía tiene lugar en forma de flujo calorífico entre las dos caras de los semiconductores.



*Ilustración 1. Principio de una célula PELTIER*

La célula PELTIER consta por tanto de:

- Una zona semiconductor P y N alternándose.
- Unas placas conductoras (generalmente cobre) que unen las zonas semiconductoras P y N de manera alterna.
- Unas placas cerámicas que unen el sistema: una será la zona fría y otra la caliente dependiendo de cómo se aplique la corriente.

El enfriamiento termoeléctrico empezó a ser factible a partir de los estudios de Telkes en los años 30 y de Lofee en 1956 ya que los nuevos materiales semiconductores producían rendimientos mucho más altos que lo disponible hasta entonces. Telkes utilizó pares o soldaduras de PbS y ZnSb, y Loffee descubrió el uso de PbTe y PbSe. Actualmente, se emplea fundamentalmente el bismuto-teluro como material semiconductor, fuertemente dopado para crear un exceso (tipo-n) o una deficiencia (tipo-p) de electrones.

### **3.3 Ecuaciones Peltier**

Son varios los fenómenos que acontecen dentro de una célula de este tipo, pudiéndose enunciar los efectos Peltier, Thomson y Joule, además de las propias características de la transmisión de calor. Sin embargo, dichos procesos no son todos de igual magnitud e importancia. De hecho, en el rango de temperaturas necesarias, se puede despreciar el flujo calorífico producido por la circulación de la corriente eléctrica con variación de temperatura; esto es, el denominado efecto Thomson. Así que, teniendo en cuenta esta simplificación, al aplicar una diferencia de potencial sobre la célula se producirá una cesión de calor por unidad de tiempo en la cara caliente igual a:

$$Q_{PC} = \alpha \times T_C \times I$$

Donde  $T_C$  es la temperatura de la cara caliente,  $\alpha$  es el coeficiente Seebeck e  $I$  la corriente que atraviesa al circuito.

Por el mismo efecto, la absorción de calor por unidad de tiempo en la cara fría será:

$$Q_{FP} = \alpha \times T_F \times I$$

Siendo  $T_F$  la temperatura de la cara fría.

De otro lado, si se consideran las pérdidas por unidad de tiempo por efecto Joule, las cuales se supone que se reparten mitad para cada cara, éstas quedarán expresadas por:

$$Q_J = \frac{1}{2} \times R \times I^2$$

Donde R es la resistencia eléctrica de la célula PELTIER.

La diferencia de temperaturas entre ambas caras producirá un efecto de conducción térmica entre la cara caliente y la cara fría, cuantificable como:

$$Q_{TC} = \frac{T_C - T_F}{R_{TH}}$$

En donde RTH representa la resistencia térmica entre la cara caliente y la fría.

El flujo neto calorífico absorbido por la cara fría será, haciendo el balance energético:

$$Q_F = Q_{PF} - Q_J - Q_{CT} = \alpha T_F I - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_C - T_F}{R_{TH}}$$

Mientras que el calor cedido y que debe ser disipado a través de la cara caliente será igual:

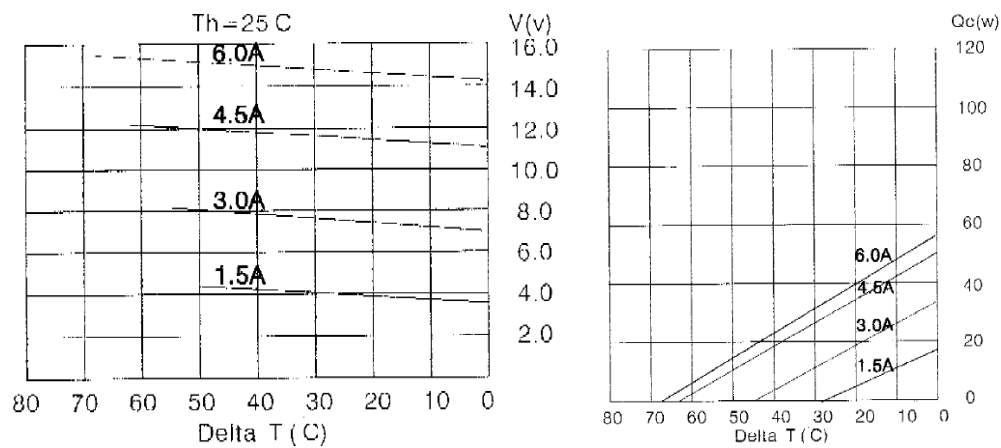
$$Q_C = Q_{PC} - Q_J - Q_{CT} = \alpha T_C I + \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_C - T_F}{R_{TH}}$$

Aplicando el primer principio de la Termodinámica, resultará que la potencia eléctrica suministrada será la diferencia entre los flujos caloríficos de disipación y de absorción, concluyendo que:

$$P_E = Q_C - Q_F = \alpha (T_C - T_F) I + I^2 R = \alpha \Delta T I + I^2 R$$

Si se considera despreciable el efecto Thomson y considerando sólo los valores medios de las propiedades de transporte del calor. El coeficiente de Seebeck, la resistividad eléctrica y la conductividad térmica varían con la temperatura, pero para el rango de temperaturas que se maneja, éstos pueden ser considerados constantes.

Los fabricantes suelen incluir en sus especificaciones las gráficas del rendimiento de sus células. Un ejemplo se puede ver en las siguientes figuras:

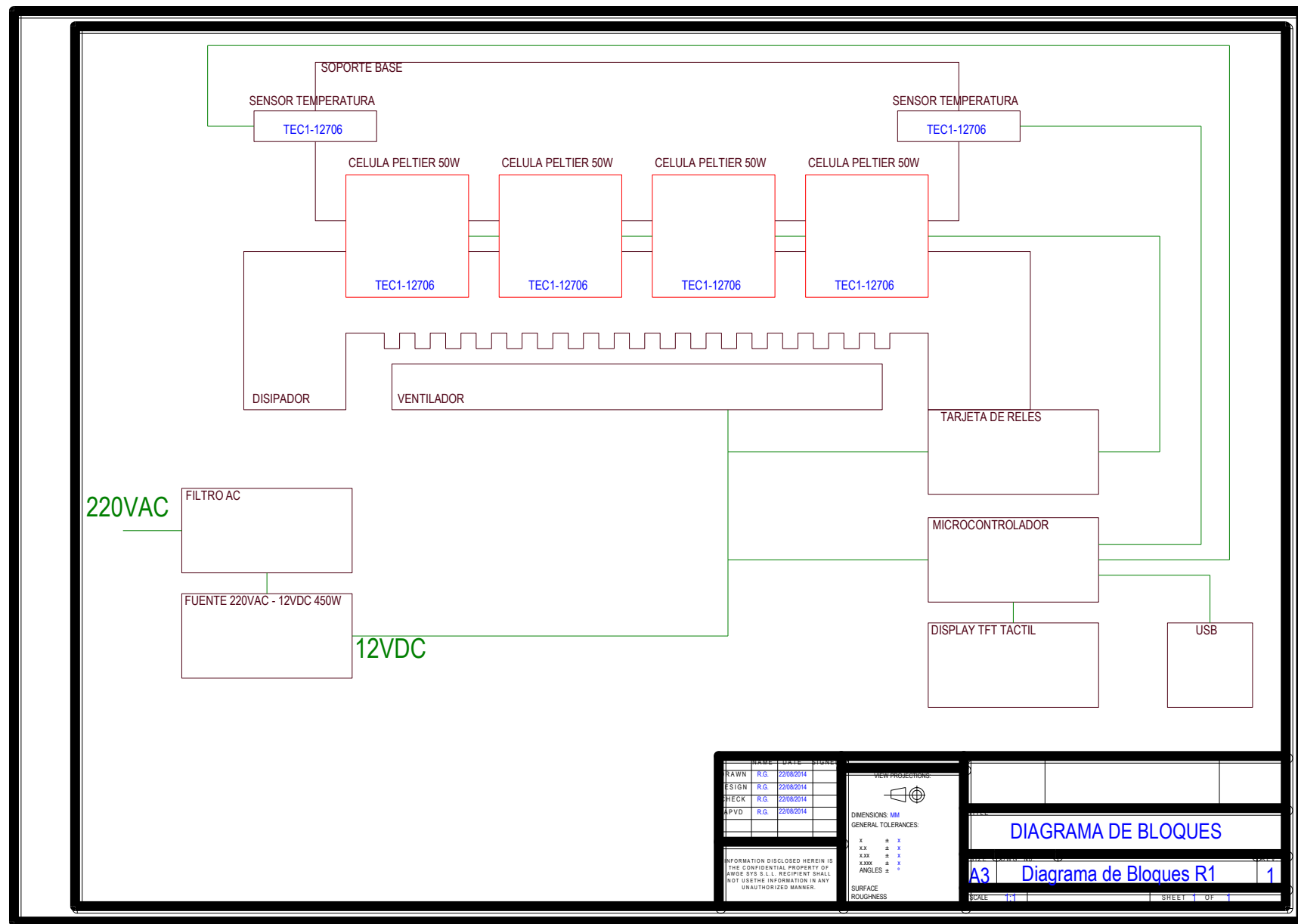


*Ilustración 2. Curvas características de una célula PELTIER*

De una de las gráficas se puede calcular la corriente y la diferencia de temperatura entre la cara fría y la caliente; de la otra y con el incremento de temperatura y la corriente, se puede obtener potencia calorífica.

