



## Trabajo Fin de Máster

Análisis y simulación térmica de un termociclador

Thermal analysis and simulation of a thermocycler

Autor/es

Pedro Bellot Viñas

Director/es

Carlos Miguel Monné Bailo

Titulación del autor

Máster en Ingeniería Industrial

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA. UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

2021



# ANÁLISIS Y SIMULACIÓN TÉRMICA DE UN TERMOCICLADOR

## RESUMEN

Un termociclador, también conocido como máquina PCR, es un equipo empleado en el ámbito de la biología molecular. Permite realizar ciclos térmicos precisos para producir una reacción en cadena de la polimerasa, enzima capaz de replicar ácidos nucleicos, que son cruciales en el proceso de división o replica celular.

El Trabajo de Fin de Máster esta centrado en un termociclador open-source, sobre el que se ha partido el estudio. La idea detrás del trabajo es llegar a comprender por completo el funcionamiento térmico del mismo, comenzando por conocer en más detalle los tipos de termocicladores que existen y cuales son sus principales diferencias. Una vez comprendido su funcionamiento se pretende desarrollar un análisis basado en simulaciones, determinando cuales son los mejores componentes a optimizar, y como optimizarlos. En concreto el trabajo se centrará en el bloque portamuestras, siendo este el componente determinante en el correcto funcionamiento del equipo. El mezclar las simulaciones realizadas por software y las simulaciones con el equipo real da lugar a muchas preguntas y hallazgos en el funcionamiento del equipo. Estas preguntas son una componente clave del trabajo, pues se plantea su aprovechamiento para un posible desarrollo práctico en la universidad.

# ÍNDICE

<b>DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>2. ESTUDIO TERMOCICLADOR. COMPONENTES Y SIMULACIONES .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. COMPONENTES CICLO TÉRMICO Y POSIBLES MEJORAS .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.1. Celda Peltier.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2. Sistema de difusión.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.3. Tapa .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.4. Bloque portamuestras .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. CONDICIONES INICIALES DE ENSAYO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3. CASOS SIMULADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.1. Variando la masa del bloque portamuestras .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2. Cambiar material de la pieza .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3. Cambiar disposición de las muestras .....</b>	<b>29</b>
<b>3. ESTUDIO FUNCIONAMIENTO REAL TERMOCICLADOR.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1. FUNCIONAMIENTO REAL CIRCUITO TÉRMICO .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2. ESQUEMA ELÉCTRICO COMPONENTES TÉRMICOS .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3. POTENCIA COMPONENTES TÉRMICOS .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4. COMPARATIVA BLOQUES PORTAMUESTRAS REALES.....</b>	<b>37</b>
<b>4. PUESTO DE PRÁCTICAS.....</b>	<b>41</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>44</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>45</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>46</b>

## DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS

Un termociclador es un equipo utilizado en el campo de la biología molecular, capaz de replicar y multiplicar muestras de ADN a partir de la reacción en cadena de la polimerasa o PCR. Para que el proceso de replica se realice adecuadamente, los ciclos térmicos de los que consiste el proceso de reacción deben ser precisos. El ciclo térmico consiste en etapas de calentamiento y enfriamiento de la muestra de ADN a alta velocidad a las temperaturas requeridas para que se produzcan debidamente las fases de replicación de la cadena.

En este trabajo se pretende analizar el ciclo térmico de un termociclador de partida, su funcionamiento y como ha sido diseñado. Este prototipo permitirá entender como se produce el ciclo térmico, las fases que a las que se somete el ADN, que temperaturas debemos controlar para que se produzca correctamente el ciclo y cuanta energía consume.

En paralelo se analizan independientemente las piezas que conforman el bloque térmico del termociclador y se estudia posibles cambios a realizar para mejorar el equipo, centrándose la atención en el bloque portamuestras, ya que su mejora requiere ser rediseñado, al contrario de lo que sucede con el resto de los componentes, para los cuales es más fácil predecir su mejora.

Se resumen los objetivos principales de este trabajo en el estudio del funcionamiento térmico del termociclador y la propuesta e implantación de posibles mejoras. Para ello:

- Se analiza el proceso de transmisión térmica entre el elemento calefactor (celda Peltier) y el bloque que contiene las muestras.
- Se analizan las posibles mejoras a implementar en el equipo y si la mejora es considerable, será implementada en el equipo.
- Se analiza el funcionamiento del circuito electrónico para entender el funcionamiento real del equipo
- Para finalizar se estudia el consumo eléctrico de estos componentes para conocer su eficiencia de transformación en energía térmica.

Una vez finalizado el estudio se plantea la elaboración de un prototipo para posibles prácticas con alumnos de ingeniería donde se podrá realizar brevemente el mismo estudio del trabajo de forma segura.

# 1. INTRODUCCIÓN

## Qué es el ADN

EL ADN, o ácido desoxirribonucleico, es el material que contiene la información genética de casi todos los organismos. La información se almacena como un código compuesto por las bases químicas adenina, timina, citosina y guanina. Estas bases químicas se emparejan entre sí, en el orden en el que se han redactado, formando unidades llamadas pares de bases. Estos pares de bases, junto a una molécula de azúcar y una de fosfato, forman lo que se conoce como nucleótidos, los cuales están dispuestos en dos hebras largas que forman una espiral de doble hélice (figura 1.1).

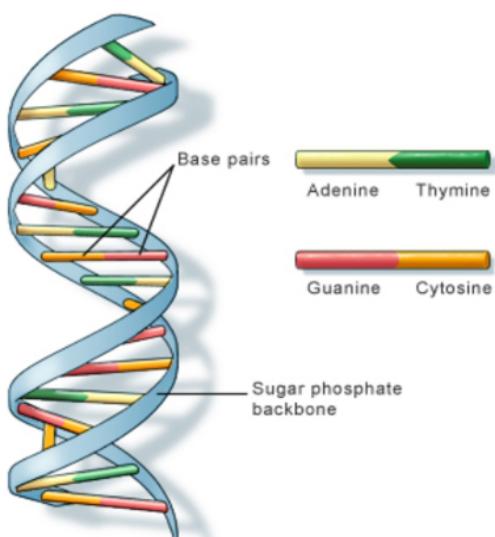


Figura 1 Cadena ADN [1]

La propiedad de mayor interés del ADN es su capacidad de replicarse o hacer copias de si mismo. Cada hebra en la doble hélice sirve como patrón para duplicar la secuencia de bases, siendo algo fundamental ya que las copias de ADN deben ser exactamente iguales.

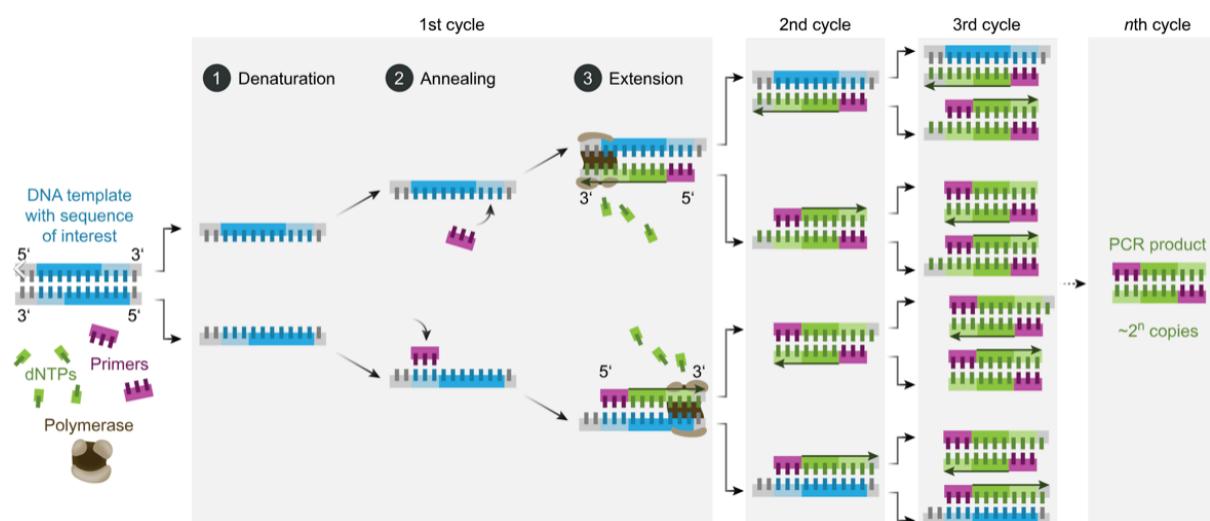
## Cómo se duplica la cadena de ADN

Tras extraer la cadena de ADN se realiza la copia de esta. El proceso de replicación se basa en la duplicación de la información genética y su posterior división. Para ello las dos cadenas de la doble hélice han de separarse para poder formar nuevas cadenas, siendo una de ellas procedente de la molécula madre y la otra que ha sido recién sintetizada. La técnica de replicación del ADN es la técnica de la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR).[2] [3]

## Qué es la prueba PCR

La reacción en cadena de la polimerasa es una de las técnicas más importantes y revolucionarias en la biología molecular. Esta técnica permite obtener *in vitro* millones de copias de un fragmento de ADN a partir de una sola molécula. La técnica emplea ciclos de altas y bajas temperaturas de manera alternada para estimular las enzimas que intervienen en el proceso, separar las hebras y formar las nuevas cadenas.

La PCR consta de tres etapas (figura 1.2) una vez la muestra ya ha sido preparada.



- Desnaturalización inicial. La desnaturalización consiste en la separación de la doble hélice por rotura de los puentes de hidrógeno. La temperatura y el tiempo de esta etapa se determinan según las características del ADN y de la ADN polimerasa empleados, siendo por lo general a temperaturas entre 94–96 °C durante 5-10 minutos.
- Etapa intermedia, ciclos sucesivos de PCR, generalmente entre 25-35 ciclos.
  - Desnaturalización: para que se produzca adecuadamente se recomienda las mismas temperaturas que la etapa anterior, durante 30 segundos a 1 minuto.
  - Alineamiento: la temperatura oscila entre 45 y 65 °C, y el tiempo entre 30 segundos y 1 minuto.
  - Extensión (elongación, amplificación o polimerización): se sintetiza la nueva cadena de ADN, para ello debe realizarse a una temperatura de 72 °C, el tiempo depende más de la longitud de la cadena a duplicar, siendo generalmente iguales a los procesos anteriores.
- Extensión final. Generalmente se realiza una última extensión durante 5-10 minutos a 72 °C para permitir que la polimerasa termine de sintetizar todos los fragmentos que puedan quedar incompletos.

## Tipos de termocicladores

El termocicador es el equipo empleado para emplear la técnica PCR. Los primeros equipos funcionaban mediante resistencias eléctricas, estos han sido sustituidos en la actualidad por la tecnología Peltier, la cual nos permite calentar y enfriar las muestras con mayor uniformidad y con rampas de temperatura superiores gracias a las propiedades de los semiconductores. Además existen otros métodos menos populares como son los termocicladores que emplean aire caliente distribuyéndolo a través de las muestras que se encuentran suspendidas. Actualmente se están desarrollando también equipos donde la transmisión térmica se produce mediante inducción.

## Análisis de las muestras

Una vez terminados los ciclos de la PCR, las muestras deben ser analizadas. Para ello se suele emplear la técnica de la electroforesis (figura 1.3). Esta técnica se emplea para separar el ADN en base a su tamaño y carga eléctrica.

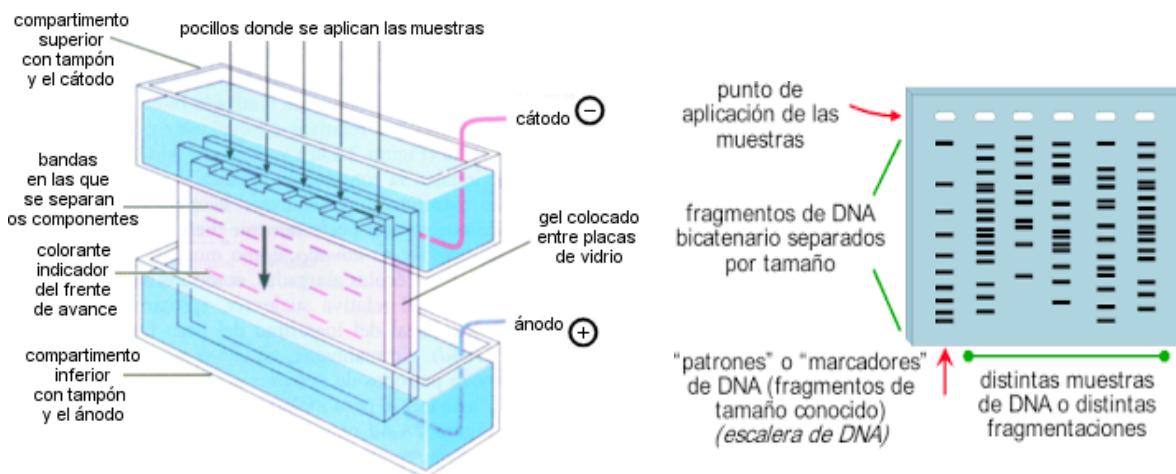


Figura 1.3. Izquierdo: Equipo análisis muestras mediante electroforesis. Derecho: Ejemplo resultados análisis mediante electroforesis. [5]

Se emplea corriente eléctrica para mover las moléculas y que estas se separen, normalmente empleando un gel, los cuales por su porosidad actúan como un colador, permitiendo que las moléculas se desplacen, haciéndolo más rápido cuanto más pequeñas sean estas.

Actualmente se emplea otro tipo de análisis, el cual es capaz de realizarse al mismo tiempo que la PCR, lo cual conlleva un ahorro de tiempo significativo, además del beneficio que supone que todo el proceso lo desarrolle el mismo equipo. Estos equipos se llaman termocicladores en tiempo real. En este análisis se añade un fluoruro, que es excitado por sensores de fluorescencia a las longitudes de onda apropiadas. Esto se realiza al final de cada ciclo, por eso se trata de un análisis inmediato. Conforme aumenta el número de ciclos y se produce la replicación del ADN, la excitación del fluorescente es mayor (figura 1.4).

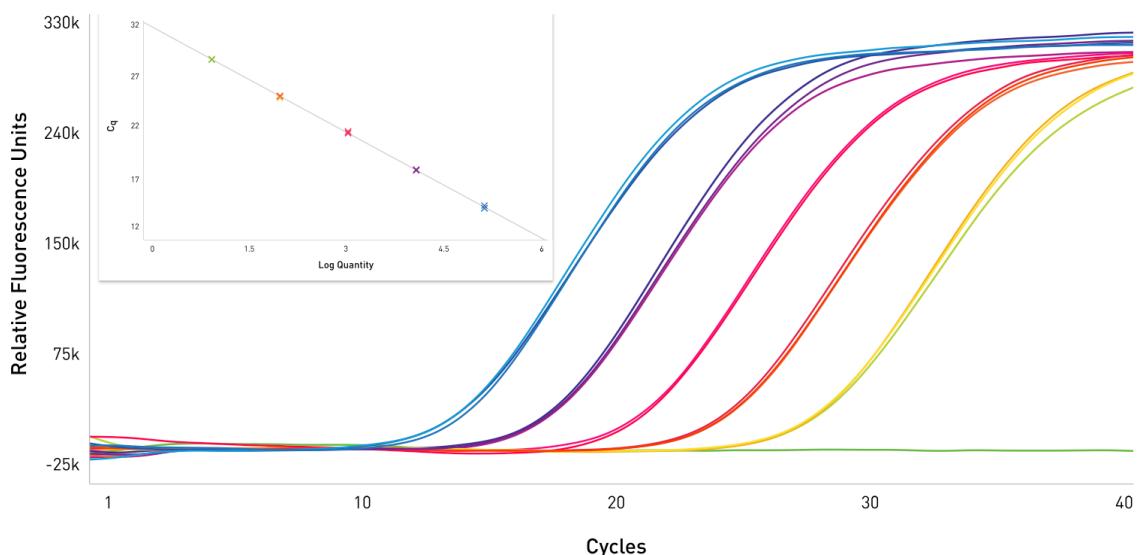


Figura 1.4. Resultados con equipo PCR en tiempo real [6] [7]

### Equipo de estudio en este trabajo

En este trabajo nos centramos en el estudio de un termociclador cuyo funcionamiento térmico emplea la tecnología Peltier. El trabajo no incluirá el realizar un análisis posterior de las muestras, debido a que esta centrado en la capacidad de mejorar el equipo, no en la realización de pruebas con muestras de ADN. El equipo empleado puede observarse en la figura 1.5.



Figura 1.5. Equipo open-source de partida Ninja PCR [8]

## 2. ESTUDIO TERMOCICLADOR. COMPONENTES Y SIMULACIONES

### 2.1. Componentes ciclo térmico y posibles mejoras

A continuación se van a detallar los componentes principales del ciclo térmico en un termociclador.

#### 2.1.1. Celda Peltier

La celda Peltier es el componente principal en lo que se refiere a generación de energía térmica. La celda Peltier (figura 2.1.1) es una bomba de calor activa de estado sólido que transfiere calor de un lado del dispositivo al otro, mediante el consumo de energía eléctrica. Dependiendo de la dirección de la corriente la celda puede emplearse para calefacción o refrigeración, siendo la aplicación principal la refrigeración.