### **3.4 Esquema de bloques del sistema**

El sistema consta de los siguientes bloques, los cuales se pueden ver en el diagrama correspondiente:



*Ilustración 3. Diagrama de bloques del sistema termoelectrico*

El sistema está compuesto de los siguientes elementos:

- Un *soporte base*, el cual dispone de unos insertos para el anclaje de las muestras y al cual están unidas las células PELTIER en la mejor disposición para que el reparto de la temperatura sea lo más homogénea posible.
- Cuatro *células PELTIER* conectadas en paralelo y que funcionan conjuntamente. Se encuentran colocadas sobre el soporte base por una de las caras y sobre un disipador por la otra.
- Dos *sensores de temperatura* colocados sobre el soporte base basados en PT100 con circuito de medida.
- Una *fuentes de alimentación* capaz de suministrar las tensiones y corrientes necesarias para nutrir todo el sistema. Se ha seleccionado de 12VDC la cual sirve para todos los elementos.
- Una *tarjeta de relés*. Dichos elementos son de estado sólido y se usan para activar/desactivar o invertir la polarización de las células PELTIER, con lo que se consigue calentar/enfriar.
- Un *filtro de entrada* para la alimentación alterna con fusible.
- Una *tarjeta con micro-controlador* que es usado como elemento de control de todos los sistemas.
- Una *tarjeta TFT* táctil para usarse como sistema HMI.

### **3.5 Listado de principales componentes**

En las siguientes líneas se describen los principales componentes así como sus características:

#### **3.5.1 Células PELTIER**

Las células PELTIER están basadas en el modelo TEC1-12706 de Hebei I.T. Esta es una célula PELTIER de unos 50 W aproximadamente y que funciona a 12V. La tabla de características es la siguiente:

PARAMETRO		
Temperatura lado caliente	25° C	50° C
$Q_{MAX}$ (W)	50	57
Delta $T_{max}$ (°C)	66	75
$I_{max}$ (A)	6.4	6.4
$V_{max}$ (V)	14.4	16.4
Resistencia ( $\Omega$ )	1.98	2.30

*Tabla 2. Especificaciones EC1-12706*

En nuestro caso usaremos una fuente de 12VDC para alimentar las células, ya que éstas se encuentran conectadas en paralelo.

### **3.5.2 Relés**

Se utiliza el modelo SSR-25DD. Estos relés están diseñados para ser ensamblados sobre un disipador.



*Ilustración 4. Relé SSR25-DD*

La siguiente tabla muestra las características principales de dichos relés:



PARÁMETRO	VALOR
Corriente de carga máxima	25 A
Voltaje de operación de entrada	3 a 32 V <sub>DC</sub>
Corriente de entrada	7.5 mA a 12 V <sub>DC</sub>
Voltaje de salida	5 a 60 V <sub>DC</sub>
Caída de voltaje	1V a 25°C y 25A
Tiempo de respuesta	10 ms para ON y OFF
Temperatura de operación	-20 °C a 80° C
Peso	0.105 Kg

*Tabla 3. Especificaciones SSR-25D*

Se debe tener un especial cuidado con la disipación de este tipo de elementos, ya que la propia caída de voltaje en el dispositivo puede calentarlo por encima de su temperatura de operación haciendo disminuir el rendimiento o causando un fallo del sistema.

### **3.5.3 Sensor de temperatura**

Los sensores de temperatura se basan en elementos PT100, que son sondas de temperatura bastante precisas y estables. El sensor viene junto con un cuerpo metálico de 4mm de diámetro para incorporarlo en un taladro adecuado, como muestra la siguiente imagen:



*Ilustración 5. Sonda de temperatura PT100*

El sensor de platino puede operar entre -200 °C y 400 °C con un gradiente de temperatura de 0.385 Ohm/°C. Dicho sensor ha de ir conectado a un circuito de acondicionamiento adecuado.

#### **3.5.4 Fuente de Alimentación**

Para este sistema se ha seleccionado una fuente de alimentación AC/DC de 350 W y con salida de 12 V  $\pm$  10%.

Para este sistema escogemos el modelo H10064, el cual puede proporcionar hasta 30 A de corriente de salida.



*Ilustración 6. Fuente de alimentación*

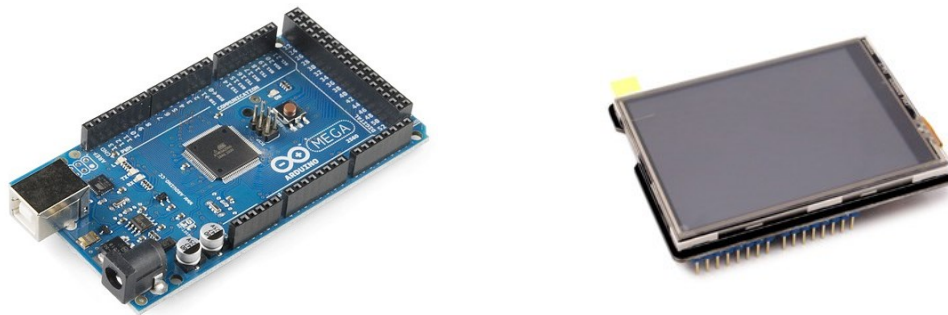
La siguiente tabla muestra las características principales de dicha fuente:

PARAMETRO	VALUE
Entrada	110 V <sub>AC</sub> / 240 V <sub>AC</sub>
Voltaje de salida	12 V <sub>DC</sub>
Ajuste de voltaje de salida	± 10 %
Corriente máxima de salida	30 A
Temperatura de trabajo	-10 °C a 50 °C
Tamaño	21,5 x 11,5 x 5 cm
Peso	0.84 Kg

*Tabla 4. Especificaciones de la fuente de alimentación H10064*

### **3.5.5 Microcontrolador + pantalla táctil**

Para este sistema usaremos una placa micro-controlador junto con un pantalla táctil ya contruidos debido a la gran cantidad de librerías y dado que su precio se ha reducido mucho. Se ha seleccionado una tarjeta ARDUINO MEGA 2560 junto con una pantalla táctil de 2,8". La siguiente imagen muestra ambos sistemas.



*Ilustración 7. Tarjeta de control y pantalla táctil*

La pantalla ya está preparada para conectarse directamente a la tarjeta sin más elementos auxiliares.

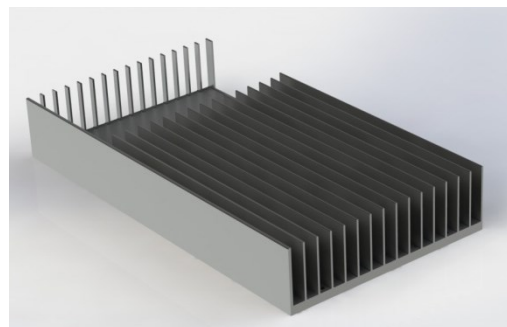
Otro punto a favor de la tarjeta es que permite controlar los relés directamente sin necesidad de ningún circuito adicional.

El ARDUINO Mega 2560 es una placa basada en el microprocesador Atmega2560 que dispone de 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP, y un botón de reinicio. Contiene, así mismo, todo lo necesario para apoyar el micro-controlador.

La pantalla es de tipo táctil resistiva compatible con ARDUINO. Puede ser utilizada como dispositivo de visualización o simplemente como PAD. Cuenta también con un módulo de tarjeta SD integrado y su alimentación la coge directamente de la placa de ARDUINO.

### **3.5.6 Refrigerador**

Este sistema se compone de dos ventiladores más un disipador y tiene el objetivo de disipar el calor generado tanto en las células PELTIER como en los relés.



*Ilustración 8. Ventilador y disipador*

El disipador debe ser adecuadamente mecanizado para permitir la sujeción tanto de las células PELTIER como de los relés.

Así mismo los ventiladores se sujetan a la carcasa exterior y están situados debajo del disipador, esto permite que sean de gran diámetro, 114mm, lo cual es ideal reducir el ruido ambiente a la vez que se aumenta el flujo de aire. Sus características principales son:

PARAMETRO	VALUE
Velocidad	1000 rpm
Voltaje	12 V <sub>DC</sub>

PARAMETRO	VALUE
Consumo	0.8 W
Flujo de aire CFM	66 CFM
Ruido	18 dBA
Temperatura de trabajo	-10 °C a 50 °C
Tamaño	14 x 14 x 2.5 cm
Peso	0.15 Kg

*Tabla 5. Especificaciones del ventilador*

### **3.5.7 Filtro AC**

Como protección en la línea de entrada se coloca un filtro de alimentación con fusible incorporado. En este caso se ha seleccionado el PS0S0SSXA de TE:



*Ilustración 9. Filtro AC*

El filtro incorpora así mismo un interruptor que servirá de manera general para encender y apagar la unidad.

Este elemento filtra el posible ruido EMI generado hacia la salida desde la fuente de alimentación.

## **3.6 Diagrama eléctrico**

La siguiente figura muestra el diagrama eléctrico del sistema:

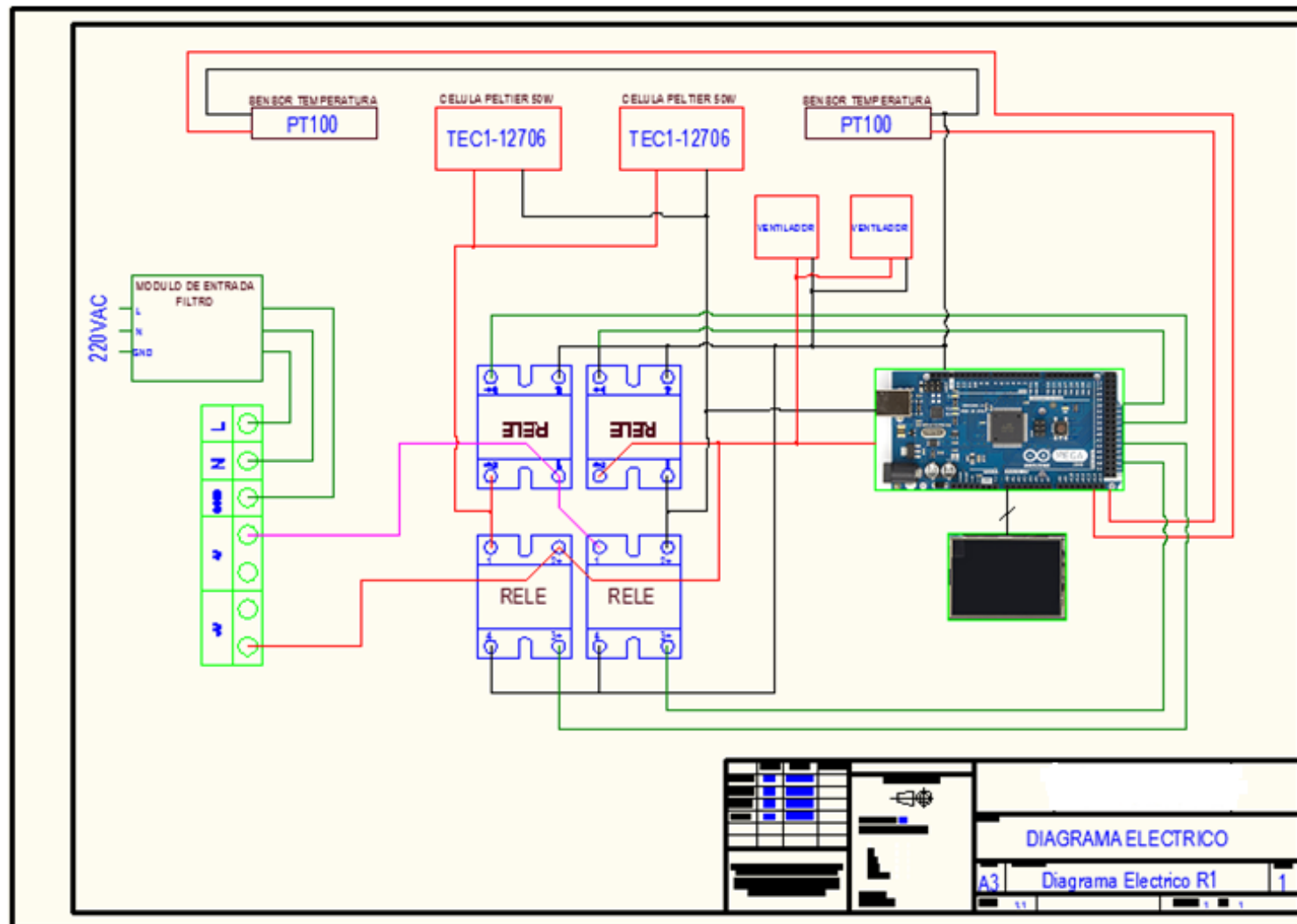


Ilustración 10. Diagrama eléctrico

Como se puede ver en el esquema, el juego de 4 relés se usa de manera que las células se pueden alimentar en los dos sentidos. Esto permite que las células enfríen y calienten teniendo un sistema que puede tanto calentar como enfriar. Esto unido a que los relés son de estado sólido es de vital importancia para el sistema PID de control.

La tarjeta ARDUINO permite su conexión directa con los relés de estado sólido para activarlos/desactivarlos.

Por otra parte los ventiladores están siempre encendidos ya que durante los ciclos de enfriado se necesita “sacar” el exceso de calor del disipador y durante los ciclos de calentamiento se necesita bajar la temperatura del lado del disipador.

Como ya se ha indicado, la pantalla se conecta directamente a la tarjeta ARDUINO y se alimenta de ella.

La fuente de alimentación de 12VDC suple a todos los sistemas y en su entrada tiene el filtro AC como elemento de protección.

### **3.7 Cálculos**

En este apartado se van a realizar algunos cálculos de manera que se pueda conseguir una estimación del consumo de potencia del sistema así como sus temperaturas y disipación, a fin de comprobar que todo funcionará según lo esperado.

#### **3.7.1 Consumo de Potencia**

La fuente de alimentación puede darnos 12 VDC y 30 A o 350 W.

En nuestro caso la fuente alimenta:

- PCB ARDUINO + TFT
- 2 x Ventiladores
- 4 Células PELTIER a través siempre de 2 relés.

El sistema ARDUINO + TFT consume menos de 100 mA a 12 V<sub>DC</sub> lo que se traduce en 1.2 W.

El consumo de los ventiladores es de 0.8 W cuando se alimentan a 12 VDC, por lo que los dos ventiladores consumen 1.6 W.

Para calcular el consumo de las células PELTIER hemos de tener en cuenta su esquema eléctrico, esto es, la fuente de alimentación de 12 VDC llega a las células en paralelo y siempre a través de dos relés. De las hojas de datos de los relés se desprende que la caída de tensión en ellos es de 1 VDC aproximadamente, esto indica que en los dos relés tendremos una caída de 2 VDC, por lo que la tensión a la que se alimentan las células PELTIER es de 10 VDC. En este caso ignoramos la caída de tensión en los cables ya que se pondrán de una sección adecuada para que ésta sea despreciable.

Con lo anterior y de la hoja de datos de las células se sabe que la resistencia de la misma es de  $2.3 \Omega$  a  $50^\circ\text{C}$  (en la cara caliente) por lo que su consumo a 10 VDC es de:

$$I = \frac{10}{2.3} = 4.34 \text{ A} \rightarrow P = 10 \times 4.34 = 43.4 \text{ W}$$

Cada célula PELTIER consume 43.4 W y como tenemos 4 el consumo total será de 173.6 W.

La caída de potencia en los relés será de:

$$P = 1 \text{ V} \times (4.34 \text{ A} \times 4 \text{ Células}) = 17.36 \text{ W en cada relé}$$

Sumando todos los elementos tenemos:

ELEMENTO	POTENCIA
Células PELTIER	173.6 W
Relés (solo se activan 2 cada vez)	34.72 W
Ventiladores	1.6 W
ARDUINO + TFT	1.2 W
<b>TOTAL</b>	<b>211.12 W</b>

*Tabla 6. Consumos del sistema*

El consumo total para los elementos alimentados a 12 VDC es de 211.12 W.



El fabricante de la fuente no proporciona datos acerca del rendimiento, sin embargo para este tipo de fuentes se puede suponer una en torno al 75 %. Con esto el consumo de potencia del sistema completo sería de 281 W.

### 3.7.2 Consideraciones térmicas

Para construir un buen sistema como el del presente proyecto se han de tener en cuenta ciertos aspectos desde el punto de vista térmico.

Calcularemos la potencia que se deriva en calor para cada componente:

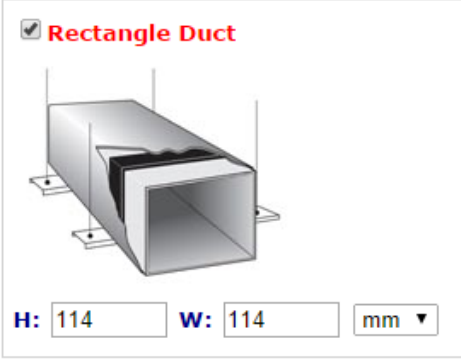
Se ha visto que los relés disipan una potencia de 17.36 W cada uno, esta potencia se deriva completamente en forma de calor y se deberá disipar correctamente a través del disipador.

La fuente de alimentación es otro elemento de calor, pero como lleva su propio ventilador consideraremos que está construida de forma correcta y su calor lo disipa completamente su propio sistema de ventilación.

Las células PELTIER son los elementos principales de generación de calor, se analizará el caso en que las células PELTIER se usan para enfriar la placa base, en dicho caso todo el calor generado por dichas células pasará directamente al disipador que en este caso serán 43.4 W cada una.

Con los datos anteriores y los del disipador además del ventilador se puede realizar una simulación térmica y comprobar cuál será la temperatura a la que pondrá el disipador.