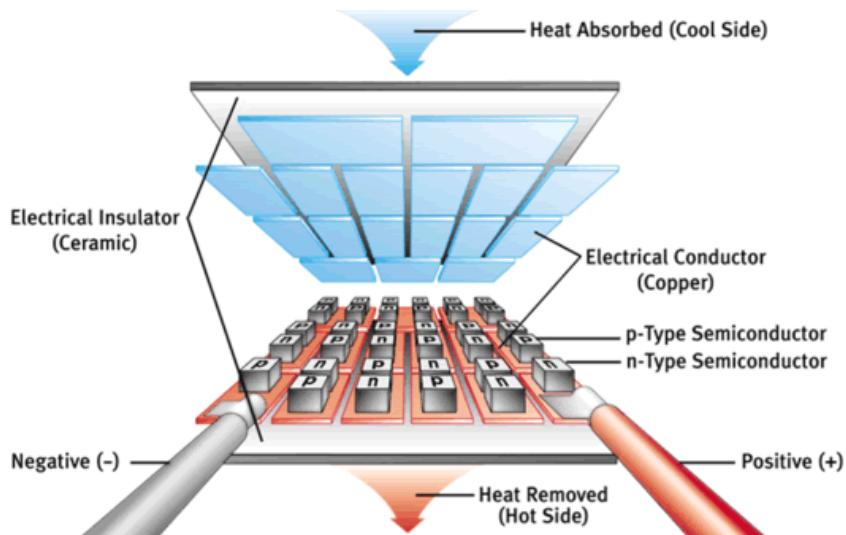


Figura 2.1.1. Esquema Celda Peltier [9]

Las principales ventajas son su reducido tamaño, larga vida útil, no se emplean clorofluorocarbonos y es fácil de controlar mediante el cambio de tensión/corriente. En cuanto a las desventajas de estos equipos, la principal es que el flujo de calor que es capaz de disipar es limitado y son poco eficientes.

Es posible mejorar el circuito térmico del termociclador de estudio escogiendo una celda Peltier que sea capaz de disipar un mayor flujo de calor o colocar celdas en cascada. Un problema a la hora de cambiar la celda es que para que esta disipe más calor deberá consumir más energía, por tanto se tendrá que modificar el circuito eléctrico que controla su funcionamiento. Además se necesitaría cambiar el sistema de difusión, ya que aumentaría el calor a disipar.

La celda empleada en nuestro caso de estudio es el modelo *Hebei TEC1-12710HTS*. No se cambiará la celda Peltier por los inconvenientes que se han mencionado.

### 2.1.2. Sistema de difusión

El sistema de difusión de calor empleado en el termociclador de partida es un difusor de aluminio con ventilación forzada. Este está seleccionado para cumplir con la difusión térmica máxima que puede aportarle la Peltier.

El difusor está dimensionado para evacuar el calor de la celda original. El cambiar el sistema de difusión por otro capaz de disipar más energía sin cambiar nada más no supone ninguna mejora para el termociclador, pudiendo incluso aumentar el consumo si para ello el ventilador debe trabajar a mayor potencia.

Una opción que si pudiese suponer una mejora sería cambiar a un sistema de refrigeración líquida. Estos sistemas proporcionan un mayor rango de funcionamiento como sistema de difusión de calor, y la bomba hidráulica apenas consume energía.

Los principales inconvenientes son el empleo de refrigerante y la aparición de otro componente como es la bomba hidráulica hace que aumente la necesidad de mantenimiento del equipo. En ambos casos se sigue necesitando un ventilador.

En el equipo de estudio la refrigeración se realiza con difusor de aluminio con ventilación forzada, modelo *Scythe monochrome value*. En primera instancia el sistema de difusión tampoco se variará ya que no se espera que proporcione ninguna mejora sustancial.

### 2.1.3. Tapa

La tapa consiste en una resistencia eléctrica de alta densidad térmica ya que deberá ser capaz de elevar la temperatura de la placa de aluminio a la que se adhiere hasta los 110°C, ya que el principal motivo por el que se emplea esta resistencia es para que la tapa de los tubos que contienen las muestras se encuentre a una temperatura superior a la muestra que contienen para evitar que se produzca condensación. Se necesita que la rampa de calentamiento sea elevada.

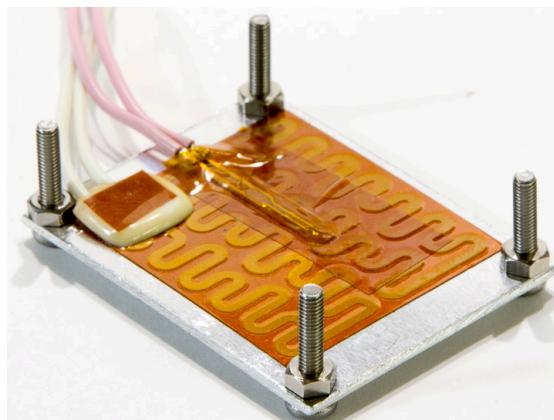


Figura 2.1.2. Resistencia calentador tapa [8]

Este es un elemento que a diferencia de la Peltier, el modificarlo por uno de mayor densidad térmica supone una mejora para el equipo sin tener que modificar nada más.

Dicha mejora es muy pequeña ya que la única rampa de calentamiento para la tapa es la inicial, y para mantener la tapa a 110ºC se debe generar el mismo flujo de calor.

La resistencia empleada es la elaborada por los creadores del equipo de partida. No se va a modificar por que, pese a que supondría una pequeña mejora instantánea, en cuanto a que el ciclo comenzaría unos segundos antes, esta es insignificante en comparación con la duración de un ensayo completo, y encontrar resistencias con una densidad térmica superior es complicado debido al reducido tamaño de estas.

#### 2.1.4. Bloque portamuestras

El bloque ha sido mecanizado en aluminio y diseñado para ser capaz de portar, en este caso, 16 tubos. La celda Peltier proporcionará un flujo de calor que enfriará y calentará dicho bloque. Los bloques comerciales suelen portar hasta 96 tubos.

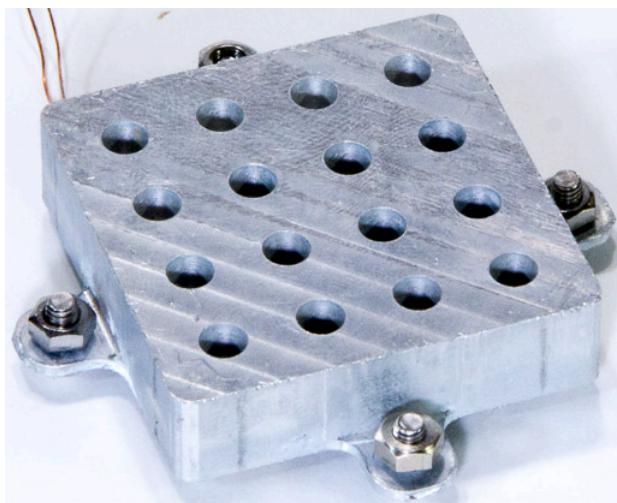


Figura 2.1.3. Bloque portamuestras [8]

Este bloque es el perfecto elemento de estudio en un termociclador, porque de él dependen factores como la rampa de calentamiento de las muestras, el tiempo de ensayo y el consumo energético. Su mejora es crucial para que el sistema sea eficiente, y además hace que la celda y el sistema de difusión funcionen mejor.

La pieza de partida en este trabajo es la que se muestra en la imagen. Se va a estudiar la mejora de este bloque y el mecanizado de las posibles soluciones que presenten mayores mejoras en el funcionamiento térmico del equipo.

## 2.2. Condiciones iniciales de ensayo

A continuación, se van a exponer todas las condiciones generales a las que se someten todos los ensayos realizados en este trabajo. Desde el material de partida de los componentes hasta los flujos térmicos introducidos.

Lo más importante que se debe definir es el propio ciclo térmico que se va a realizar, por tanto, a continuación, se exponen los tiempos de cada etapa y la temperatura a la que se realizan.

Se ha decidido emplear los valores mostrados en la figura 2.2.1. Las simulaciones realizadas solo contemplan el tramo de calentamiento de la desnaturización inicial, siendo este el de mayor calentamiento. Esto se debe a que el computo de la simulación es costoso. Pese a solo simular un tramo, este nos permitirá hacerse una idea del flujo de calor en el bloque, y se extrapolará a todo el ciclo térmico.

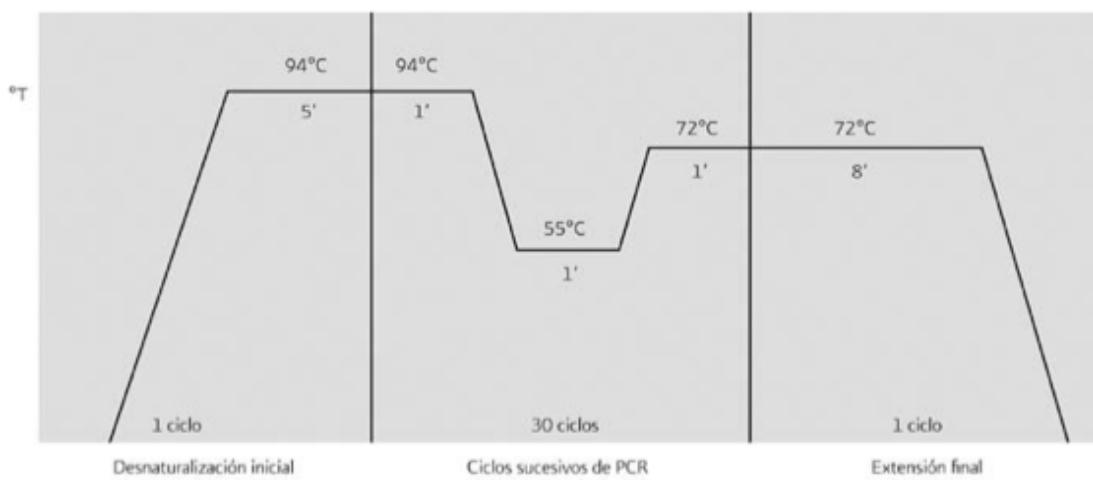


Figura 2.2.1. Curva tiempo-temperatura prueba PCR [3]

Se han generado las piezas y los ensamblajes que van a ser simulados mediante SolidWorks [10]. Después se ha empleado el software de ANSYS [11] Para realizar las simulaciones. Un componente fundamental a definir en las simulaciones son los materiales empleados en el ensamblaje y sus propiedades. A continuación se muestran los materiales empleados inicialmente en el ensamblaje del bloque portamuestras (Tabla 2.2.1).

Propiedades	Aluminio A6063 T5	Plástico Polipropileno PP	Aqua	Aire
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2713,0	903,4	998,2	1,225
Módulo de Young (Pa)	6,904 e <sup>10</sup>	1,461 e <sup>9</sup>		
Conductividad térmica (W/m·°C)	209,0	0,209	0,6	0,0242
Calor específico (J/kg·°C)	915,7	1600,0	4182,0	1006,4
Resistencia a la tracción (Pa)	2,592 e <sup>8</sup>	3,46 e <sup>7</sup>		
Resistencia máxima a la tracción (Pa)	3,131 e <sup>8</sup>	3,762 e <sup>7</sup>		

Tabla 2.2.1. Propiedades de los materiales empleados en las simulaciones iniciales, biblioteca ANSYS [11]

La única modificación que se ha hecho a los materiales es al aluminio para simular las propiedades del aluminio A6063 T5, en concreto se ha modificado la conductividad

térmica. El único de estos materiales que puede variar a lo largo del estudio es el del bloque portamuestras, ya que es el centro de estudio.

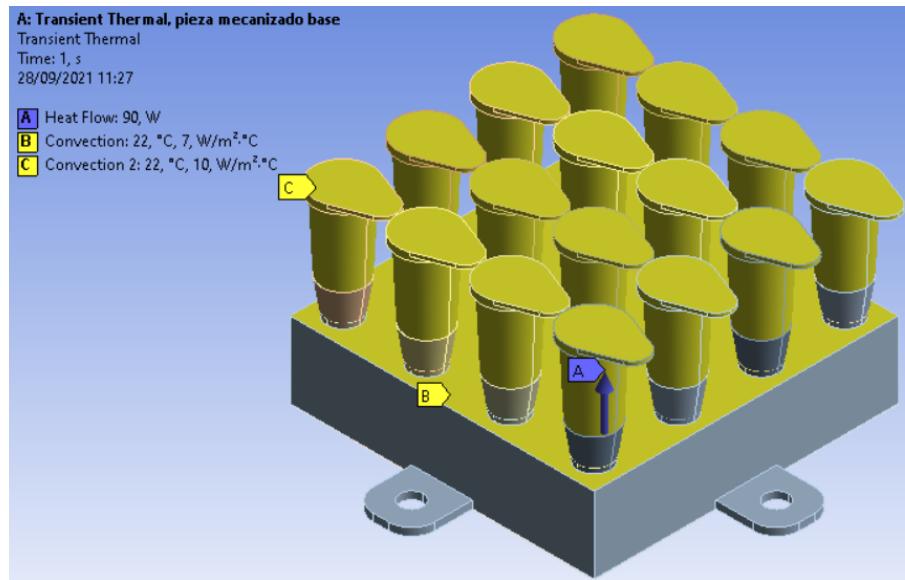


Figura 2.2.2. Ensamblaje bloque portamuestras y tubos simulados

Se introducen tres procesos térmicos en el ensamblaje (figura 2.2.2). El más importante es el flujo térmico, el cual se ha considerado de 90W ya que las características técnicas de la celda Peltier indican que esta puede llegar a proporcionar 100W. Las otras dos cargas térmicas definidas corresponden a las pérdidas por convección del bloque y de los tubos.

En cuanto al mallado, este se ha dimensionado para cada uno de los componentes de manera que estemos próximos al máximo que permite la licencia de ANSYS para estudiantes. Los elementos en los que interesa tener más nudos son las muestras y en el bloque.

## 2.3. Casos simulados

En este apartado del trabajo se procede a evaluar el elemento térmico más importante del termociclador y se plantean posibles escenarios con los que obtener un resultado de calentamiento más eficiente [12]. Las formas en la que se pretende conseguir este objetivo son el variar la masa del bloque, cambiar el material del que esta hecho o cambiando el diseño y la disposición de las muestras.

La pieza de partida consta de un bloque de aluminio de 10mm de altura con 16 taladrados espaciados de 6mm de profundidad para colocar en ellos las muestras.

### 2.3.1. Variando la masa del bloque portamuestras

El principal motivo por el que se propone eliminar material del bloque para mejorar la transmisión térmica se debe a que, cuanto menos material tengamos para calentar o enfriar, más rápido y eficiente será el proceso del termociclador. Se proponen tres procesos para disminuir la masa del bloque portamuestras.

#### 2.3.1.1. *Quitar material dejando cilindros*

En este caso se va a simular el calentamiento del bloque portamuestras cuando la altura mecanizada y la de los cilindros resultantes van aumentando (figura 2.3.1). Los cilindros que quedan tienen un diámetro exterior de 6,2mm para que el espesor del cilindro sea de 1mm.

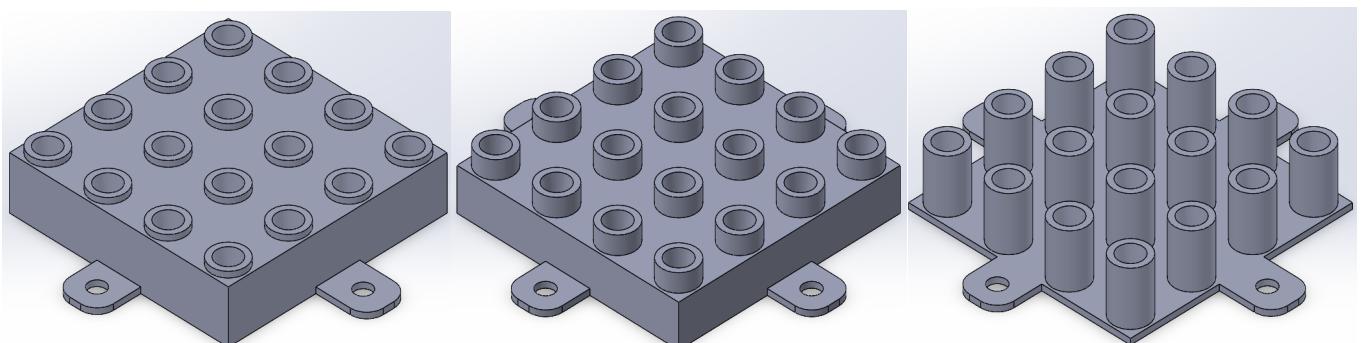


Figura 2.3.1. Izquierda: bloque portamuestras mecanizado 1mm en altura. Centro: bloque mecanizado 3mm en altura. Derecha: bloque mecanizado 9mm en altura.

Se comienza observando la variación de volumen que se produce conforme aumenta la profundidad de mecanizado, al igual que el área de la superficie (figura 2.3.1.1). Estos valores, junto a los de temperatura del bloque portamuestras en los puntos de contacto con los tubos y la temperatura de las muestras dentro de los mismos, proporcionan claridad a la hora de entender el comportamiento térmico del bloque. Las temperaturas se han seleccionado para el instante de tiempo de 50 segundos de simulación, tiempo en el cual el bloque portamuestras ha superado en todos los casos la temperatura de 94°C, correspondiente a la temperatura objetivo para la etapa de desnaturalización inicial.