De la hoja de datos del ventilador se tiene que el flujo de aire es de 66 CFM, para ver la eficiencia del disipador pasamos esto a m/s usando un conversor:



☒ **Rectangle Duct**

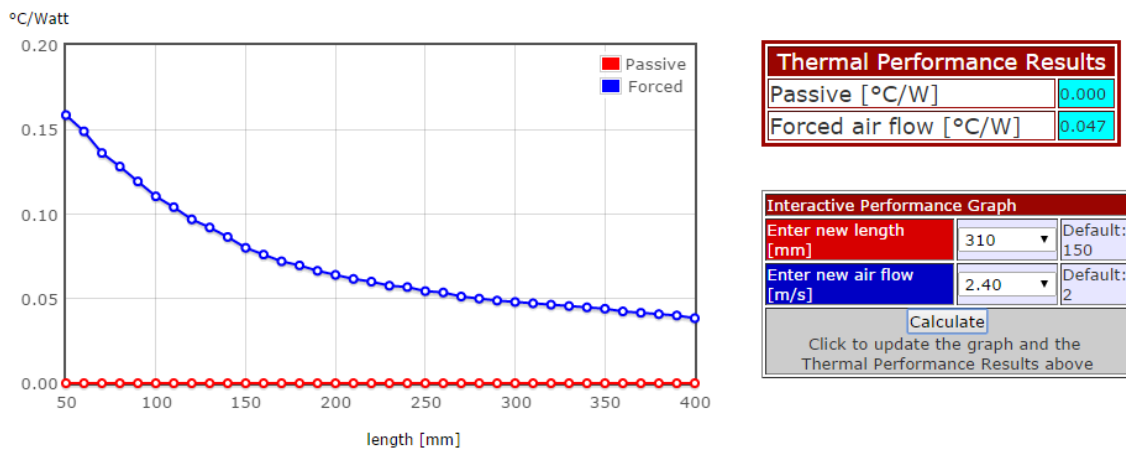
H: 114 W: 114 mm

Air Flow: 66 CFM

2.4 m/s

*Ilustración 11. Velocidad del aire en el ventilador*

Con el dato de velocidad de 2.4 m/s y el tamaño del disipador se deduce la siguiente gráfica del disipador:



*Ilustración 12. Respuesta del ventilador*

La constante del disipador es por tanto de 0.05 °C/W, esto quiere decir que por cada vatio sobre el disipador la temperatura en el mismo se incrementa en 0.05 °C.

En el caso de este sistema la temperatura máxima en el disipador será:

$$T_{max} = 0.05 \frac{^{\circ}C}{W} \times (34.72W + 173.6W) = 10.416 ^{\circ}C$$

Evidentemente este cálculo es una aproximación pero se le puede considerar un 90% de exactitud aunque se obvian otros factores como la resistencia térmica de contacto.

De la fórmula anterior se deduce que la zona caliente del disipador eleva su temperatura en 10.416 °C sobre la temperatura ambiente cuando disipa la carga máxima, esto hace que el sistema pueda funcionar sobradamente sin llegar a los extremos de temperatura de los componentes.

### 3.8 Software

Controlador PID basado en una tarjeta comercial y con una pantalla táctil resistiva como elemento de entrada. En dicha pantalla se selecciona la temperatura final que deberá tener la placa.

### 3.8.1 PID

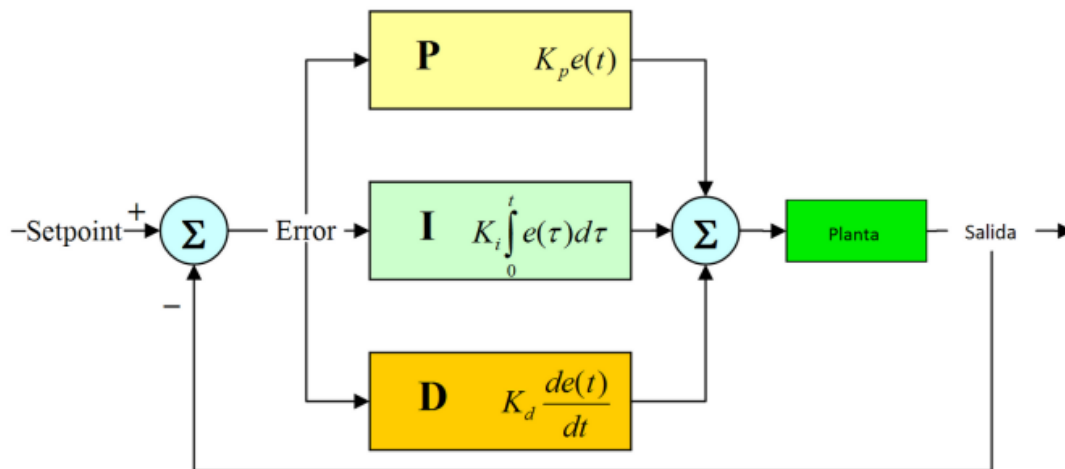
A la hora de usar el sistema nos hemos decantado un por un control PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Un PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso, en este caso la acción se llevará a cabo sobre las células PELTIER, bien calentándolas, bien enfriándolas.

Un controlador PID se caracteriza por combinar tres acciones (P, I y D) mediante el siguiente algoritmo de control:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

*Ilustración 13. Ecuación de la respuesta PID*

Un sistema PID es posible mostrarlo con el siguiente esquema:



*Ilustración 14. Esquema del sistema PID*

Los sensores RTD de temperatura proporcionan una señal analógica que es convertida a digital en el micro-controlador, dicha señal es el punto actual en el que se encuentra el sistema.

El micro-controlador ya tiene el valor que se desea alcanzar y que se ha introducido en la pantalla.

El micro-controlador resta la señal de punto actual a la señal de punto deseado, obteniendo así la señal de error que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado y el valor medido. La señal de error es utilizada por cada uno de los tres componentes del controlador PID. Las tres señales sumadas, componen la señal de salida que el controlador va a utilizar para gobernar al actuador. La señal resultante de la suma de estas tres se llama variable manipulada y no se aplica directamente sobre el actuador, sino que debe ser transformada para ser compatible con los relés.

Las tres componentes de un controlador PID son: parte Proporcional, acción Integral y acción Derivativa.

El primer bloque de control (proporcional) consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional, quedando un error en estado estacionario casi nulo.

El segundo bloque de control (integral) tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.

El tercer bloque de control (Derivativo) considera la tendencia del error y permite una repercusión rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.

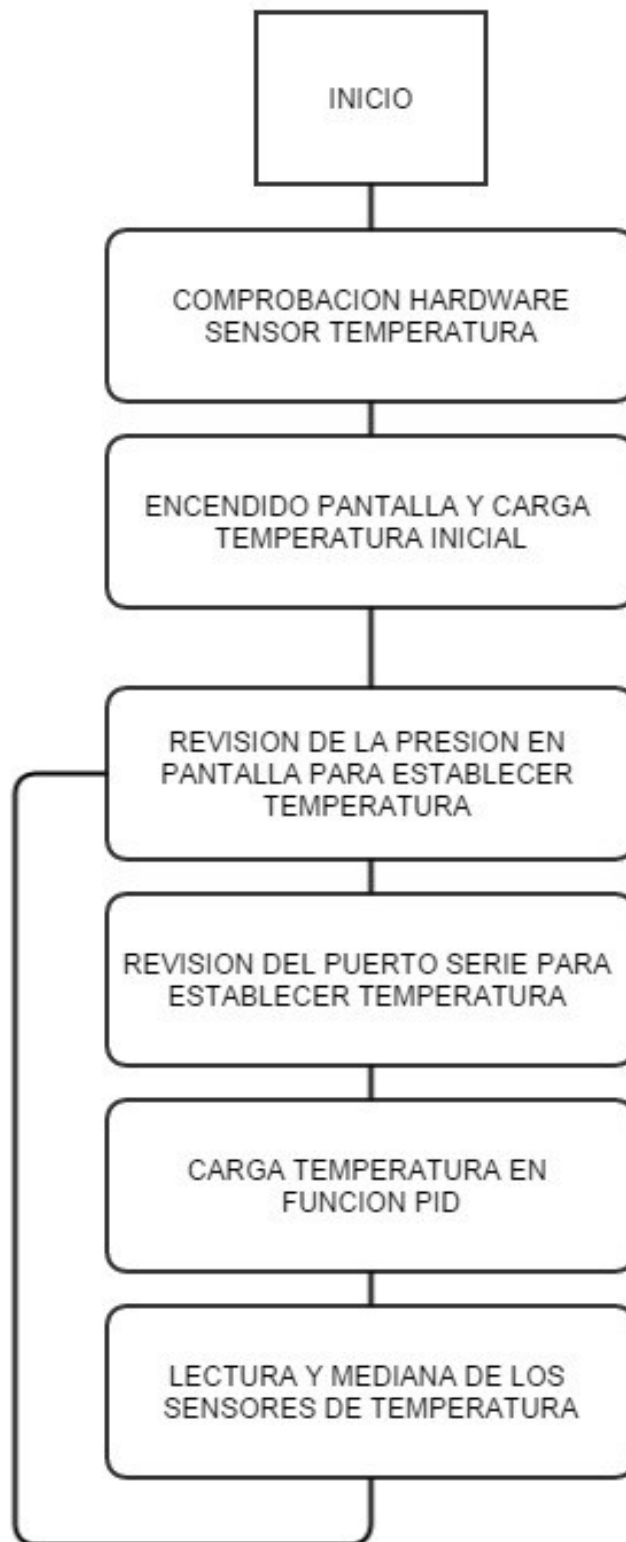
Para reducir el tiempo de desarrollo se usará una biblioteca de ARDUINO que incorpora lo necesario para realizar el controlador PID.

A su vez la pantalla TFT se controla directamente con otra librería, por lo que se facilita mucho la labor de programación.

Para realizar la lectura de los sensores de temperatura se usan las entradas analógicas de la placa de ARDUINO y para definir una medida válida se recurrirá a un bucle de 10 lecturas y la realización de una Mediana de los valores, esto evitará posibles errores y sobre todo problemas de ruido.

El sistema contará con un puerto USB que permite el cambio de parámetros y descarga de información, la conexión se hará a 9600bps.

La siguiente imagen muestra el diagrama de flujo del programa:

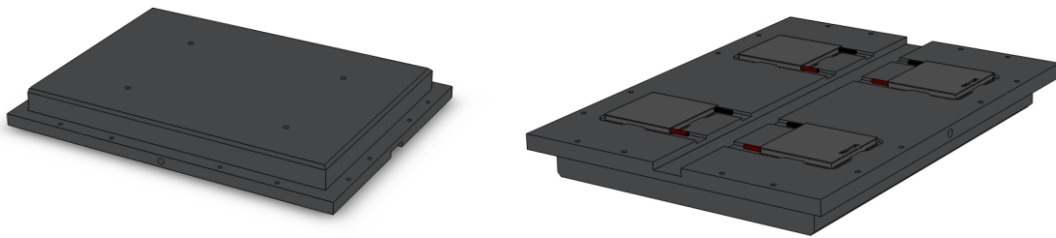


*Ilustración 15. Diagrama de flujo*

### 3.9 Diseño Mecánico

El diseño mecánico se ha efectuado usando un software de diseño 3D. Esto previene errores de construcción a la vez que facilita la visión del sistema de manera previa.

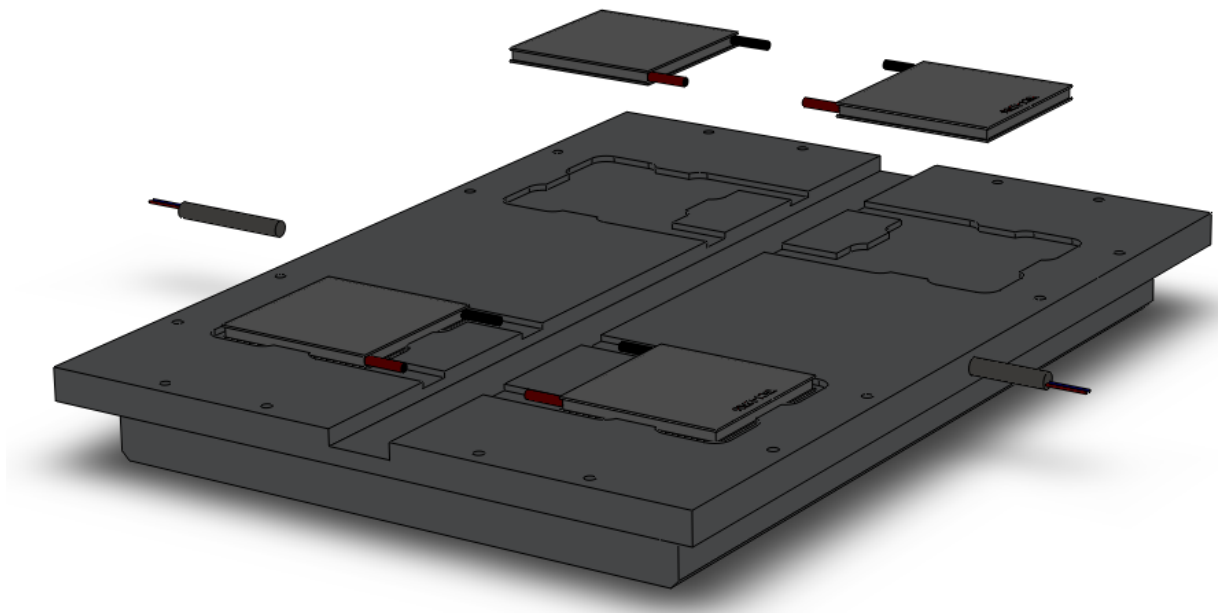
El sistema se basa en una placa base sobre la que se colocan las 4 células PELTIER y que será sobre la que se sitúen los elementos que se deseen testear. La siguiente imagen muestra ambas caras de la placa base.



*Ilustración 16. Placa base*

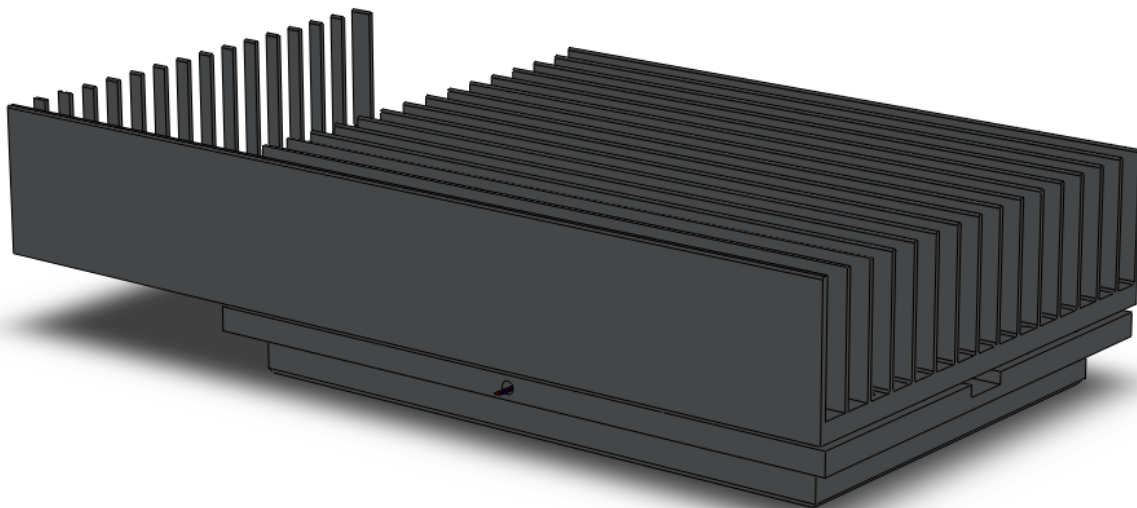
La propia placa base posee unos canales que guían los cables.

Así mismo incorpora dos taladros en los que se fijaran las sondas de temperatura.

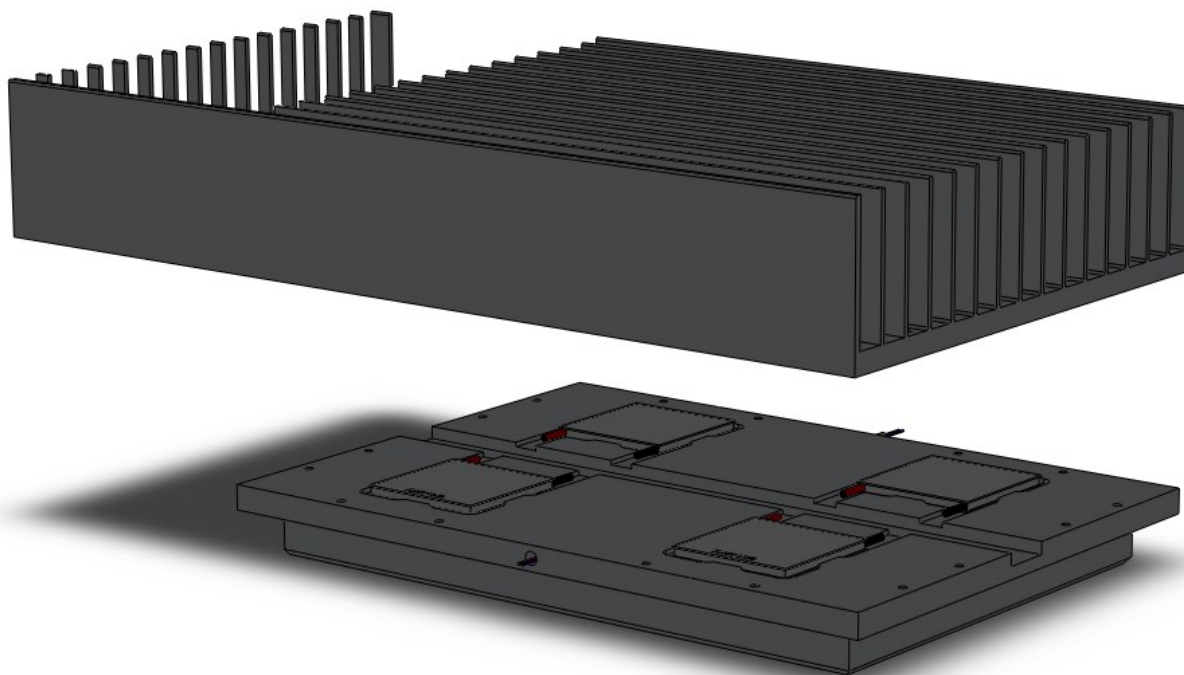


*Ilustración 17. Placa base con células PELTIER y sondas de temperatura*

Posee unas zonas rebajadas en las que se insertan las células PELTIER, estas se encuentran presionadas por la propia placa base por una de sus caras y por el disipador por la otra:



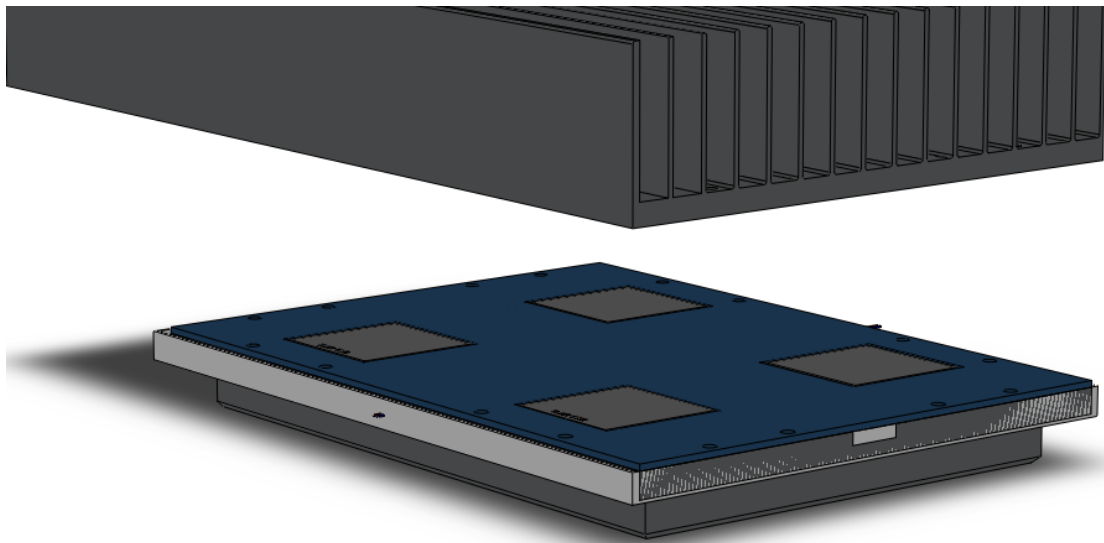
*Ilustración 18. Placa base con disipador*



*Ilustración 19. Placa base con disipador explosionada*

Para que el contacto térmico entre las células PELTIER, la placa base y el disipador sea correcto se ha de realizar la unión con algún material que cubra las pequeñas rugosidades de las diferentes superficies, como por ejemplo pasta térmica HTSP50T de ELECTROLUBE con una constante térmica de 3 W/mK.