Versión pieza simulación	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Área superficie (mm <sup>2</sup> )	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 50s (ºC)	T <sup>a</sup> agua a 50s (ºC)
Pieza mecanizado base	15396,1	6138,4	123,7	118,7
Pieza mecanizado 1mm	14279,2	6290,0	130,4	125,0
Pieza mecanizado 2mm	13162,3	6441,6	138,0	132,3
Pieza mecanizado 3mm	12045,3	6593,3	146,7	140,5
Pieza mecanizado 4mm	10928,4	6744,9	156,8	150,2
Pieza mecanizado 5mm	9811,4	6896,6	168,8	161,6
Pieza mecanizado 6mm	8694,5	7048,2	182,9	175,0
Pieza mecanizado 7mm	7577,5	7199,9	200,2	191,6
Pieza mecanizado 8mm	6460,6	7351,5	221,9	212,2
Pieza mecanizado 9mm	5343,6	7503,2	249,2	238,4

Tabla 2.3.1.1. Variaciones de volumen y superficie y como influyen en la temperatura de los casos simulados, caso quitar material en altura, simulación ensamblaje completo

Se observa que el volumen de las piezas disminuye considerablemente conforme aumenta la profundidad de mecanizado. Conforme disminuye el volumen aumenta la temperatura del bloque y de la muestra, como era de esperar. El aumento del área de superficie tiene un efecto negativo para el calentamiento del bloque ya que aumenta el área por la que se produce una convección térmica con el aire en el interior del termociclador. Este efecto, aunque negativo, es muy inferior al de disminución del volumen, por ello no se observa en los resultados obtenidos.

Con la temperatura del bloque portamuestras se puede obtener el aumento de temperatura por segundo y el porcentaje de mejora con respecto al caso de partida. El problema es que el software empleado para la simulación tiene limitaciones en el número de elementos a simular, por tanto se ha simulado primero el ensamblaje completo para obtener una relación de temperaturas entre el bloque y la muestra (tabla 2.3.1.2). Con esa relación podemos simular solo el bloque por separado para mejorar el mallado y agilizar las simulaciones.

Versión pieza simulación	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 50s (ºC)	T <sup>a</sup> agua a 50s (ºC)	k = T <sup>a</sup> bloque / T <sup>a</sup> agua
Pieza mecanizado base	123,7	118,7	1,04
Pieza mecanizado 1mm	130,4	125,0	1,04
Pieza mecanizado 2mm	138,0	132,3	1,04
Pieza mecanizado 3mm	146,7	140,5	1,04
Pieza mecanizado 4mm	156,8	150,2	1,04
Pieza mecanizado 5mm	168,8	161,6	1,04
Pieza mecanizado 6mm	182,9	175,0	1,04
Pieza mecanizado 7mm	200,2	191,6	1,05
Pieza mecanizado 8mm	221,9	212,2	1,05
Pieza mecanizado 9mm	249,2	238,4	1,05

Tabla 2.3.1.2. Relación temperaturas entre bloque y muestra, caso quitar material en altura

Se ha calculado el coeficiente que relaciona la temperatura del bloque en contacto con el tubo con la temperatura de la muestra para estimar la temperatura de la muestra para la simulación del bloque individual.

Versión pieza simulación	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 50s (°C)	k = T <sup>a</sup> bloque / T <sup>a</sup> agua	T <sup>a</sup> agua a 50s (°C)	°C/s	Mejora (%)
Pieza mecanizado base	137,4	1,04	131,8	2,31	0,0
Pieza mecanizado 1mm	146,1	1,04	140,1	2,48	7,5
Pieza mecanizado 2mm	156,2	1,04	149,7	2,68	16,3
Pieza mecanizado 3mm	168,0	1,04	161,0	2,92	26,5
Pieza mecanizado 4mm	182,1	1,04	174,4	3,20	38,8
Pieza mecanizado 5mm	199,3	1,04	190,8	3,55	53,6
Pieza mecanizado 6mm	220,5	1,04	211,1	3,97	72,0
Pieza mecanizado 7mm	247,6	1,05	236,9	4,51	95,5
Pieza mecanizado 8mm	283,3	1,05	271,0	5,23	126,4
Pieza mecanizado 9mm	331,8	1,05	317,3	6,20	168,4

Tabla 2.3.1.3. Mejora rampa calentamiento casos simulados respecto a la pieza inicial, simulación solo bloque, caso quitar material en altura

Se observa en la tabla 2.3.1.3 que la mejora que se produce en cada uno de los casos es considerable, llegando a ser muy sustancial para los casos de mayor mecanizado, llegando a superar el 100% de mejora a partir del caso mecanizar 8mm en altura del bloque. Dicha mejora corresponde a la eficiencia térmica. Otra mejora de interés es sobre la duración de un ensayo con el termociclador.

Para calcular la duración del ensayo correspondiente al ciclo térmico del bloque portamuestras debemos calcular los tiempos de cada una de las rampas de calentamiento/enfriamiento (tabla 2.3.1.4) para cada etapa del ciclo (templado, extensión, desnaturalización). Estos tiempos los vamos a calcular con las pendientes de calentamiento que se muestran en la tabla anterior (tabla 2.3.1.3). No tendremos en cuenta el tiempo de mantenimiento de temperaturas en cada una de las etapas ya que este es invariante.

Versión pieza simulación	Desnaturalización inicial (s)	Templado (s)	Extensión (s)	Desnaturalización (s)	Extensión final (s)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado base	31,2	16,9	7,4	9,5	21,7	1066,7	0,0
Pieza mecanizado 1mm	29,0	15,7	6,8	8,9	20,1	992,0	7,0
Pieza mecanizado 2mm	26,8	14,5	6,3	8,2	18,6	917,5	14,0
Pieza mecanizado 3mm	24,7	13,4	5,8	7,5	17,1	843,2	21,0
Pieza mecanizado 4mm	22,5	12,2	5,3	6,9	15,6	768,8	27,9
Pieza mecanizado 5mm	20,3	11,0	4,8	6,2	14,1	694,4	34,9
Pieza mecanizado 6mm	18,1	9,8	4,3	5,5	12,6	620,0	41,9
Pieza mecanizado 7mm	16,0	8,6	3,8	4,9	11,1	545,6	48,8
Pieza mecanizado 8mm	13,8	7,5	3,3	4,2	9,6	471,1	55,8
Pieza mecanizado 9mm	11,6	6,3	2,7	3,6	8,1	397,4	62,7

Tabla 2.3.1.4. Mejoras de tiempos de calentamiento/enfriamiento en los casos simulados, simulación solo bloque, caso quitar material en altura

La mejora en cuanto a tiempos variables no parece tan sustancial ya que en este caso los valores disminuyen con respecto al caso inicial, pero es prácticamente igual a la eficiencia térmica. Esta mejora será correspondiente a la mejora en consumo energético, ya que es en estos tramos donde el consumo es superior.

Versión pieza simulación	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Tiempo invariante 30 ciclos (s)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado base	1066,7	6180	7246,7	0,0
Pieza mecanizado 1mm	992,0	6180	7172,0	1,0
Pieza mecanizado 2mm	917,5	6180	7097,5	2,1
Pieza mecanizado 3mm	843,2	6180	7023,2	3,1
Pieza mecanizado 4mm	768,8	6180	6948,8	4,1
Pieza mecanizado 5mm	694,4	6180	6874,4	5,1
Pieza mecanizado 6mm	620,0	6180	6800,0	6,2
Pieza mecanizado 7mm	545,6	6180	6725,6	7,2
Pieza mecanizado 8mm	471,1	6180	6651,1	8,2
Pieza mecanizado 9mm	397,4	6180	6577,4	9,2

Tabla 2.3.1.5. Mejora en tiempos de simulación casos simulados, simulación solo bloque, caso quitar material en altura

Si tenemos en cuenta todo el proceso (tabla 2.3.1.5), la mejora temporal no es tan llamativa debido a que la mayor parte del ensayo consiste en mantener la temperatura constante durante un periodo determinado para cada una de las etapas del ciclo.

De estos ensayos se puede concluir que la solución mejora conforme más se mecaniza la pieza. Un aspecto a tener en cuenta, y que no se ve reflejado en los resultados, es que cuanto más mecanizamos la pieza es mas propensa a sufrir deformaciones debidas a los ciclos térmicos a los que se somete, por ello es recomendable dejar una base sin mecanizar para mayor estabilidad mecánica.

### 2.3.1.2. Variar la profundidad de taladrado

En este caso se va a simular el calentamiento del bloque portamuestras variando la profundidad de los huecos taladrados para el posicionamiento de los tubos. El razonamiento detrás de esta idea es, no solo eliminar material, sino acercar las muestras a la celda Peltier.

Las simulaciones para este método parten de dos de las propuestas obtenidas en el caso anterior al quitar material del bloque dejando cilindros. Las soluciones que se han escogido son la pieza mecanizada 9mm en altura, ya que presentaba los mejores resultados en la simulación y la pieza mecanizada 7mm en altura ya que proporcionaba buenos resultados y garantiza mayor estabilidad mecánica.

#### 2.3.1.2.1. Pieza mecanizado 9mm

En este caso se ha decidido poner como condición que el espesor mínimo del cilindro sea de 1mm, para no eliminar demasiado material del cilindro (figura 2.3.2).

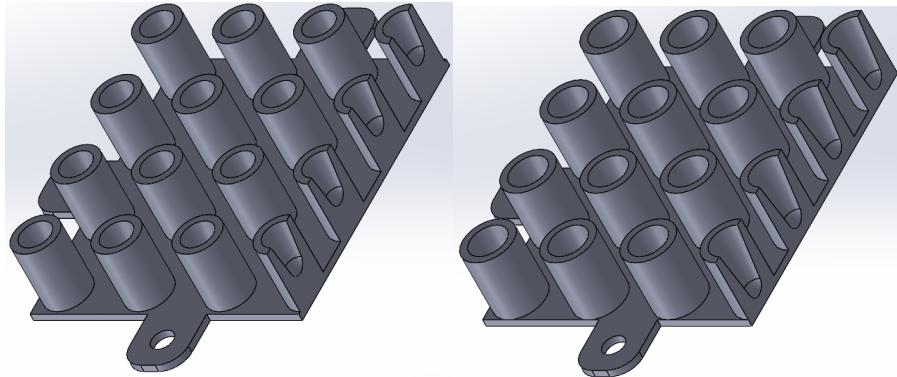


Figura 2.3.2. Izquierda: bloque portamuestras mecanizado 9mm en altura y taladrado de 6mm de profundidad.  
Derecha: bloque mecanizado 9mm en altura y taladrado de 9mm de profundidad

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Área superficial (mm <sup>2</sup> )	T <sub>a</sub> bloque-tubo a 30s (°C)	T <sub>a</sub> agua a 30s (°C)
Pieza mecanizado 9mm	6	5402,14	7501,84	161,78	150,76
	6,5	5504,78	7664,74	158,64	149,27
	7	5604,26	7830,95	155,96	146,87
	7,5	5700,29	8000,49	152,99	144,16
	8	5792,57	8173,34	150,3	141,77
	8,5	5851,36	8341,12	148,11	139,87

Tabla 2.3.1.6. Variación del volumen y superficie casos simulados y como afectan a la temperatura, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 9mm

Se observa en la tabla 2.3.1.6 que la solución no es positiva ya que se esperaba que al aumentar la profundidad los resultados mejorasen. El problema es la condición inicial de que el cilindro tenga un espesor mínimo de 1mm, ya que, al aumentar la profundidad de taladrado, aumentamos el diámetro del cilindro añadiendo así más volumen del que eliminamos con el taladrado.

A continuación se mostrarán los resultados de este estudio en cuanto a la eficiencia del bloque (tablas 2.3.1.7 a 2.1.3.9) siguiendo los mismos procesos de cálculo que para el método anterior. Toda la información relevante que no aparezca en el texto se encuentra en el Anexo 4.

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 30s (°C)	k = T <sup>a</sup> bloque / T <sup>a</sup> agua	T <sup>a</sup> agua a 30s (°C)	°C/s corregido	Mejora (%)
Pieza mecanizado 9mm	6	209,52	1,07	195,25	6,25	0,0
	6,5	206,23	1,06	194,05	6,14	-1,8
	7	203,17	1,06	191,33	6,04	-3,4
	7,5	200,31	1,06	188,75	5,94	-4,9
	8	197,66	1,06	186,44	5,86	-6,3
	8,5	195,96	1,06	185,06	5,80	-7,2

Tabla 2.3.1.7. Mejora rampa calentamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 9mm

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	Desnaturalización inicial (s)	Templado (s)	Extensión (s)	Desnaturalización (s)	Extensión final (s)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 9mm	6	11,5	6,2	2,7	3,5	8,0	393,9	0,0
	6,5	11,7	6,4	2,8	3,6	8,1	400,9	-1,8
	7	11,9	6,5	2,8	3,6	8,3	407,7	-3,5
	7,5	12,1	6,6	2,9	3,7	8,4	414,2	-5,2
	8	12,3	6,7	2,9	3,8	8,5	420,5	-6,8
	8,5	12,4	6,7	2,9	3,8	8,6	424,6	-7,8

Tabla 2.3.1.8. Mejora tiempos calentamiento/enfriamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 9mm

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Tiempo invariante 30 ciclos (s)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 9mm	6	393,9	6180	6573,9	0,0
	6,5	400,9	6180	6580,9	-0,1
	7	407,7	6180	6587,7	-0,2
	7,5	414,2	6180	6594,2	-0,3
	8	420,5	6180	6600,5	-0,4
	8,5	424,6	6180	6604,6	-0,5

Tabla 2.3.1.9. Mejora tiempos de simulación casos simulados, simulación solo bloque, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 9mm

Como se ha mencionado antes, el aumento de volumen empeora los resultados para las simulaciones realizadas, disminuyendo hasta aproximadamente un 7% la eficiencia de transmisión térmica del bloque y un aumento del 8% en el consumo energético y tiempo variable del ensayo, por lo que, para la pieza de mecanizado 9mm es conveniente no realizar cambios en cuanto a la profundidad de taladrado. En cuanto al tiempo global del ensayo no supone una gran diferencia.

### 2.3.1.2.2. Pieza mecanizado 7mm

En este caso se define el diámetro exterior del cilindro constante e igual de 7mm para los casos simulados (figura 2.3.3). Esto se ha hecho para ver como el acercar las muestras si produce mejoras en los resultados si se elimina volumen en la pieza.

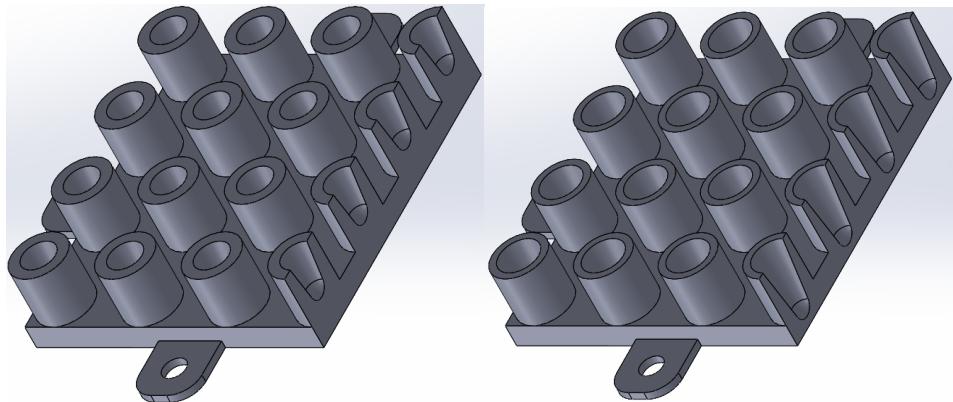


Figura 2.3.3. Izquierda: bloque portamuestras mecanizado 7mm en altura y profundidad de taladrado 6mm.  
Derecha: bloque mecanizado 7mm en altura y profundidad de taladrado 9mm

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Área superficial (mm <sup>2</sup> )	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 30s (°C)	T <sup>a</sup> agua a 30s (°C)
Pieza mecanizado 7mm	6	8495,97	7457,87	122,1	114,16
	6,5	8378,37	7551,14	122,51	115,45
	7	8252,26	7647,73	123,18	120,75
	7,5	8117,34	7747,63	123,66	121,26
	8	7973,3	7850,86	124,31	121,97
	8,5	7819,86	7957,4	124,95	122,73
	9	7656,71	8067,26	125,85	123,75

Tabla 2.3.1.10. Variación del volumen y superficie casos simulados y como afectan a la temperatura, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 7mm

Ahora que se ha solucionado el problema anterior, donde aumentaba el volumen de la pieza conforme aumentaba la profundidad. Al solucionar dicho problema se vuelven a ver resultados positivos (tabla 2.3.1.10).

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 30s (°C)	k = T <sup>a</sup> bloque / T <sup>a</sup> agua	T <sup>a</sup> agua a 30s (°C)	°C/s corregido	Mejora (%)
Pieza mecanizado 7mm	6	144,37	1,07	134,98	4,08	0,0
	6,5	146,06	1,06	137,64	4,14	1,4
	7	147,91	1,02	144,99	4,20	2,9
	7,5	149,99	1,02	147,08	4,27	4,6
	8	152,25	1,02	149,38	4,34	6,4
	8,5	154,75	1,02	152,00	4,43	8,5
	9	157,53	1,02	154,90	4,52	10,8

Tabla 2.3.1.11. Mejora rampa calentamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 9mm

*En cuanto a la eficiencia térmica, la mejora llega hasta casi un 11% con respecto al caso inicial de 6mm de profundidad (tabla 2.1.3.11).*

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	Desnaturalización inicial (s)	Templado (s)	Extensión (s)	Desnaturalización (s)	Extensión final (s)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 7mm	6	17,7	9,6	4,2	5,4	12,3	603,6	0,0
	6,5	17,4	9,4	4,1	5,3	12,1	595,4	1,4
	7	17,2	9,3	4,1	5,2	11,9	586,6	2,8
	7,5	16,9	9,1	4,0	5,2	11,7	577,1	4,4
	8	16,6	9,0	3,9	5,1	11,5	567,1	6,0
	8,5	16,3	8,8	3,8	5,0	11,3	556,4	7,8
	9	15,9	8,6	3,8	4,9	11,1	545,0	9,7

*Tabla 2.3.1.12. Mejora tiempos calentamiento/enfriamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 7mm*

Lo mismo sucede con el consumo energético y el tiempo variable, reduciéndose hasta un 10% aproximadamente para la simulación de una profundidad de taladrado de 9mm (tabla 2.3.1.12).

Versión pieza	Profundidad taladro (mm)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Tiempo invariante 30 ciclos (s)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 7mm	6	603,6	6180	6783,6	0,0
	6,5	595,4	6180	6775,4	0,1
	7	586,6	6180	6766,6	0,3
	7,5	577,1	6180	6757,1	0,4
	8	567,1	6180	6747,1	0,5
	8,5	556,4	6180	6736,4	0,7
	9	545,0	6180	6725,0	0,9

*Tabla 2.3.1.13. Mejora tiempos simulación casos simulados, simulación solo bloque, caso variar profundidad de taladrado. Pieza mecanizado 7mm*

En cuanto al tiempo global del ensayo, las mejoras no suponen un gran cambio (tabla 2.1.3.13).

Hay que mencionar que pese a que en este ensayo se está produciendo una mejora relativa entre las diferentes profundidades de taladrado, estos resultados no son mejores a los obtenidos en el caso de quitar material dejando cilindros ya que, en ese caso los cilindros tenían un diámetro exterior inferior, por lo que el volumen de la pieza es menor que para estos casos. Por lo que realmente, a nivel global de estudio, no se produce ninguna mejora térmica aumentando la profundidad de taladrado.

### 2.3.1.3. Variar la altura de la pieza

En este caso se va a simular el calentamiento del bloque portamuestras variando la altura de la pieza. El objetivo es el mismo que el de aumentar la profundidad de taladrado, siendo este el acercar las muestras a la celda Peltier. La ventaja que se espera observar en esta situación es que el disminuir la altura elimina mucho más material que el taladrado, por lo que se espera una mejora en el ciclo térmico más sustancial. Además, también reduce el tiempo de mecanizado al poder partir de un bloque de menor altura.

Las simulaciones para este método son las mismas que el caso anterior, el cual partía de dos de las propuestas obtenidas en el de quitar material del bloque dejando cilindros. Las soluciones que se han escogido son la pieza mecanizada 9mm en altura (figura 2.3.4), ya que presentaba los mejores resultados en la simulación y la pieza mecanizada 7mm en altura (figura 2.3.5) ya que proporcionaba buenos resultados y garantiza mayor estabilidad mecánica.

#### 2.3.1.3.1. Pieza mecanizado 9mm

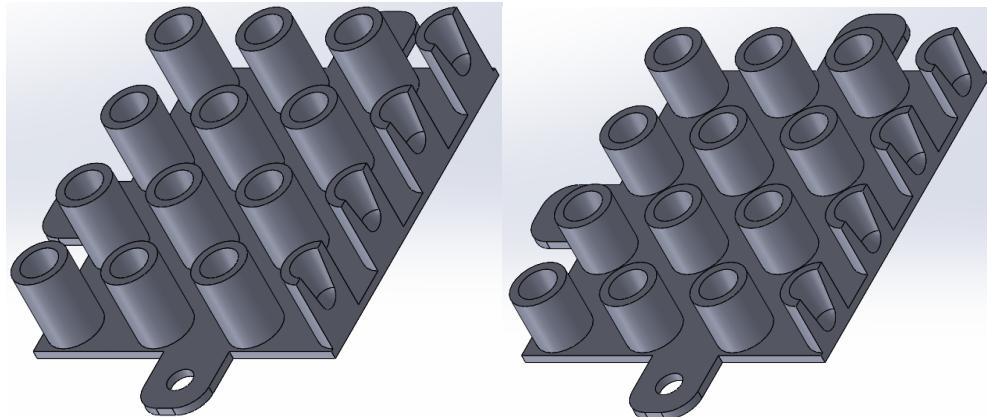


Figura 2.3.4. Izquierda: bloque portamuestras mecanizado 9mm en altura, bloque de 10mm de altura. Derecha: bloque portamuestras de 7,5mm de altura y mecanizado de 6,5mm

Versión pieza	Altura pieza (mm)	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Área superficial (mm <sup>2</sup> )	T <sub>a</sub> bloque-tubo a 30s (°C)	T <sub>a</sub> agua a 30s (°C)
Pieza mecanizado 9mm y profundidad taladro 6mm	10	5402,14	7501,84	161,77	150,83
	9,5	5156,78	7344,78	166,61	155,31
	9	4911,42	7187,73	171,9	160,19
	8,5	4666,06	7030,67	177,43	165,36
	8	4420,71	6873,62	183,43	170,9
	7,5	4175,35	6716,57	189,88	176,91

Tabla 2.3.1.14. Variación de volumen y superficie casos simulados y como afecta a la temperatura, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza. Pieza mecanizado 9mm

Se observa que la solución es positiva como cabía esperar (tabla 2.3.1.14). En este caso las variaciones en la altura de la pieza no pueden resultar en un aumento del volumen como sucedía en el caso de aumentar la profundidad de taladrado. Además, este método no solo disminuye el volumen, sino que también disminuye el área superficial

del bloque, teniendo así menos pérdidas por convección, aunque estas pérdidas no sean notables.

A continuación se mostrarán los resultados de este estudio en cuanto a la eficiencia del bloque siguiendo los mismos procesos de cálculo que para el método anterior. Toda la información se encuentra en el Anexo 4.

Versión pieza	Altura pieza (mm)	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 30s (°C)	k = T <sup>a</sup> bloque / T <sup>a</sup> agua	T <sup>a</sup> agua a 30s (°C)	°C/s corregido	Mejora (%)
Pieza mecanizado 9mm y profundidad taladro 6mm	10	210,2	1,07	195,98	6,27	0,00
	9,5	218,25	1,07	203,45	6,54	4,28
	9	227,85	1,07	212,33	6,86	9,38
	8,5	238,41	1,07	222,19	7,21	14,99
	8	250,07	1,07	232,99	7,60	21,18
	7,5	263,07	1,07	245,10	8,04	28,09

Tabla 2.3.1.15. Mejora rampa calentamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza.  
Pieza mecanizado 9mm

Versión pieza	Altura pieza (mm)	Desnaturalización inicial (s)	Templado (s)	Extensión (s)	Desnaturalización (s)	Extensión final (s)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 9mm y profundidad taladro 6mm	10	11,5	6,2	2,7	3,5	8,0	392,5	0,0
	9,5	11,0	6,0	2,6	3,4	7,6	376,4	4,1
	9	10,5	5,7	2,5	3,2	7,3	358,8	8,6
	8,5	10,0	5,4	2,4	3,0	6,9	341,3	13,0
	8	9,5	5,1	2,2	2,9	6,6	323,8	17,5
	7,5	9,0	4,9	2,1	2,7	6,2	306,4	21,9

Tabla 2.3.1.16. Mejora tiempos calentamiento/enfriamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza. Pieza mecanizado 9mm

Versión pieza	Altura pieza (mm)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Tiempo invariante 30 ciclos (s)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 9mm y profundidad taladro 6mm	392,5	392,5	6180	6572,5	0,0
	376,4	376,4	6180	6556,4	0,2
	358,8	358,8	6180	6538,8	0,5
	341,3	341,3	6180	6521,3	0,8
	323,8	323,8	6180	6503,8	1,0
	306,4	306,4	6180	6486,4	1,3

Tabla 2.3.1.17. Mejora tiempos simulación casos simulados, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza.  
Pieza mecanizado 9mm

La mejora que se consigue en estos casos es muy buena (tablas 2.3.1.25 a 2.3.1.17), siendo esta relativa a la mejora obtenida por quitar material en altura dejando cilindros, por lo que la mejora con respecto a la pieza inicial es mucho mayor.

### 2.3.1.3.2. Pieza mecanizado 7mm

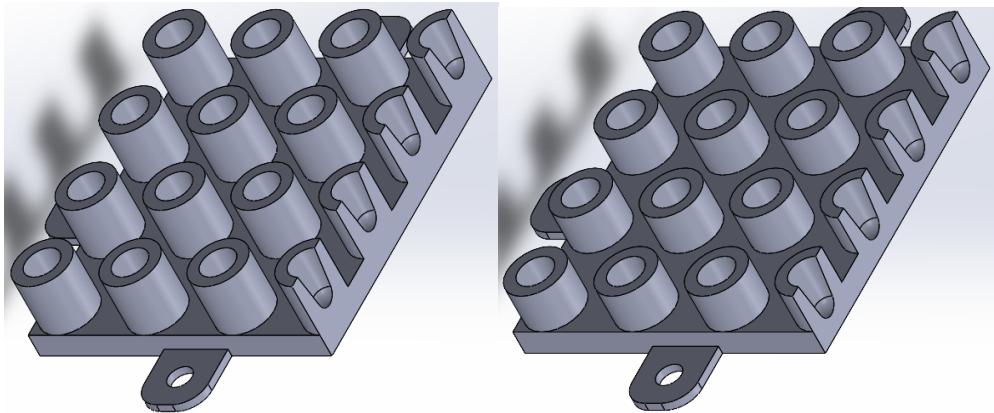


Figura 2.3.5. Izquierda: bloque portamuestras mecanizado 7mm y pieza de 10mm de altura. Derecha: bloque portamuestras de 8mm de altura y mecanizado 5mm

Los resultados obtenidos para esta pieza son iguales, en cuanto a que también se producen mejoras, siendo estas algo menores (tablas 2.3.1.18 a 2.3.1.21).

Versión pieza	Altura pieza (mm)	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Área superficial (mm <sup>2</sup> )	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 30s (°C)	T <sup>a</sup> agua a 30s (°C)
Pieza mecanizado 7mm y profundidad taladro 6mm	10	7567,06	7176,38	131,4	122,56
	9,5	7325,54	7020,56	134,51	125,42
	9	7084,01	6864,74	137,63	128,32
	8,5	6842,49	6708,91	140,91	131,36
	8	6600,96	6553,09	144,38	134,58

Tabla 2.3.1.18. Variación de volumen y superficie casos simulados y como afecta a la temperatura, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza. Pieza mecanizado 7mm

Versión pieza	Altura pieza (mm)	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 30s (°C)	k = T <sup>a</sup> bloque / T <sup>a</sup> agua	T <sup>a</sup> agua a 30s (°C)	°C/s corregido	Mejora (%)
Pieza mecanizado 7mm y profundidad taladro 6mm	10	158,92	1,15	137,91	4,56	0,00
	9,5	163,51	1,15	142,14	4,72	3,35
	9	168,32	1,15	146,78	4,88	6,87
	8,5	173,52	1,14	151,80	5,05	10,66
	8	179,08	1,14	157,21	5,24	14,72

Tabla 2.3.1.19. Mejora rampa calentamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza. Pieza mecanizado 7mm

Versión pieza	Altura pieza (mm)	Desnaturalización inicial (s)	Templado (s)	Extensión (s)	Desnaturalización (s)	Extensión final (s)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 7mm y profundidad taladro 6mm	10	15,8	8,5	3,7	4,8	11,0	539,4	0,0
	9,5	15,3	8,3	3,6	4,7	10,6	521,9	3,2
	9	14,8	8,0	3,5	4,5	10,3	504,8	6,4
	8,5	14,3	7,7	3,4	4,4	9,9	487,5	9,6
	8	13,8	7,4	3,2	4,2	9,5	470,2	12,8

Tabla 2.3.1.20. Mejora tiempos calentamiento/enfriamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza. Pieza mecanizado 7mm

Versión pieza	Altura pieza (mm)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Tiempo invariante 30 ciclos (s)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Pieza mecanizado 7mm y profundidad taladro 6mm	10	539,4	6180	6719,4	0,0
	9,5	521,9	6180	6701,9	0,3
	9	504,8	6180	6684,8	0,5
	8,5	487,5	6180	6667,5	0,8
	8	470,2	6180	6650,2	1,0

Tabla 2.3.1.21. Mejora tiempos simulación casos simulados, simulación solo bloque, caso variar altura de la pieza.

Pieza mecanizado 9mm

#### 2.3.1.4. Resumen resultados variación en masa

Ahora se analizan los resultados obtenidos para las tres mejoras propuestas para el estudio de disminución en masa del bloque portamuestras. Se muestran los resultados para los casos de mecanizado de 9mm y 7mm de altura, siendo el de 7mm el de mayor interés a la hora de fabricar las piezas.

##### 2.3.1.4.1. Pieza con mecanizado de 7mm

Optimización	Versión pieza	ºC/s	Mejora (%)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Mejora (%)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Caso partida	Pieza mecanizado base	2,31	0,00	1066,72	0,00	7246,72	0,00
Quitar material y dejar cilindros	Pieza mecanizado 7mm	4,51	95,50	545,63	48,85	6725,63	7,19
Aumentar profundidad taladrado	Pieza mecanizado 7mm + profundidad 9mm	4,52	95,74	544,97	48,91	6724,97	7,20
Disminuir altura pieza	Pieza mecanizado 7mm + altura pieza 8mm	5,24	126,86	470,21	55,92	6650,21	8,23

Tabla 2.3.1.22. Resumen mejoras casos simulados, simulación solo bloque, caso variación en masa. Pieza mecanizado 7mm

Se observa que, tal y como se había comentado en cada uno de los estudios de optimización, las mejoras con respecto a la pieza de mecanizado base son muy elevadas (tabla 2.3.1.22). Se observa también que la diferencia entre quitar material dejando cilindros y aumentar la profundidad de taladro es prácticamente nula, siendo la única mejora de aumentar la profundidad de taladro que el mecanizado de los cilindros es más rápido al quitar menos material.

Se pretende mecanizar dos bloques, por lo que se decide mecanizar, dados los resultados obtenidos, el caso de disminuir la altura de la pieza. Se eligen esta porque el mecanizado extra es fácil de implementar y la reducción en altura supone un ahorro de tiempo en mecanizado, todo ello aparte de ser la mejor solución obtenida para esta pieza.

#### 2.3.1.4.2. Pieza con mecanizado de 9mm

Optimización	Versión pieza	ºC/s	Mejora (%)	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Mejora (%)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Caso partida	Pieza mecanizado base	2,31	0,00	1066,72	0,00	7246,72	0,00
Quitar material y dejar cilindros	Pieza mecanizado 9mm	6,20	168,41	397,42	62,74	6577,42	9,24
Aumentar profundidad taladrado	Pieza mecanizado 9mm + profundidad 8,5mm	5,80	151,24	424,58	60,20	6604,58	8,86
Disminuir altura pieza	Pieza mecanizado 9mm + altura pieza 7,5mm	8,04	248,17	306,38	71,28	6486,38	10,49

Tabla 2.3.1.23. Resumen mejoras casos simulados, simulación solo bloque, caso variación en masa. Pieza mecanizado 9mm

Los resultados para el mecanizado de 9mm son mucho más atractivos (tabla 2.3.1.23). En este trabajo, por seguridad no se mecanizan estas piezas, aunque dados los resultados sería conveniente analizar la resistencia mecánica, ya que, si pudiesen implementarse estas soluciones, la mejora para las condiciones simuladas sería de casi 250% para el caso de disminuir la altura de la pieza y dejar cilindros.

#### 2.3.2. Cambiar material de la pieza

Se ha decidido que piezas se van a mecanizar desde el punto de vista geométrico, pero falta decidir otra componente igual de importante a la hora de asegurar una buena transmisión térmica para aprovechar todas las mejoras implementadas en el apartado anterior.

El metal que se escoja para las piezas a mecanizar deberá ser buen conductor térmico. Se han simulado distintos materiales con valores de conductividad muy diversos para ver cuales son los mejores (tabla 2.3.2.1).