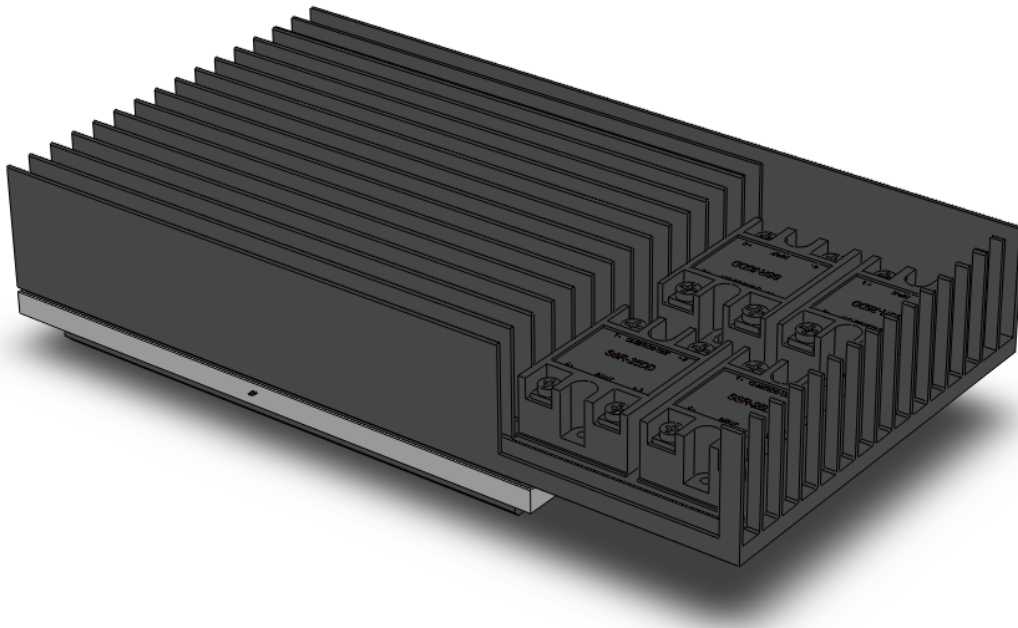
La placa base y el disipador se anclan con una serie de tornillos, y entre ellos, y librando las zonas de las células PELTIER se coloca gomaespuma aislante térmica (un bloqueo de calor) para realizar un bloqueo térmico entre el disipador y la placa base.



*Ilustración 20. Placa base con disipador explosionada y aislante térmico*

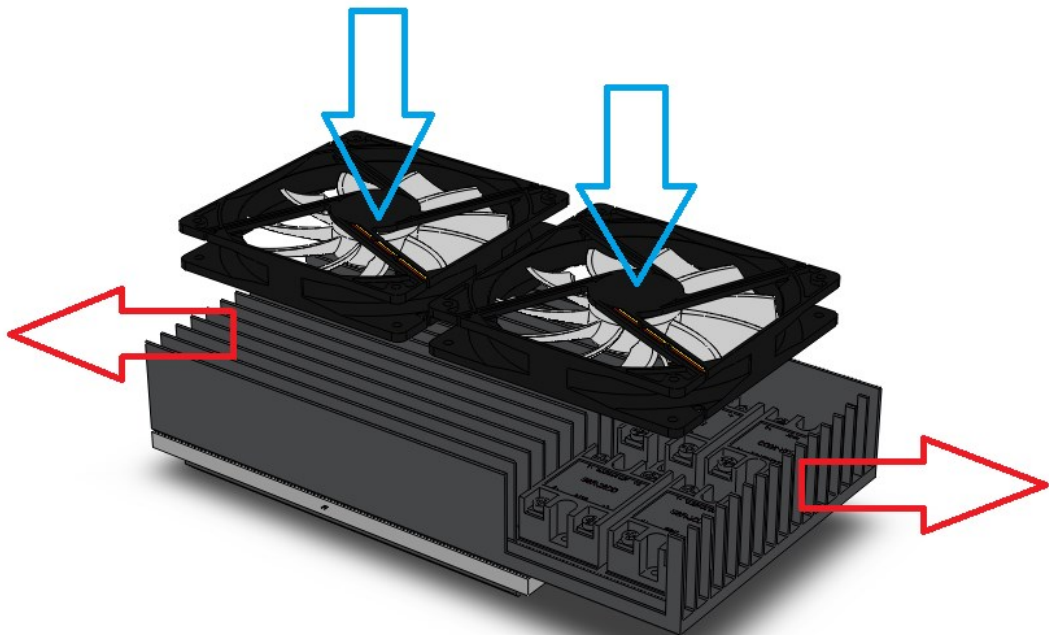
Como se ha indicado el disipador también sirve como soporte para la refrigeración de los relés que se colocan atornillados y con pasta térmica sobre el disipador:





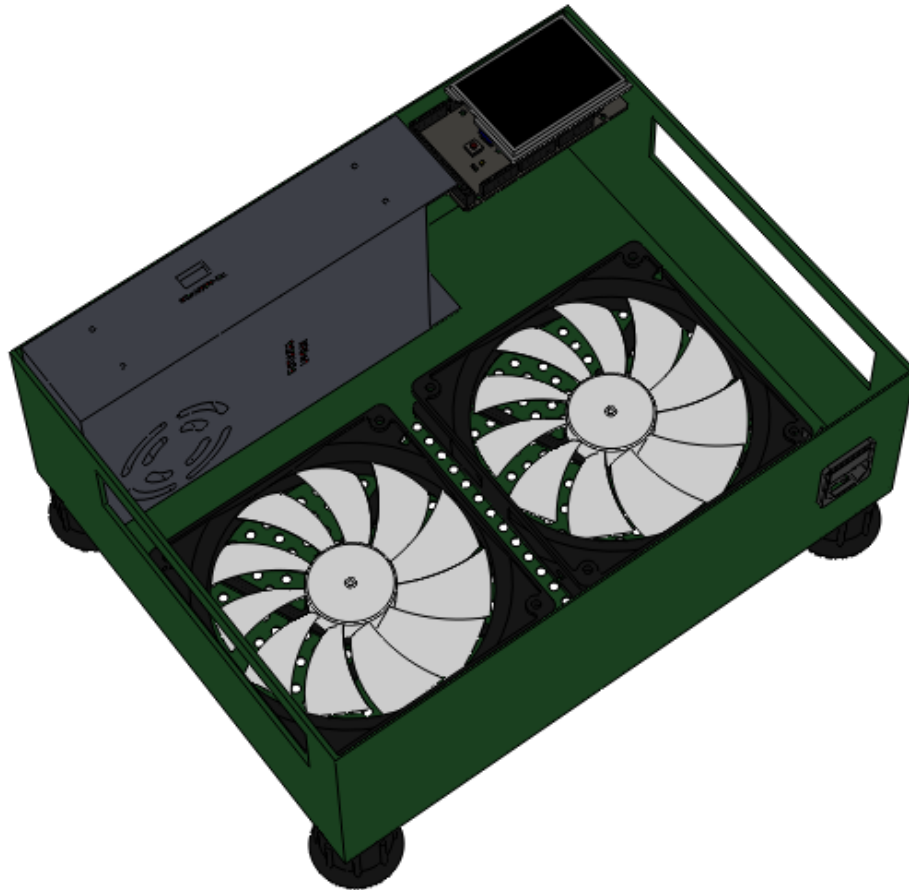
*Ilustración 21. Disipador con relés*

El sistema está concebido de manera que el flujo de aire para enfriar el disipador entre por la parte de abajo y, tras pasar por el disipador, salga por los laterales:



*Ilustración 22. Flujo de aire sobre el disipador*

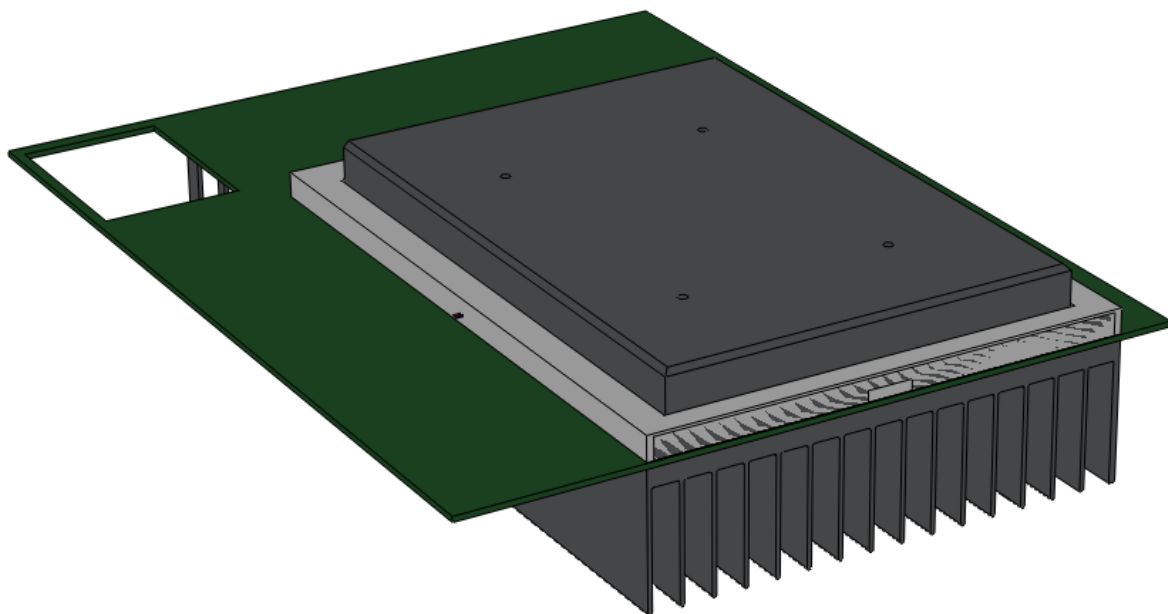
La envolvente externa se agrupa en dos partes, un chasis inferior y una plancha superior. En el chasis inferior se anclan los ventiladores, la fuente de alimentación el conector IEC de entrada de alimentación y el sistema de control:



*Ilustración 23. Chasis inferior*

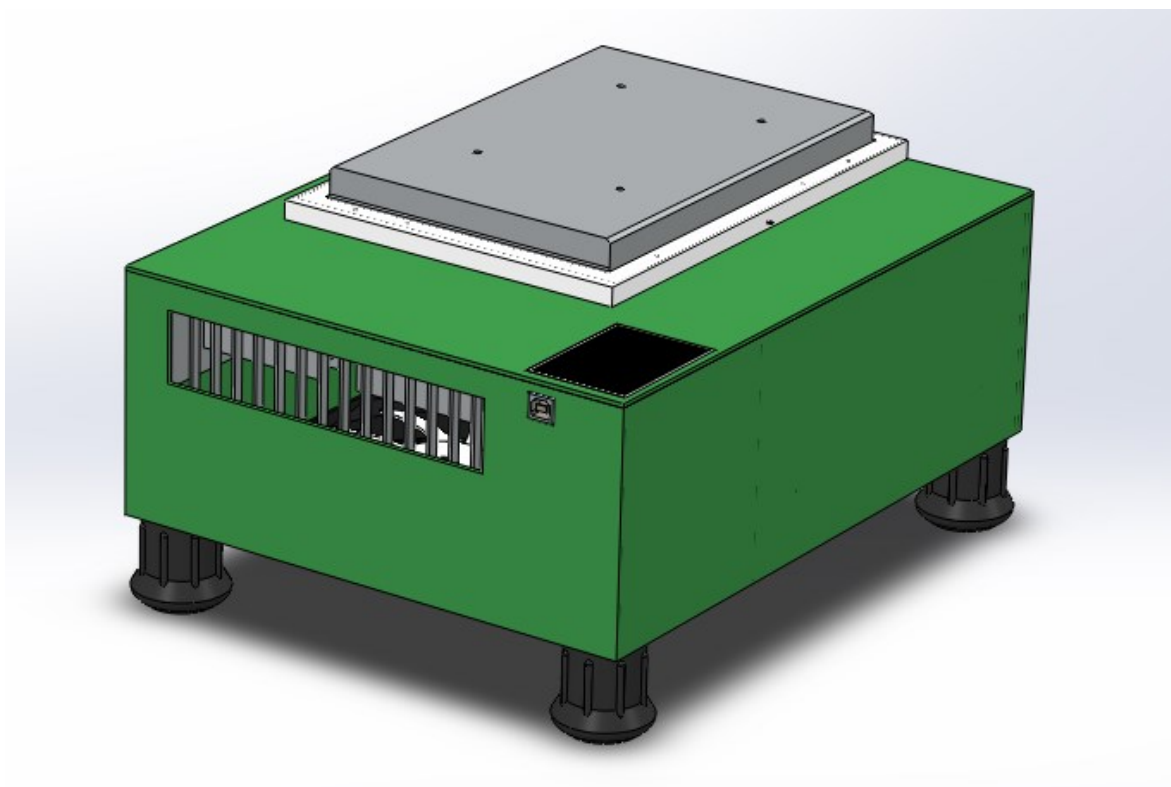
Como se aprecia en la figura anterior, la parte inferior del chasis está perforada para permitir la entrada de aire y tiene también dos aperturas laterales que son por las que saldrá el aire después de su paso por el disipador.

La parte superior del chasis contendrá la placa base más el disipador.

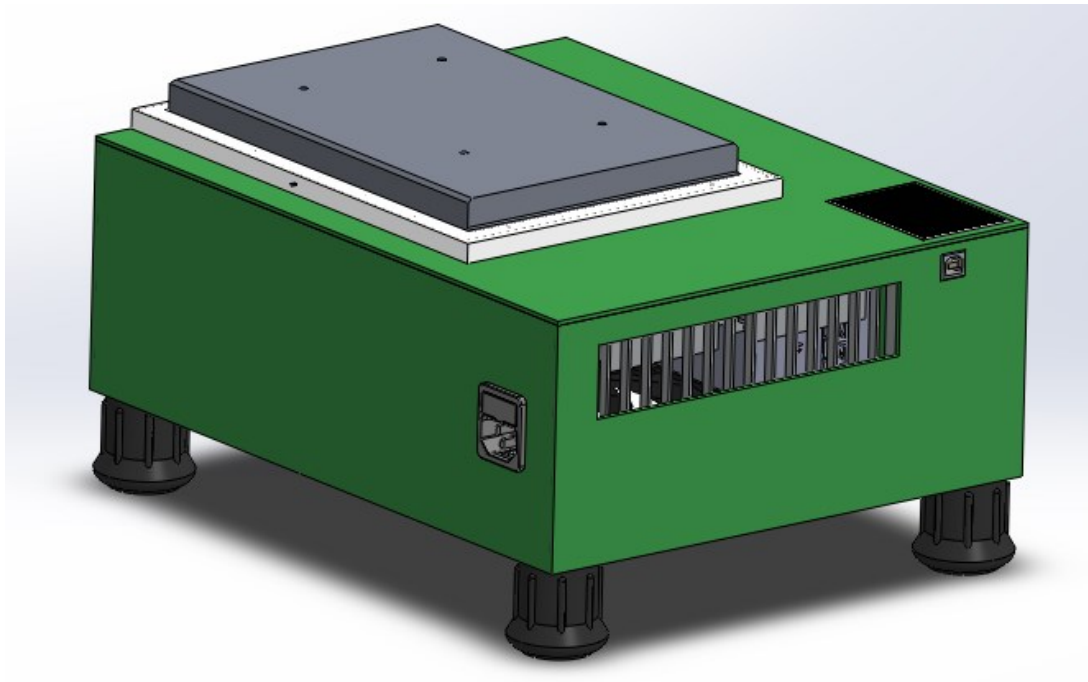


*Ilustración 24. Chasis superior con placa base y disipador*

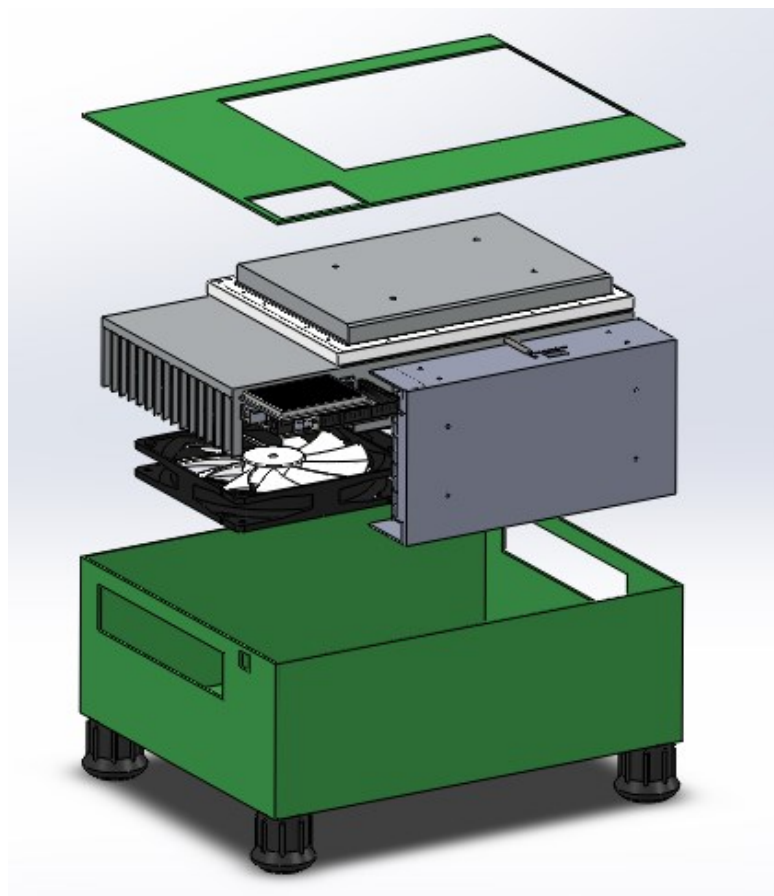
El sistema se sostiene sobre 4 soportes de goma que además tienen la función de levantar la unidad unos 40mm para permitir la entrada de aire por la parte inferior. Las siguientes imágenes muestran el sistema completo ensamblado:



*Ilustración 25. Sistema PELTIER completo*



*Ilustración 26. Sistema PELTIER completo*



*Ilustración 27. Sistema PELTIER completo explosionado*

Las siguientes imágenes contienen un resumen de los planos mecánicos de fabricación:



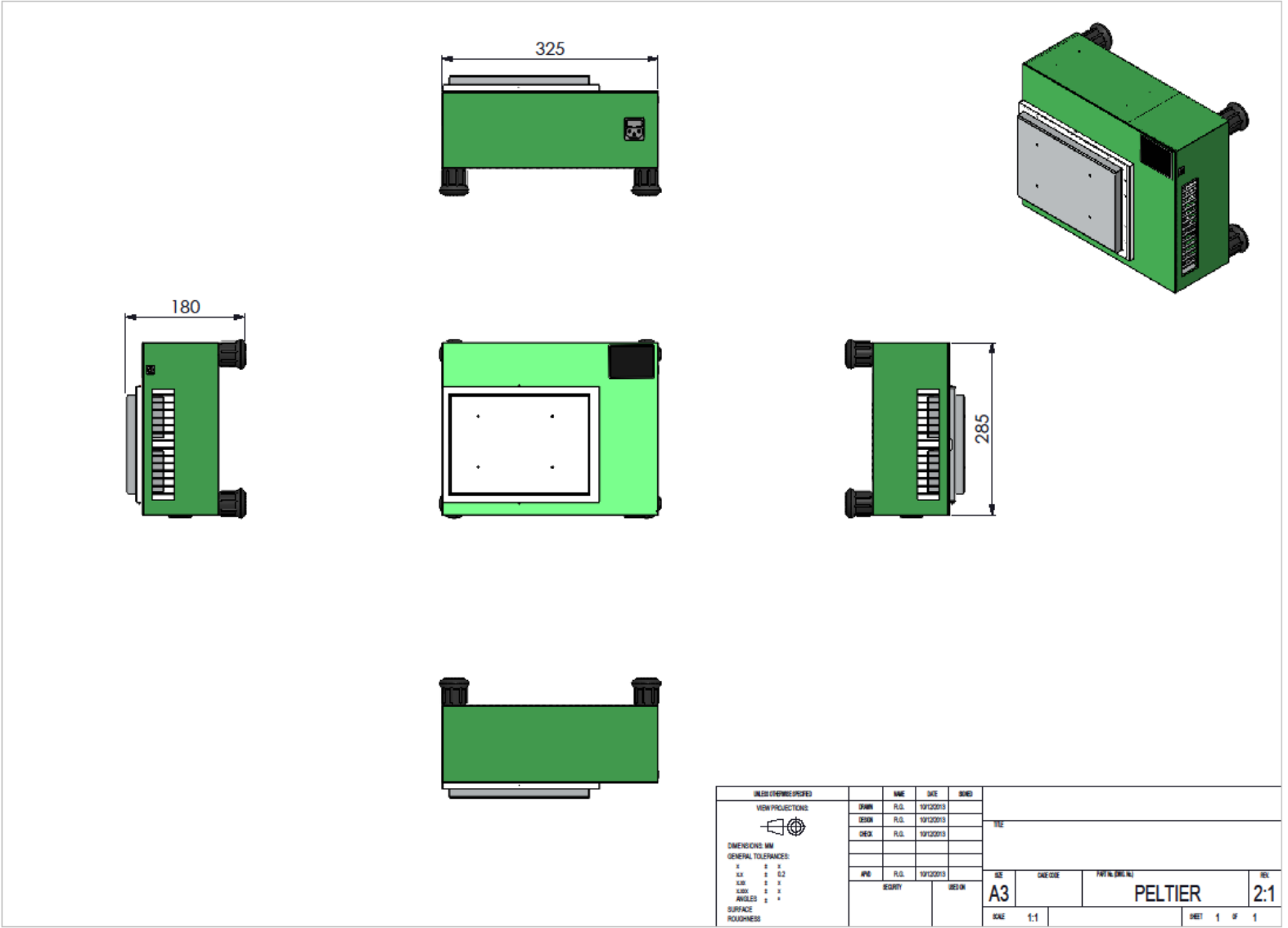


Ilustración 29. Plano sistema PELTIER completo

## 4. PRESUPUESTO

En este apartado se desglosan los componentes del sistema así como los gastos. Estos se dividen en dos partes, por una parte los recurrentes y por otra los no recurrentes.

### 4.1 Gastos recurrentes

Se entienden como gastos recurrentes aquellos que derivan de la producción en serie de las unidades. Estos cálculos de gastos se realizarán para una producción en serie de 25 unidades, para diferentes cantidades el coste de los componentes puede variar.

CONCEPTO	COSTE
4 x Células PELTIER	70 €
4 x Relés	50 €
1 x ARDUINO	30 €
1 x TFT	35 €
1 x Fuente de alimentación	45 €
2 x Ventiladores	15 €
1 x Filtro AC	21 €
4 x Patas soporte	25 €
1 x Placa base mecanizada	38 €
1 x Mecánica inferior chasis pintado	30 €
1 x Mecánica superior chasis pintado	15 €
1 x Pasta térmica	8 €
1 x Junta térmica	3 €
Elementos auxiliares (tornillos, cables, etc.)	3 €
1 hora de mano de obra de montaje + acondicionamiento	45 €
1/2 hora de mano de obra de validación	30 €
TOTAL	463 €

*Tabla 7. Gastos recurrentes*

Como vemos de la tabla anterior cada unidad en producción para 25 unidades cuesta 463 €, en estos gastos no se aplican los beneficios ni la gestión del proyecto de producción ni amortizaciones para equipos.

#### **4.2 Gastos no recurrentes**

Como gastos no recurrentes se clasifican los necesarios para realizar tanto el diseño de todos los elementos como la validación y certificación de una unidad. Todo esto lo podemos desglosar en:

CONCEPTO	COSTE
Coste de componentes de 2 unidades prototipo	926 €
40 horas diseño mecánico (60 €/hora)	2400 €
20 horas diseño eléctrico (60 €/hora)	1200 €
40 horas diseño software (60 €/hora)	2400 €
20 horas de verificación de prototipos (60 €/hora)	1200 €
Coste de certificación del equipo (marcado CE, EMI y pruebas de seguridad)	3000 €
<b>TOTAL</b>	<b>11126 €</b>

*Tabla 8. Gastos no recurrentes*

Dichos gastos contienen todo lo necesario para colocar dicho producto en el mercado.

#### **4.3 Precio de venta del sistema**

Teniendo presente los apartados anteriores en posible calcular el coste de venta final del producto.

Suponemos que el 50% del coste no recurrente se va a poder regenerar en otros productos similares (software, disipador, diseño carcasa, etc.) por lo que solo vamos a repercutir en la serie el 50 % de los gastos no recurrentes.



Para establecer correctamente el coste de venta se debería realizar un estudio de mercado para este tipo de dispositivos, aquí simplemente supondremos que el diseño se amortizará durante 5 años con unas ventas de 50uds al año y el beneficio por unidad del 30 %, con esto tenemos:

$$5 \text{ años} \times 50 \frac{\text{uds}}{\text{año}} = 250\text{uds}$$

$$463 \frac{\text{€}}{\text{uds}} \times 250\text{uds} = 115750\text{€}$$

$$50\% \text{ del coste de no recurrente} = \frac{11126}{2} = 5563\text{€}$$

El coste total será, el recurrente + el no recurrente /2 + beneficio:

$$5563\text{€} + 115750\text{€} = 121313\text{€}$$

$$30\% \text{ de } 121313\text{€} = 36393\text{€}$$

$$\text{Coste total} = 157706,9 \text{ €}$$

$$\text{Coste venta por unidad} = 630,82\text{€}$$

## **5. CONCLUSIONES**

Como conclusiones se derivan:

- Se puede crear un sistema de temperatura controlada basado en efecto PELTIER por un coste de desarrollo moderado.
- Muchas de las herramientas que se han usado ya estan creadas (software).
- El coste de producción del sistema es relativamente bajo y puede ser introducido en diversas áreas del mercado.
- El sistema esta libre de mantenimiento comparado con otros sistemas basados en gases y compresores.
- El sistema es menos ruidoso que los sistemas con compresores.

Con el diseño del presente documento es muy sencillo obtener variaciones del sistema que permitan añadir otros usos como por ejemplo el colocar dos placas adyacentes con diferentes temperaturas para poder efectuar experimentos de estrés o caracterizacion de materiales.

Uno de los mejores usos es el de realizar ciclos de temperatura de manera muy simple y someter a los sistemas a test de envejecimiento para poder ofrecer productos más robustos.