Propiedades	Acero	Aluminio A6061 T6	Aluminio A6063 T5	Oro	Cobre	Plata
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7850	2713,0	2713,0	19300	8300,0	10500
Módulo de Young (Pa)	2 e <sup>11</sup>	6,904 e <sup>10</sup>	6,904 e <sup>10</sup>	6,904 e <sup>10</sup>	1,1 e <sup>11</sup>	6,904 e <sup>10</sup>
Conductividad térmica (W/m·ºC)	60,5	155,3	209	317,0	401,0	429,0
Calor específico (J/kg·ºC)	434,0	915,7	915,7	128,0	385,0	232,0
Resistencia a la tracción (Pa)	2,5 e <sup>8</sup>	2,592 e <sup>8</sup>	2,592 e <sup>8</sup>	2,592 e <sup>8</sup>	2,8 e <sup>8</sup>	2,592 e <sup>8</sup>
Resistencia máxima a la tracción (Pa)	4,6 e <sup>8</sup>	3,131 e <sup>8</sup>	3,131 e <sup>8</sup>	3,131 e <sup>8</sup>	4,3 e <sup>8</sup>	3,131 e <sup>8</sup>

Tabla 2.3.2.1. Propiedades de materiales ensayados para bloque portamuestras, caso cambiar material de la pieza

**2.3.2.1. Pieza mecanizado 7mm, profundidad taladrado 6mm y altura de la pieza 8mm**

VERSION PIEZA	ALTURA PIEZA (mm)	T bloque-tubo a 30s (°C)	k = Tbloque / Tagua	T agua 30s (°C)	°C/s corregido	mejora (%)
Pieza mecanizado 7mm y altura pieza 8mm	Acero	135,75	1,15	118,04	3,79	-27,58
	6061 T6	178,91	1,15	155,57	5,23	-0,11
	6063 T5	179,08	1,15	155,72	5,24	0,00
	Oro	180,13	1,15	156,63	5,27	0,67
	Cobre	144,75	1,15	125,87	4,09	-21,86
	Plata	182,41	1,15	158,62	5,35	2,12

*Tabla 7 Mejora rampa calentamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso cambiar material de la pieza*

Se esperaba que los materiales con mayores valores de conductividad térmica alcanzasen mayores temperaturas en el mismo intervalo de tiempo, y por consiguiente, tener una rampa de calentamiento mayor (tabla 2.3.2.2). El único resultado que si era de esperar es el del acero. El más sorprendente es el del oro, el cobre y la plata son materiales con mayor conductividad y mucho más caros. Este comportamiento inesperado se debe a que la densidad de estos materiales es mucho mayor, y el calor específico menor, por tanto la transmisión térmica dentro de la pieza es inferior.

Los resultados obtenidos nos permiten concluir que el aluminio es el material del que deberíamos fabricar las piezas, ya que se obtienen buenos resultados y es más económico. Pero, desde un punto de vista experimental, sería interesante mecanizar uno de los bloques en cobre.

Se decide mecanizar la pieza con aluminio 6063 T5, que es el aluminio que tienen en el taller y tiene mejores prestaciones térmicas, y también en cobre para ver si el comportamiento simulado es el real.

### 2.3.3. Cambiar disposición de las muestras

Pese a que ya se hayan decidido las piezas que se van a mecanizar, se considera relevante el estudiar el cambio en diseño del bloque y la disposición de las muestras. No se ha considerado el mecanizar estas piezas ya que conlleva rediseñar el equipo, pero si se obtienen resultados que se deben mencionar.

#### 2.3.3.1. Disposición cilíndrica

La disposición que se ha considerado es colocar las muestras en una configuración circular (figura 2.3.6) y estudiar la variación de inclinación de las muestras y como afecta a la eficiencia del ciclo.

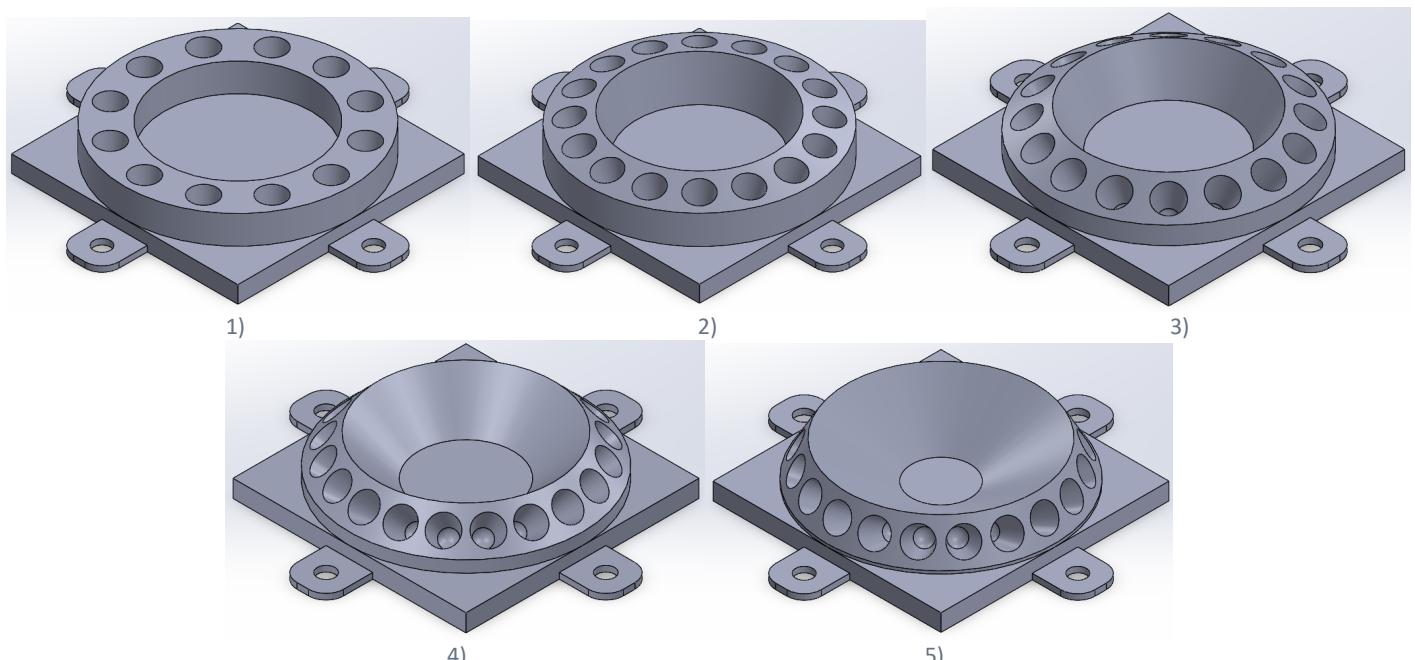


Figura 2.3.6. 1) Bloque portamuestras con disposición cilíndrica y ángulo de inclinación de las muestras de 0º. 2) Bloque con disposición cilíndrica y ángulo de inclinación de 15º. 3) Bloque con disposición cilíndrica y ángulo de inclinación de 30º. 4) Bloque con disposición cilíndrica y ángulo de inclinación de 45º. 5) Bloque con disposición cilíndrica y ángulo de inclinación 60º.

Versión pieza	Inclinación pieza (º)	Nº muestras	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Área superficial (mm <sup>2</sup> )	T <sup>a</sup> bloque-tubo a 30s (ºC)	T <sup>a</sup> agua a 30s (ºC)
Profundidad taladro 7mm y base de espesor 3mm	90	12	7838,11	5974,25	133,68	125,39
	75	16	8734,49	6274,91	120,15	113,1
	60	16	7922,28	5938,56	128,43	121,01
	45	20	7991	6105,38	122,72	115,69
	30	20	8041,72	6000,27	122,32	115,46

Tabla 2.3.3.1. Variación del volumen y superficie en los casos simulados, cosa cambiar disposición de las muestras

Se han realizado 5 simulaciones con inclinaciones distintas y, en este caso, como la geometría no es tan simple como en los casos anteriores, los resultados en volumen y área superficial no presentan correlación entre los distintos bloques ensayados (tabla 2.3.3.1).

Se aprecia una mejora, que se buscaba con esta configuración. Esta mejora es que, para inclinaciones de 45 y 30 grados con respecto a la horizontal, se consigue aumentar el número de muestras a 20.

Versión pieza	Inclinación pieza (º)	Nº muestras	Tº bloque-tubo a 30s (ºC)	k = Tbloque / Tagua	Tº agua a 30s (ºC)	ºC/s corregido	% mejora
Profundidad taladro 7mm y base de espesor 3mm	90	12	155,52	1,07	145,88	4,13	0,00
	75	16	142,09	1,06	133,75	3,73	-9,79
	60	16	154,7	1,06	145,76	4,13	-0,09
	45	20	153,44	1,06	144,65	4,09	-0,99
	30	20	152,75	1,06	144,18	4,07	-1,37

Tabla 2.3.3.2. Mejora en rampa de calentamiento casos simulados, simulación solo bloque, caso cambiar disposición de las muestras

Versión pieza	Inclinación pieza (º)	Nº muestras	desnaturalización inicial (s)	templado (s)	extensión (s)	Desnaturalización (s)	Extensión final (s)	Tiempo variable 30 ciclo (s)	mejora (%)
Profundidad taladro 7mm y base de espesor 3mm	90	12	16,2	8,8	3,8	4,9	11,2	553,2	0,0
	75	16	18,0	9,7	4,2	5,5	12,5	615,0	-11,2
	60	16	16,3	8,8	3,8	5,0	11,3	556,6	-0,6
	45	20	16,4	8,9	3,9	5,0	11,4	561,9	-1,6
	30	20	16,5	8,9	3,9	5,0	11,5	564,9	-2,1

Tabla 2.3.3.3. Mejora en tiempos casos simulados, simulación solo bloque, caso cambiar disposición muestras

Versión pieza	Inclinación pieza (º)	Nº muestras	Tiempo variable 30 ciclos (s)	Tiempo invariante 30 ciclos (s)	Tiempo total 30 ciclos (s)	Mejora (%)
Profundidad taladro 7mm y base de espesor 3mm	90	12	553,2	6180	6733,2	0,0
	75	16	615,0	6180	6795,0	-0,9
	60	16	556,6	6180	6736,6	-0,1
	45	20	561,9	6180	6741,9	-0,1
	30	20	564,9	6180	6744,9	-0,2

Tabla 2.3.3.4. Mejora de tiempo de ensayo casos simulados, simulación solo bloque, caso cambiar disposición muestras

Los resultados (tablas 2.3.3.2 a 2.3.3.4) muestran que la mejor solución para el bloque con muestras en disposición cilíndrica es para una inclinación de 90 grados con respecto a la horizontal. Teniendo en cuenta que los otros resultados son muy similares y que tienen una mayor capacidad de muestras, el mejor resultado sería para una inclinación de 45 grados.

Las piezas han sido desarrolladas para un primer análisis considerando que el método de sujeción no cambiase, pero esto no sería necesario ya que la pieza con esta disposición es mucho más resistente, por tanto hay margen de mejora todavía.

### 3. ESTUDIO FUNCIONAMIENTO REAL TERMOCICLADOR

#### 3.1. Funcionamiento real circuito térmico

Se han realizado simulaciones del bloque portamuestras y estudiado su calentamiento para unas condiciones previamente consideradas como realistas para el funcionamiento del termociclador. En esta parte del trabajo se va a comprobar si dichas suposiciones son correctas. Se emplea la herramienta proporcionada para realizar las simulaciones y se decide simular el siguiente proceso (figura 3.1.1), capaz de darnos una idea del proceso global. Incluye las etapas previa y final y 2 ciclos térmicos. Se usan dos ciclos para que aparezcan todas las rampas del ensayo.

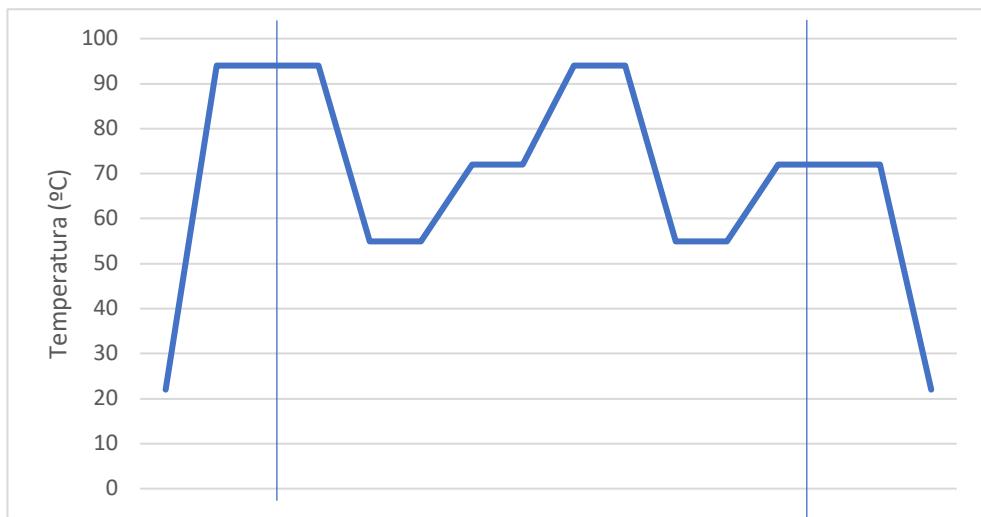


Figura 3.1.1. Curva de temperaturas ciclo de ensayo, etapas inicial y final + 2 ciclos

Una vez realizado el ensayo obtenemos las curvas reales de temperatura de la tapa y del bloque portamuestras (figura 3.1.2).

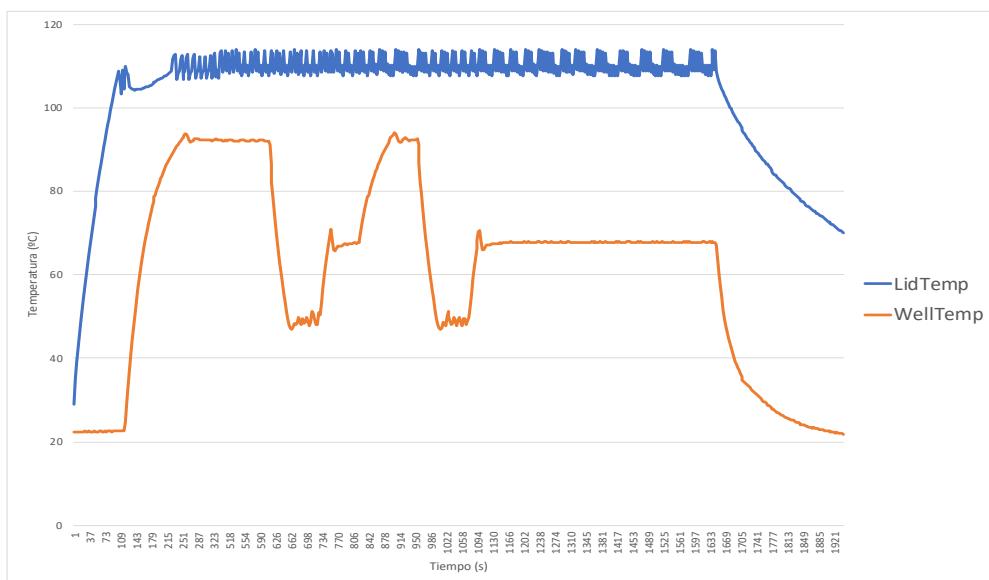


Figura 3.1.2. Curva de temperaturas simulación real, caso bloque inicial

Observamos que no son curvas ideales pero si son como se esperaban, ya que la temperatura que deseamos que sea más controlada es la de la muestra, la cual se supone por aproximación del calentamiento de la tapa y calentamiento del bloque. Los tubos son bastante normalizados y las cantidades de la muestra muy pequeñas así que se puede aproximar con bastante exactitud.

Una cosa que si llama la atención es lo largo que es el proceso. Los tiempos de las rampas no se parecen en nada a los simulados, por lo que se decide comprobar el funcionamiento de la celda Peltier. Para ello empleamos un osciloscopio y medimos la tensión antes y después de la celda (figura 3.1.3).

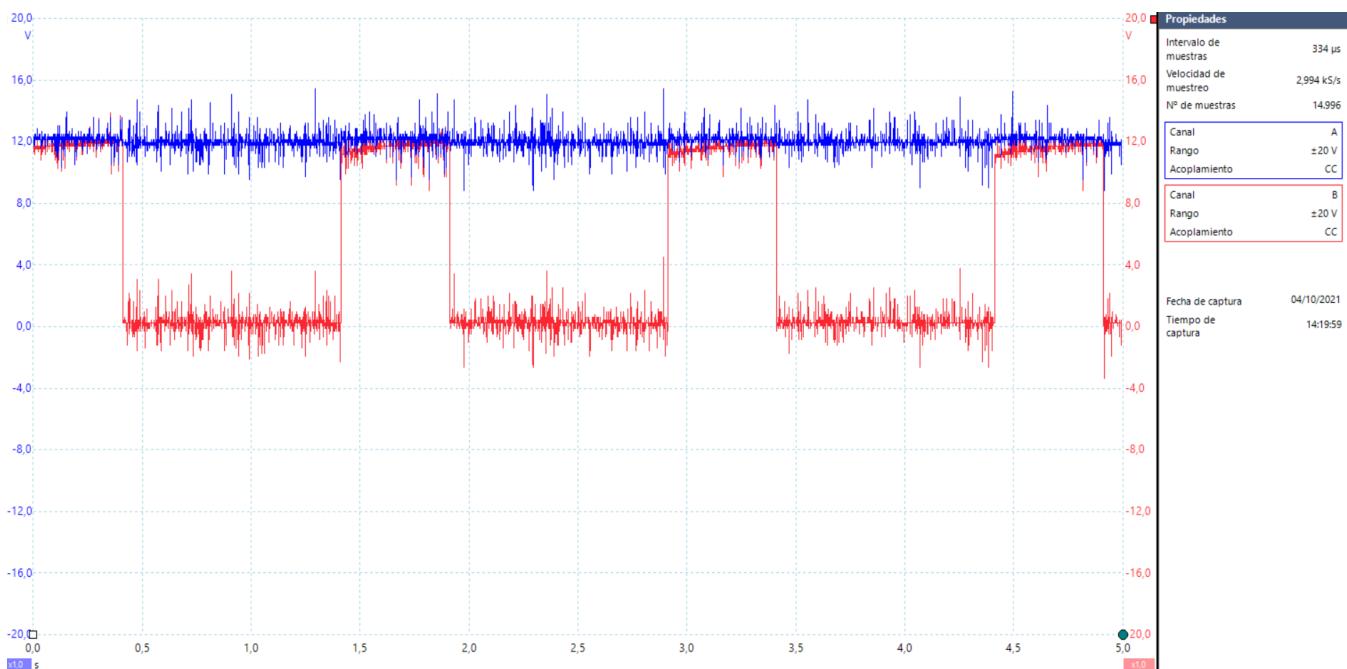


Figura 3.1.3. Mediciones con osciloscopio, caída tensión celda Peltier

Se observa que el comportamiento no es el mismo al supuesto en las simulaciones. En la suposición considerábamos que el flujo de calor era constante durante todo el ensayo. En la realidad observamos que se aplica un control PWM y que solo cae tensión 2/3 del periodo, por lo que es normal que el tiempo de calentamiento/enfriamiento incremente considerablemente en el equipo real

### 3.2. Esquema eléctrico componentes térmicos

Encontramos el esquema de la placa PCB y analizamos el control empleado en los tres equipos principales: el ventilador del sistema de difusión, el calentador de la tapa y la celda Peltier [13].

Comenzamos con el ventilador (figura 3.2.1), el cual desde el momento en el que se enciende comienza a funcionar. El no cambiar de velocidad durante la realización del ensayo ya podía suponerse que no existía un control sobre este equipo.

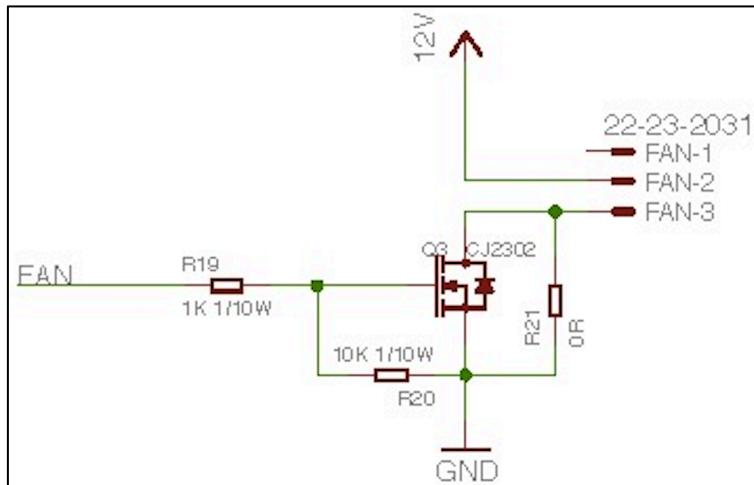


Figura 3.2.1. Esquema eléctrico de control del ventilador

Medimos con el osciloscopio las señal de entrada y los dos pines que se emplean, tal y como se muestra en la figura 3.2.2.

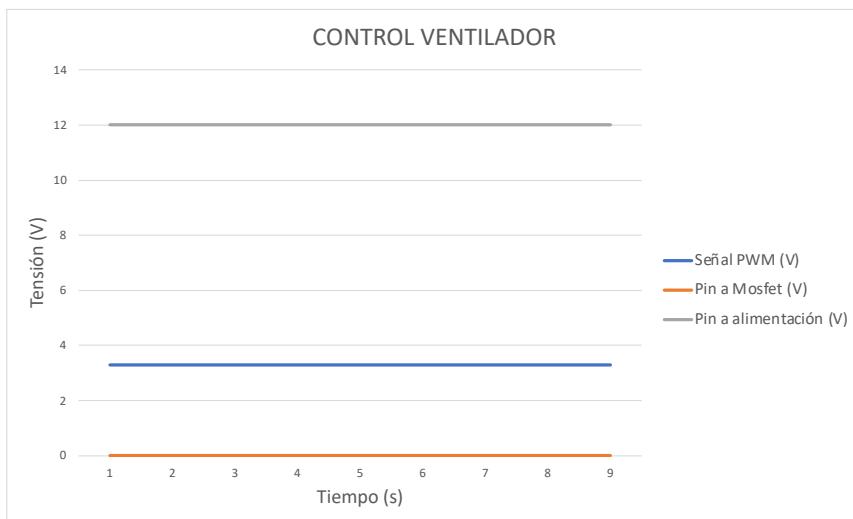


Figura 3.2.2. Representación de tensiones en los pines del transistor Q3, ventilador

Tal y como se esperaba no existe ningún control, ya que la señal que manda el equipo es de 3,3V constante durante todo el ensayo y la cada de tensión en el ventilador es de 12V.

En cuanto al calentador de la tapa (figura 3.2.3) el esquema es igual de sencillo que el del ventilador, pero a diferencia del otro, en este si se emplea un ciclo PWM para el control y consumo del calentador.

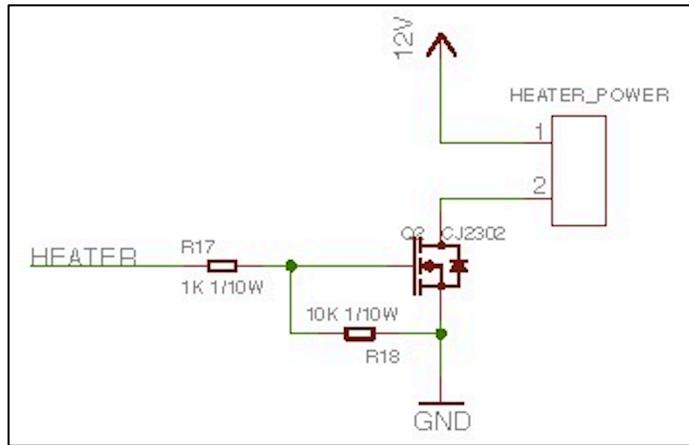


Figura 3.2.3. Esquema eléctrico control calentador tapa

En este caso las tensiones obtenidas para la señal de entrada y los dos terminales del calentador son las siguientes (figura 3.2.4).

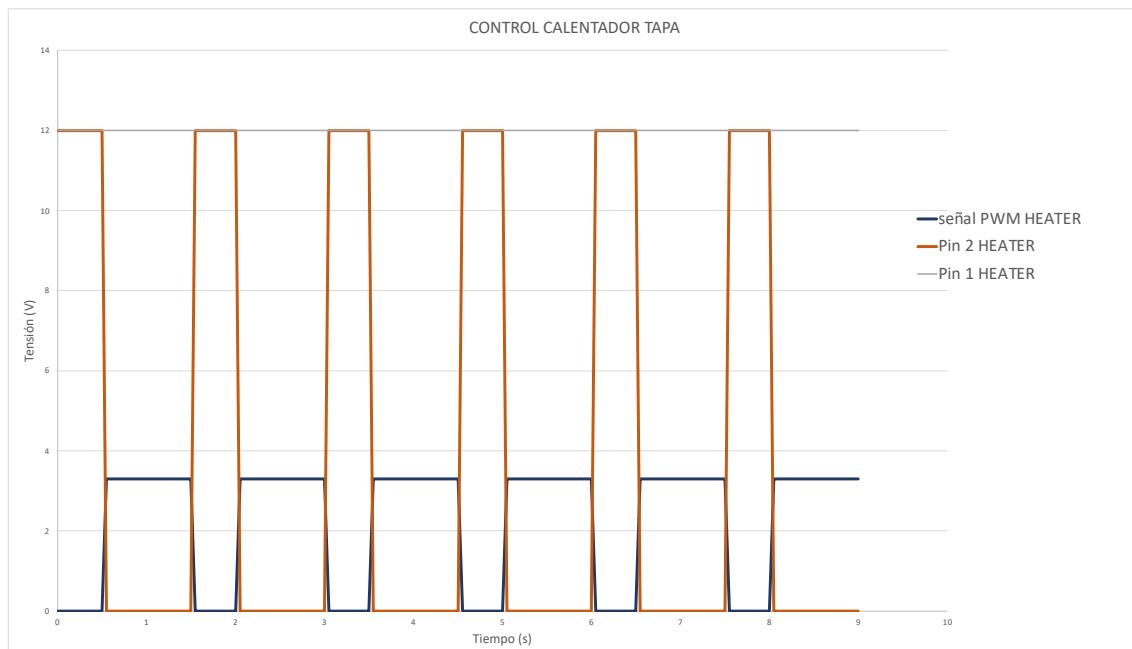


Figura 3.2.4. Representación de tensiones en los pines del transistor Q2, calentador tapa

La señal PWM de entrada controla la actuación del calentador mediante un transistor mosfet que actúa como inversor de la señal de entrada. La caída de tensión en el calentador es de 12V y este está calentando 2/3 del tiempo.

Por último analizamos el circuito de control de la celda Peltier (figura 3.2.5). Este circuito es algo más complejo, pero la idea de funcionamiento es la misma.

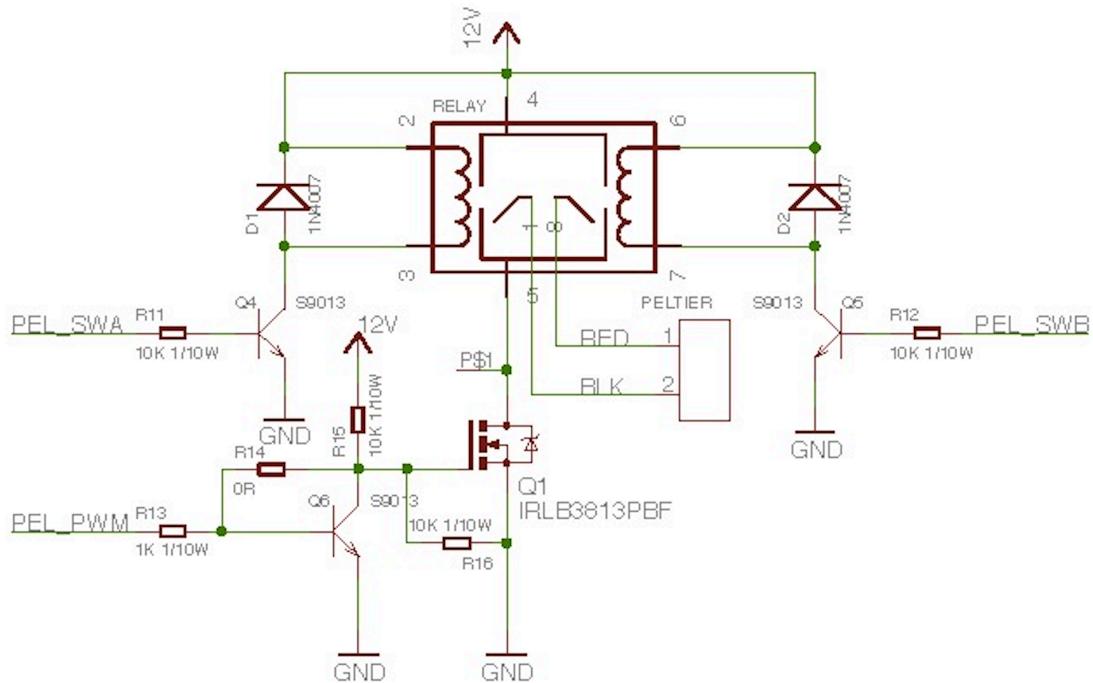


Figura 3.2.5. Esquema eléctrico control celda Peltier

Inicialmente los dos cables de la celda Peltier se encuentran conectados al terminal 4 del relé, el cual esta conectado a la alimentación de 12V. Las señales PEL\_SWA Y PEL\_SWB se emplean para actuar sobre el relé y que conecte uno de los cables de la celda Peltier al terminal 5 del relé, el cual esta conectado al transistor mosfet Q1. El circuito principal de control corresponde a la rama de transistores, la cual recibe la señal de entrada PEL\_PWM.

La representación visual de las señales es la siguiente (figura 3.2.6).

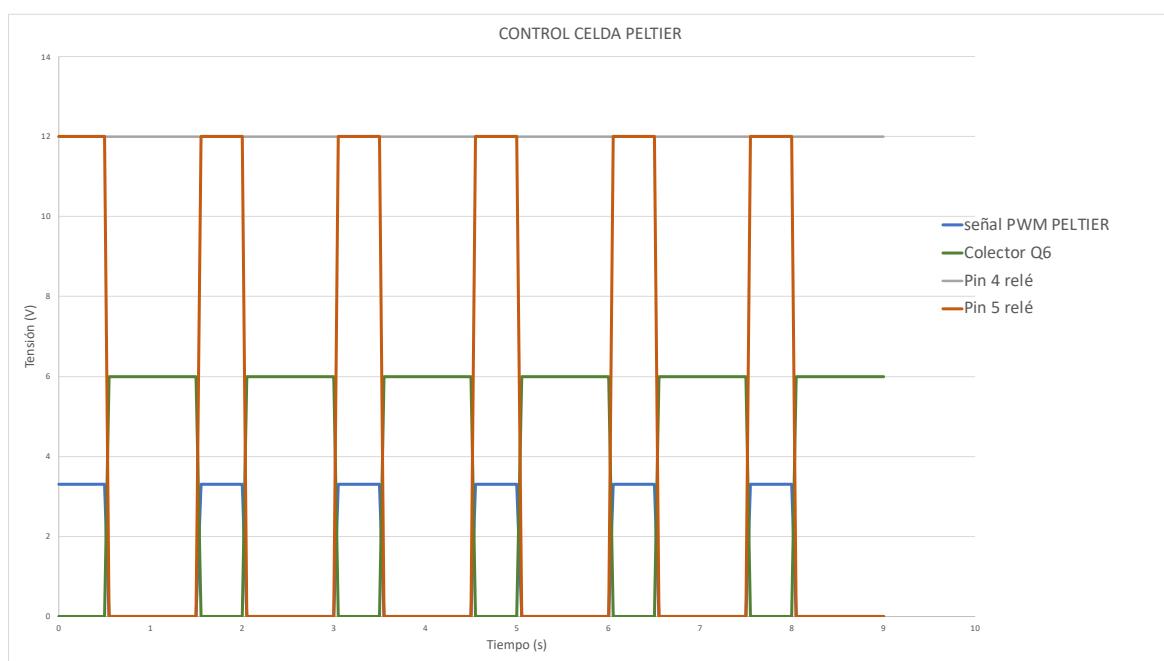


Figura 3.2.6. Representación de tensión en los pines transistores Q6 y Q1, celda Peltier

Como se puede observar el funcionamiento es el mismo que para el calentador. La única diferencia es que al emplear un transistor más en el proceso, la tensión que nos interesa, que es la del pin 5 del relé, coincide en forma con la señal de entrada PWM, teniendo este circuito un funcionamiento de amplificación de la señal. Al igual que para el calentador, la caída de tensión de la celda Peltier es de  $2/3$  el periodo del ciclo PWM.

### 3.3. Potencia componentes térmicos

Una vez conocemos como funcionan podemos calcular la potencia de funcionamiento de dichos componentes. Para ello se miden la corriente que circula por cada uno de ellos, ya que sabemos que la caída de tensión en los tres componentes es de 12V, se obtiene la potencia fácilmente. La corriente se ha medido con un multímetro. Las corrientes y caída de tensión de funcionamiento pueden observarse en la figura 3.3.1.

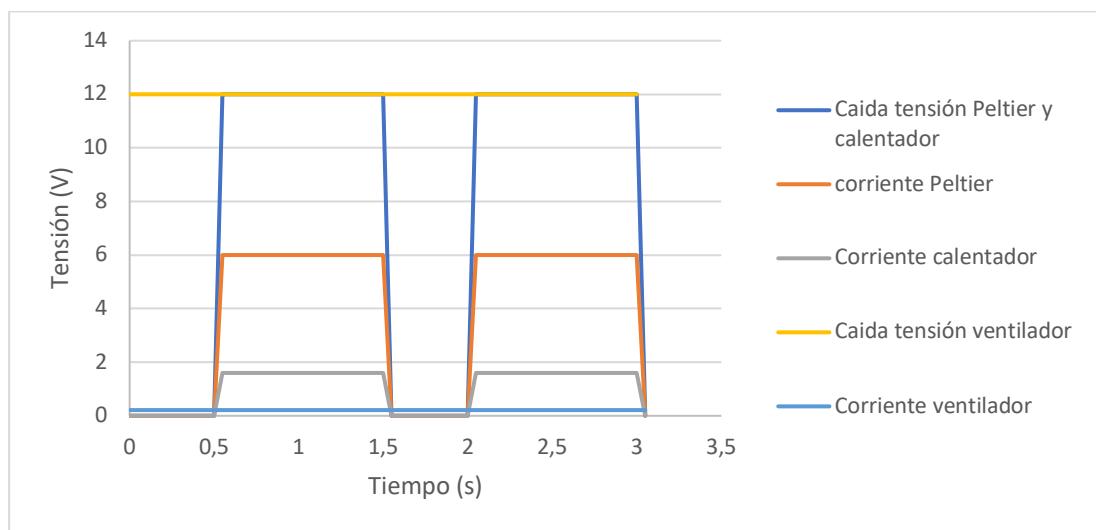


Figura 3.3.1. Corriente y caída de tensión en los componentes térmicos

Una vez conocida la corriente de funcionamiento obtenemos las potencias de funcionamiento para cada uno de ellos (figura 3.3.2).

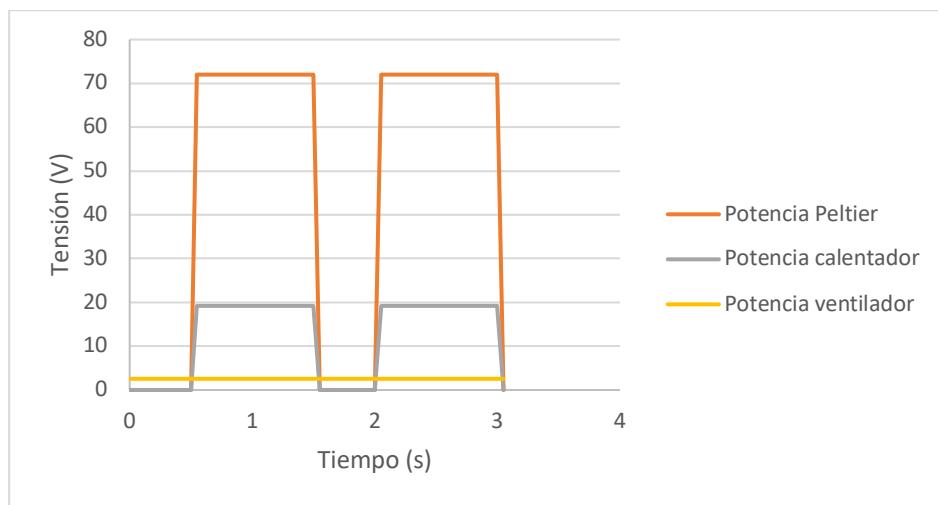


Figura 3.3.2. Potencias de funcionamiento componentes térmicos

Por simplicidad se decide calcular la potencia equivalente para la celda Peltier y el calentador de la tapa si estas trabajasen en continuo en vez de siguiendo un ciclo PWM (figura 3.3.3). Estas potencias son las que se han obtenido para los períodos de calentamiento y enfriamiento de los equipos. En los períodos de mantenimiento de la temperatura el consumo es menor. Es difícil cuantificar exactamente cual es dicho consumo ya que la señal PWM difiere en las distintas etapas del ciclo, ya que es más fácil mantener la temperatura cuando esta es baja. Por ello se considera que en estos períodos el consumo es del 50% al de funcionamiento en rampa de calentamiento.

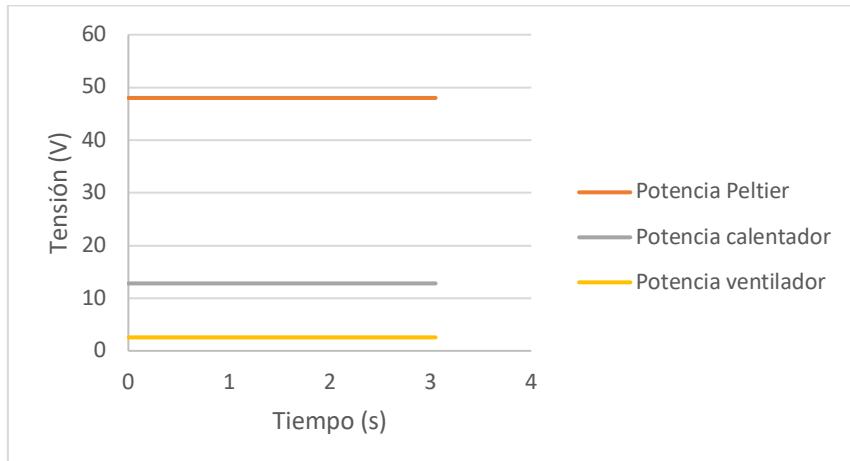


Figura 3.3.3. Potencias de funcionamiento equivalentes para los componentes térmicos

### 3.4. Comparativa bloques portamuestras reales

En este apartado del trabajo se comparan los tres bloques portamuestras desde el punto de vista térmico y eléctrico.

Comenzamos realizando las tres simulaciones correspondientes con el equipo y se obtienen las curvas de temperatura del bloque y de la tapa. A estas curvas se les superponen los consumos instantáneos de los componentes, tal y como se acaba de explicar y se procede al análisis de cada uno de los bloques.

En este caso inicial se obtiene la curvas que se muestran en la figura 3.4.1. En esta podemos apreciar los ciclos y las etapas de estos, al igual que cuales son las zonas de mayor consumo. La amplitud de los tramos de mayor consumo también ayuda a tener una mejor representación visual del tiempo que le cuesta al equipo realizar esa etapa del ensayo.

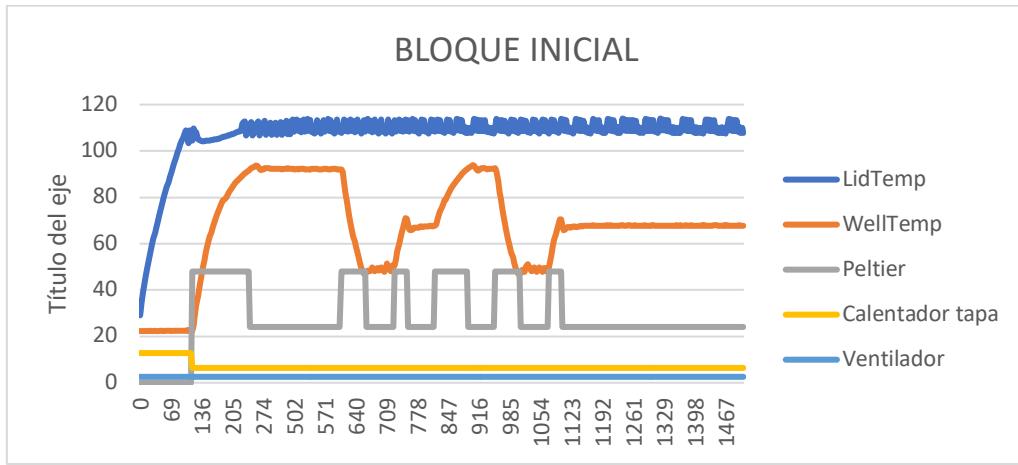
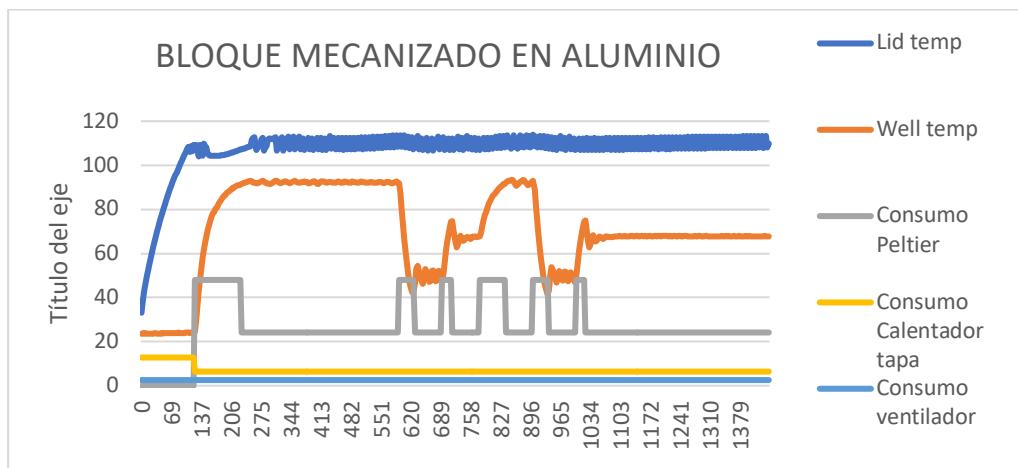


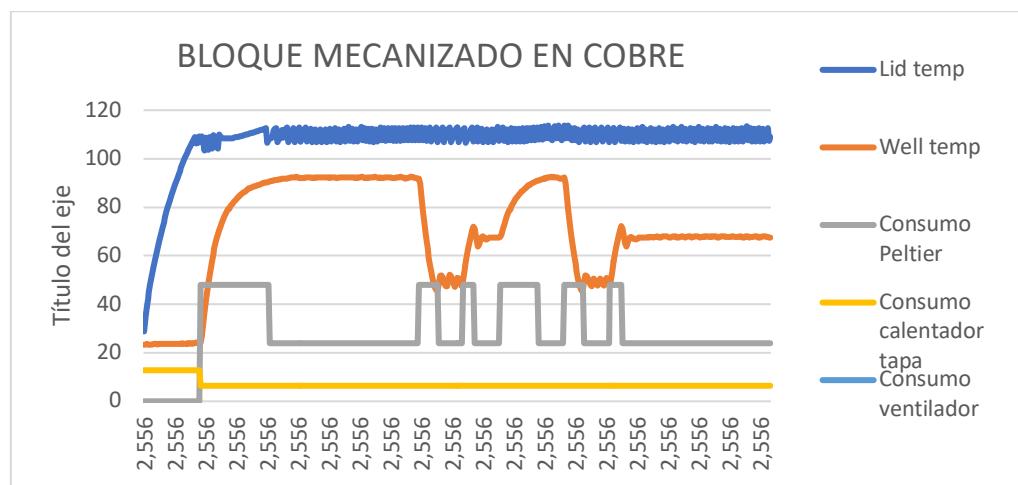
Figura 3.4.1. Simulación equipo real para bloque inicial

Los bloques mecanizados en aluminio y en cobre se han simulado de la misma manera. A continuación se muestran los resultados para el bloque mecanizado en aluminio (figura 3.4.2).



*Figura 3.4.2. Simulación equipo real para bloque mecanizado en aluminio*

Por último la curva para el bloque de cobre es la que se muestra en la figura 3.4.3.



*Figura 3.4.3. Simulación equipo real para bloque mecanizado en cobre*

Aparentemente puede apreciarse ya una diferencia en la rampa inicial de calentamiento entre las tres simulaciones. De estas curvas interesa conocer el tiempo que le cuesta realizar cada una de las rampas de calentamiento / enfriamiento, al igual que el tiempo total y el consumo que se produce en cada una de ellas.

Comenzamos con los tiempos totales de simulación (tabla 3.4.1). Los resultados parecen alarmantes a simple vista debido a que las mejoras en el bloque de aluminio son muy pequeñas. Esto se debe a que la mayor parte de la simulación realizada es de tiempo de ensayo invariante, independientemente de lo rápido o lento que se calienten / enfrién las muestras.

TIEMPOS (s)	Calentamiento tapa	Ensayo	Total
Caso inicial	114	1392	1506
Mecanizado en aluminio	120	1325	1445
Mecanizado en cobre	135	1389	1524

Tabla 3.4.1. Tiempos de calentamiento / enfriamiento globales ensayo

El calentamiento de la tapa, sin embargo es peor para las piezas mecanizadas. Esto puede deberse a factores como que el código de control del equipo este calibrado para el bloque que se proporciona, observándose que las rampas se suavizan mucho más en los bloques mecanizados al acercarse a la temperatura objetivo de 94°C. También puede ser debido a que las piezas mecanizadas no han sido aisladas como es debido y empeore el funcionamiento del equipo.

Si por el contrario nos fijamos en los tiempos de las rampas de calentamiento (tabla 3.4.2).

TIEMPOS (s)	Desnaturalización inicial	Alineamiento	Extensión	Desnaturalización
Caso inicial	127	54	27	72
Mecanizado en aluminio	107	33	21	57
Mecanizado en cobre	167	45	24	89

Tabla 3.4.2 Tiempos de calentamiento / enfriamiento en las etapas del ciclo térmico

Se observa en la tabla 3.4.2 que, tal y como se obtenía en las simulaciones con ANSYS, la mejor solución es para el bloque mecanizado en aluminio, teniendo una mejora notable con respecto a los otros bloques. Esto deja de lado la sospecha de que la simulación estuviese mal hecha ya que se esperaba desde el principio que el cobre fuese mejor conductor del calor, pero pese a tener el mismo diseño, el aumento de masa debido al material es muy considerable, y por tanto contraproducente a la hora de mejorar el proceso térmico.

Se decide simular otra vez las tres piezas con ANSYS para un flujo de calor de 48W constantes, siendo esta la potencia eléctrica de la celda Peltier como se ha calculado, y, se compara el tiempo de la rampa inicial de desnaturalización (tabla 3.4.1.3). Esta comparación nos permite hacer una estimación de la eficiencia del equipo a la hora de transformar y aprovechar la energía eléctrica consumida.

Desnaturalización inicial (s)	Caso real	Simulación ANSYS	Eficiencia (%)
Caso inicial	127	60,5	47,64
Mecanizado en aluminio	107	26	24,30
Mecanizado en cobre	167	33	19,76

Tabla 3.4.3. Tiempos calentamiento desnaturalización inicial, caso real vs simulado para flujo de calor 48W

Tal y como se observa en la tabla 3.4.3, pese a que el caso de mecanizado en aluminio es el más rápido, el tiempo es muy superior al de la simulación haciendo que este sea menos eficiente al transformar la energía eléctrica en energía térmica que el caso inicial. La eficiencia del equipo por lo general es baja. Una causa de esta eficiencia es el hecho de que el ventilador este funcionando todo el rato. Esto empeora las etapas de calentamiento, ya que esta forzando en cierta medida el flujo de calor en dirección contraria.

En cuanto a los bloques mecanizados, esta eficiencia tan baja puede deberse a que, como se ha mencionado antes, el sistema de control puede no estar calibrado para estos y los bloques no están bien aislados térmicamente, ya que no se ha cubierto la zona mecanizada de ninguna manera. A demás, no se disponía de suficiente pasta térmica a la hora de cambiar los bloques, generando una peor transmisión de calor.

Por último analizamos los consumos eléctricos totales del ensayo realizado (tabla 3.4.4).

CONSUMOS (kWh)	Peltier	Calentador tapa	Ventilador	TOTAL
Caso inicial	5,40	1,31	0,48	7,20
Mecanizado en aluminio	5,17	1,35	0,50	7,01
Mecanizado en cobre	6,11	1,50	0,55	8,16

Tabla 3.4.4. Consumos eléctricos por elemento y totales para cada bloque simulado con el equipo

La falta de eficiencia térmica se compensa un poco con la reducción del consumo eléctrico para el caso de mecanizado en aluminio. En el caso del mecanizado en cobre, los resultados siguen siendo desfavorables, siendo superiores al caso inicial.

## 4. Puesto de prácticas

Acabado el análisis y estudio de funcionamiento del equipo, un apartado importante a tratar es el de su posible implantación didáctica. El equipo de partida no está preparado para hacer mediciones con él, siendo un problema a la hora de realizar este estudio. Para que se puedan realizar prácticas respecto a este tema de estudio debe adecuarse el equipo para satisfacer las necesidades de seguridad de uso que conlleva un proyecto didáctico. Por ello se ha diseñado una estructura modificada, partiendo de la original, donde se ha agrandado la base para que todo cable quede recogido dentro del equipo, quedando fuera solo su toma de conexión a la red. La estructura de la tapa y de sujeción del bloque portamuestras permanecen intactas en esta variante.

El tema de simplificar el método de mediciones en el equipo se soluciona colocando conexiones tipo banana para que el usuario del equipo pueda conectar un osciloscopio o un multímetro al mismo con facilidad. Estas tomas deberán quedar bien identificadas con pegatinas para evitar problemas.

Se han identificado las tomas necesarias partiendo de las medidas realizadas a la hora de realizar la parte del análisis del equipo real. En la figura 4.1 puede verse cuantas tomas hay y a que corresponde cada una de ellas. Por simplicidad esta diseñado para que las medidas se realicen con un multímetro, siendo este un instrumento de medida ampliamente disponible en los laboratorios. El uso de un osciloscopio sería necesario para poder apreciar el ciclo PWM de funcionamiento de la celda Peltier y el calentador.

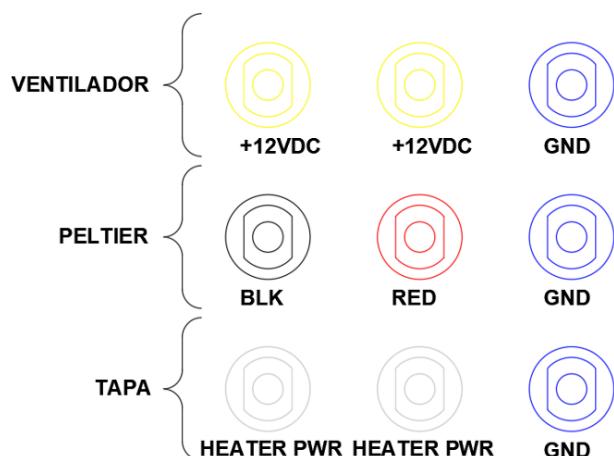


Figura 4.1. Conexiones banana necesarias para puesto prácticas, desarrollado con AutoCAD [14]

Además si se considera oportuno, también se podría colocar un interruptor seccionador para encender y apagar el equipo. No se ha implantado porque conlleva modificar la placa PCB del equipo. El plano de mecanizado de la estructura puede verse en el Anexo 5.

En anexos se han incluido dos guiones de prácticas de plantilla para el diseño de los bloques térmicos del equipo con SolidWorks (Anexo 1), así como su posterior simulación con ANSYS (Anexo2).

## 5. Conclusiones

Se ha realizado el estudio térmico de un termociclador open-source con simulaciones del equipo real como simulaciones con software profesional capaz de replicar el comportamiento del equipo.

Se ha deducido que el componente a optimizar en un termociclador es el bloque portamuestras, ya que es el componente central del equipo, sobre el que se basa toda simulación, tanto real como por software.

La búsqueda de la mejora del bloque de aluminio ha llevado a varios descubrimientos en el flujo térmico en materiales. La principal variación, y la más previsible ha sido la de reducir la masa del material mecanizándolo. Esta ha proporcionado resultados llamativos en cuanto a la que el funcionamiento puede llegar a mejorar en más de un 100 %. La sorpresa inicial ha llegado con la simulación del bloque para distintos materiales, donde materiales conocidos por sus propiedades térmicas y su elevado coste, como es el cobre y el oro, desempeñan peor que los bloques de aluminio. Este comportamiento se achaca a la elevada densidad del material y su bajo calor específico. Además, también se ha estudiado el cambiar completamente la disposición de las muestras, colocándolas de forma cilíndrica para poder colocar mas muestras.

Una vez se finalizan las simulaciones con software, se ha llevado lo aprendido al equipo real. Esto a supuesto un punto de reflexión en el trabajo, ya que suposiciones como el funcionamiento continuo de los componentes térmicos han sido erróneas, dando lugar a la necesidad de realizar un análisis del sistema eléctrico del equipo. El hecho de que la celda y el calentador no funcionasen de forma continua, ni a la potencia máxima de funcionamiento, ha supuesto que el sistema sea mucho más lento de lo previsto. Tras un periodo de reflexión se ha deducido que no funcionan de manera continua para mejorar la eficiencia de los componentes ya que al ser elementos resistivos, el excesivo calentamiento de los componentes podía ser perjudicial.

Este cambio en el funcionamiento también ha planteado la necesidad de analizar los consumos y la eficiencia de transmisión térmica más detenidamente, especialmente debido a que se han decidido mecanizar dos soluciones de las obtenidas en la optimización del bloque portamuestras. Los resultados no han sido satisfactorios, siendo mucho menor la mejora de lo que cabía esperar. Hay varios motivos por los que esto puede haber sucedido, siendo los mas realistas que los componentes del termociclador no tuviesen suficiente pasta térmica y que el ventilador es contraproducente al estar en continuo funcionamiento. Por último, con todo lo desarrollado en el trabajo y las preguntas tan llamativas que ha suscitado se ha planteado la realización de un puesto de prácticas para poder realizar el mismo ensayo de este trabajo, incluyendo uno guiones de prácticas para el diseño y simulación de los componentes.

Este trabajo ha permitido analizar dos componentes del trabajo de ingeniería fundamentales, como son las discrepancias entre las simulaciones y la realidad, algo que no es fácil de incluir en el proceso de aprendizaje universitario. El diseñar componentes y entrar en el proceso de optimización de estos también a resultado gratificante en el desarrollo del trabajo, permitiendo profundizar en los conocimientos de manejo de estos programas informáticos.

Este trabajo todavía tiene mucho por descubrir, como podría ser el analizar el sistema numéricamente, entrando en detalle en los procesos de conducción y convección que se producen en el proceso.

Otro aspecto en el que se podría ahondar es el código del equipo real, ver si el control que se realiza es adecuado y si existen algunos sistemas de control que pudiesen proporcionar una mejora en el funcionamiento o incluso cambiar el diseño de la PCB. Esta sería la forma más económica y eficaz de mejorar el equipo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Biblioteca Nacional de Medicina de los EE.UU” [Online]. Available: <https://medlineplus.gov/>
- [2] “Reacción en cadena de la polimerasa. Wikipedia” [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/>
- [3] “PCR: Reacción en cadena de la polimerasa (Polymerase Chain Reaction, PCR). Ana María Pérez Castro. Universidad Politécnica de Valencia, centro ETSIAM. 2011.
- [4] “Wikipedia. Artículo: Síntesis de ADN” [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/>
- [5] “Biomodel. Artículo: Electroforesis de proteínas y de ácidos nucleicos” [Online]. Available: <http://biomodel.uah.es/tecnicas/elfo/inicio.htm>
- [6] “Open qPCR, CHAI”. [Online]. Available: <https://www.chaibio.com/openqpcr/performance>
- [7] “OpenPCR, Open-source thermocycler” [Online]. Available: <https://openpcr.org>
- [8] “Ninja PCR. Equipo Open-source empleado”. [Online]. Available: <https://ninjaPCR.tori.st/en/index.html>
- [9] TFG Estudio de aplicación de células Peltier para la obtención de electricidad en automóviles. José Alberto Moya Pérez. Universidad Politécnica de Valencia. Febrero 2018.
- [10] “SolidWorks. Resource center” [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/es/support/resource-center>
- [11] “ANSYS for Students. Education Resources” [Online]. Available: <https://www.ansys.com/academic/learning-resources>
- [12] Tesis Mejora del diseño del módulo termo-mecánico de un termociclador para uso en biología molecular. Natalya Mercedes Huarcaya Victoria. Lima, Noviembre 2014.
- [13] Tesis Rediseño de un termociclador para la replicación del ácido desoxirribonucleico (ADN). Jorge Martín Palma Lara. Lima, Abril del 2010.
- [14] “Autodesk. Knowledge Network” [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support>

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 CADENA ADN [1].....	6
FIGURA 1 ETAPAS CICLO BÁSICO PROCESO PCR [4] .....	7
FIGURA 1.3. IZQUIERDA: EQUIPO ANÁLISIS MUESTRAS MEDIANTE ELECTROFORESIS. DERECHA: EJEMPLO RESULTADOS ANÁLISIS MEDIANTE ELECTROFORESIS. [5] .....	8
FIGURA 1.4. RESULTADOS CON EQUIPO PCR EN TIEMPO REAL [6] [7] .....	9
FIGURA 1.5. EQUIPO OPEN-SOURCE DE PARTIDA NINJA PCR [8] .....	9
FIGURA 2.1.1. ESQUEMA CELDA PELTIER [9] .....	10
FIGURA 2.1.2. RESISTENCIA CALENTADOR TAPA [8].....	11
FIGURA 2.1.3. BLOQUE PORTAMUESTRAS [8].....	12
FIGURA 2.2.1. CURVA TIEMPO-TEMPERATURA PRUEBA PCR [3] .....	13
FIGURA 2.2.2. ENSAMBLAJE BLOQUE PORTAMUESTRAS Y TUBOS SIMULADOS .....	14
FIGURA 2.3.1. IZQUIERDA: BLOQUE PORTAMUESTRAS MECANIZADO 1MM EN ALTURA. CENTRO: BLOQUE MECANIZADO 3MM EN ALTURA. DERECHA: BLOQUE MECANIZADO 9MM EN ALTURA.....	15
FIGURA 2.3.2. IZQUIERDA: BLOQUE PORTAMUESTRAS MECANIZADO 9MM EN ALTURA Y TALADRADO DE 6MM DE PROFUNDIDAD. DERECHA: BLOQUE MECANIZADO 9MM EN ALTURA Y TALADRADO DE 9MM DE PROFUNDIDAD .....	19
FIGURA 2.3.3. IZQUIERDA: BLOQUE PORTAMUESTRAS MECANIZADO 7MM EN ALTURA Y PROFUNDIDAD DE TALADRADO 6MM. DERECHA: BLOQUE MECANIZADO 7MM EN ALTURA Y PROFUNDIDAD DE TALADRADO 9MM .....	21
FIGURA 2.3.4. IZQUIERDA: BLOQUE PORTAMUESTRAS MECANIZADO 9MM EN ALTURA, BLOQUE DE 10MM DE ALTURA. DERECHA: BLOQUE PORTAMUESTRAS DE 7,5MM DE ALTURA Y MECANIZADO DE 6,5MM .....	23
FIGURA 2.3.5. IZQUIERDA: BLOQUE PORTAMUESTRAS MECANIZADO 7MM Y PIEZA DE 10MM DE ALTURA. DERECHA: BLOQUE PORTAMUESTRAS DE 8MM DE ALTURA Y MECANIZADO 5MM .....	25
FIGURA 2.3.6. 1) BLOQUE PORTAMUESTRAS CON DISPOSICIÓN CILÍNDRICA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LAS MUESTRAS DE 0º. 2) BLOQUE CON DISPOSICIÓN CILÍNDRICA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 15º. 3) BLOQUE CON DISPOSICIÓN CILÍNDRICA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 30º. 4) BLOQUE CON DISPOSICIÓN CILÍNDRICA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 45º. 5) BLOQUE CON DISPOSICIÓN CILÍNDRICA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN 60º.....	29
FIGURA 3.1.1. CURVA DE TEMPERATURAS CICLO DE ENSAYO, ETAPAS INICIAL Y FINAL + 2 CICLOS.....	31
FIGURA 3.1.2. CURVA DE TEMPERATURAS SIMULACIÓN REAL, CASO BLOQUE INICIAL.....	31
FIGURA 3.1.3. MEDICIONES CON OSCILOSCOPIO, CAÍDA TENSIÓN CELDA PELTIER .....	32
FIGURA 3.2.1. ESQUEMA ELÉCTRICO DE CONTROL DEL VENTILADOR .....	33
FIGURA 3.2.2. REPRESENTACIÓN DE TENSIONES EN LOS PINES DEL TRANSISTOR Q3, VENTILADOR.....	33
FIGURA 3.2.3. ESQUEMA ELÉCTRICO CONTROL CALENTADOR TAPA .....	34
FIGURA 3.2.4. REPRESENTACIÓN DE TENSIONES EN LOS PINES DEL TRANSISTOR Q2, CALENTADOR TAPA .....	34
FIGURA 3.2.5. ESQUEMA ELÉCTRICO CONTROL CELDA PELTIER .....	35
FIGURA 3.2.6. REPRESENTACIÓN DE TENSIÓN EN LOS PINES TRANSISTORES Q6 Y Q1, CELDA PELTIER.....	35
FIGURA 3.3.1. CORRIENTE Y CAÍDA DE TENSIÓN EN LOS COMPONENTES TÉRMICOS .....	36
FIGURA 3.3.2. POTENCIAS DE FUNCIONAMIENTO COMPONENTES TÉRMICOS .....	36
FIGURA 3.3.3. POTENCIAS DE FUNCIONAMIENTO EQUIVALENTES PARA LOS COMPONENTES TÉRMICOS .....	37
FIGURA 3.4.1. SIMULACIÓN EQUIPO REAL PARA BLOQUE INICIAL .....	38
FIGURA 3.4.2. SIMULACIÓN EQUIPO REAL PARA BLOQUE MECANIZADO EN ALUMINIO .....	38
FIGURA 3.4.3. SIMULACIÓN EQUIPO REAL PARA BLOQUE MECANIZADO EN COBRE .....	38
FIGURA 4.1. CONEXIONES BANANA NECESARIAS PARA PUESTO PRÁCTICAS, DESARROLLADO CON AUTOCAD [14] .....	41

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.2.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LAS SIMULACIONES INICIALES, BIBLIOTECA ANSYS .....	13
TABLA 2.3.1.1. VARIACIONES DE VOLUMEN Y SUPERFICIE Y COMO INFLUYEN EN LA TEMPERATURA DE LOS CASOS SIMULADOS, CASO QUITAR MATERIAL EN ALTURA, SIMULACIÓN ENSAMBLAJE COMPLETO .....	16
TABLA 2.3.1.2. RELACIÓN TEMPERATURAS ENTRE BLOQUE Y MUESTRA, CASO QUITAR MATERIAL EN ALTURA ..	16
TABLA 2.3.1.3. MEJORA RAMPA CALENTAMIENTO CASOS SIMULADOS RESPECTO A LA PIEZA INICIAL, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO QUITAR MATERIAL EN ALTURA.....	17
TABLA 2.3.1.4. MEJORAS DE TIEMPOS DE CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO EN LOS CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO QUITAR MATERIAL EN ALTURA.....	17
TABLA 2.3.1.5. MEJORA EN TIEMPOS DE SIMULACIÓN CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO QUITAR MATERIAL EN ALTURA .....	18
TABLA 2.3.1.6. VARIACIÓN DEL VOLUMEN Y SUPERFICIE CASOS SIMULADOS Y COMO AFECTAN A LA TEMPERATURA, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 9MM.....	19
TABLA 2.3.1.7. MEJORA RAMPA CALENTAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 9MM .....	20
TABLA 2.3.1.8. MEJORA TIEMPOS CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 9MM.....	20
TABLA 2.3.1.9. MEJORA TIEMPOS DE SIMULACIÓN CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 9MM.....	20
TABLA 2.3.1.10. VARIACIÓN DEL VOLUMEN Y SUPERFICIE CASOS SIMULADOS Y COMO AFECTAN A LA TEMPERATURA, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 7MM.....	21
TABLA 2.3.1.11. MEJORA RAMPA CALENTAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 9MM.....	21
TABLA 2.3.1.12. MEJORA TIEMPOS CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 7MM .....	22
TABLA 2.3.1.13. MEJORA TIEMPOS SIMULACIÓN CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR PROFUNDIDAD DE TALADRADO. PIEZA MECANIZADO 7MM .....	22
TABLA 2.3.1.14. VARIACIÓN DE VOLUMEN Y SUPERFICIE CASOS SIMULADOS Y COMO AFECTA A LA TEMPERATURA, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 9MM .....	23
TABLA 2.3.1.15. MEJORA RAMPA CALENTAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 9MM .....	24
TABLA 2.3.1.16. MEJORA TIEMPOS CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 9MM .....	24
TABLA 2.3.1.17. MEJORA TIEMPOS SIMULACIÓN CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 9MM.....	24
TABLA 2.3.1.18. VARIACIÓN DE VOLUMEN Y SUPERFICIE CASOS SIMULADOS Y COMO AFECTA A LA TEMPERATURA, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 7MM .....	25
TABLA 2.3.1.19. MEJORA RAMPA CALENTAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 7MM .....	25
TABLA 2.3.1.20. MEJORA TIEMPOS CALENTAMIENTO/ENFRIAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 7MM .....	25
TABLA 2.3.1.21. MEJORA TIEMPOS SIMULACIÓN CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIAR ALTURA DE LA PIEZA. PIEZA MECANIZADO 9MM.....	26
TABLA 2.3.1.22. RESUMEN MEJORAS CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIACIÓN EN MASA. PIEZA MECANIZADO 7MM.....	26
TABLA 2.3.1.23. RESUMEN MEJORAS CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO VARIACIÓN EN MASA. PIEZA MECANIZADO 9MM.....	27

TABLA 2.3.2.1. PROPIEDADES DE MATERIALES ENSAYADOS PARA BLOQUE PORTAMUESTRAS, CASO CAMBIAR MATERIAL DE LA PIEZA .....	27
TABLA 2.3.2.2. MEJORA RAMPA CALENTAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO CAMBIAR MATERIAL DE LA PIEZA .....	28
TABLA 2.3.3.1. VARIACIÓN DEL VOLUMEN Y SUPERFICIE EN LOS CASOS SIMULADOS, COSO CAMBIAR DISPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS .....	29
TABLA 2.3.3.2. MEJORA EN RAMPA DE CALENTAMIENTO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO CAMBIAR DISPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS .....	30
TABLA 2.3.3.3. MEJORA EN TIEMPOS CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO CAMBIAR DISPOSICIÓN MUESTRAS .....	30
TABLA 2.3.3.4. MEJORA DE TIEMPO DE ENSAYO CASOS SIMULADOS, SIMULACIÓN SOLO BLOQUE, CASO CAMBIAR DISPOSICIÓN MUESTRAS .....	30
TABLA 3.4.1. TIEMPOS DE CALENTAMIENTO ENFRIMIENTO GLOBALES ENSAYO .....	39
TABLA 3.4.2 TIEMPOS DE CALENTAMIENTO / ENFRIMIENTO EN LAS ETAPAS DEL CICLO TÉRMICO .....	39
TABLA 3.4.3. TIEMPOS CALENTAMIENTO DESNATURALIZACIÓN INICIAL, CASO REAL VS SIMULADO PARA FLUJO DE CALOR 48W .....	40
TABLA 3.4.4. CONSUMOS ELÉCTRICOS POR ELEMENTO Y TOTALES PARA CADA BLOQUE SIMULADO CON EL EQUIPO .....	40