



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

DAVID ARIAS PÉREZ

DNI:

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**DESARROLLO DE UN EQUIPO A MEDIDA PARA  
LA CONEXIÓN DE MICROCOMPONENTES  
ELECTRÓNICOS SOBRE SUSTRATOS  
FLEXIBLES MEDIANTE ADHESIVOS  
ANISOTRÓPICOS**

Enero de 2017

## RESUMEN

Esta memoria recoge el análisis previo y el posterior desarrollo de un equipo a medida para Fundación PRODINTEC, cuya función es permitir y facilitar la fijación de componentes de pequeño tamaño sobre sustratos flexibles, para conseguir con ello la fabricación de circuito flexibles impresos. Esta fijación se lleva a cabo empleando adhesivos anisotrópicos cuya principal característica es que conducen en una única dirección, en este caso en la dirección perpendicular al sustrato sobre el que se fijan los componentes. De esta forma se facilita la colocación de los componentes y se elimina cualquier riesgo de cortocircuito entre los pines de los integrados.

Con el fin de conocer el funcionamiento y los parámetros del proceso, se lleva a cabo un importante número de pruebas iniciales, de forma manual, llegando a desarrollar una sencilla versión inicial del equipo. De esta forma se pueden observar los puntos críticos del uso de estos adhesivos en esta versión y analizar los resultados antes de llegar al equipo final.

El funcionamiento del equipo a desarrollar se basa en aplicar una presión controlada sobre el componente a fijar a la vez que la herramienta que ejerce dicha presión mantiene una temperatura también controlada. Todo este proceso se ha de llevar a cabo durante un tiempo determinado. De forma muy resumida, se podría definir como un control simultáneo de la presión y temperatura aplicada sobre el componente durante un tiempo determinado.

Además, se ha desarrollado una interfaz gráfica mediante una pantalla táctil que permite introducir los valores de referencia de los parámetros de proceso, controlar dichos parámetros durante el mismo y navegar entre los modos de operación implementados.

### Palabras clave:

*Electrónica flexible, circuito impreso, FPC, adhesivo anisotrópico, cinta anisotrópica, thermode, bonding, microelectrónica, interfaz gráfica, pantalla táctil, resistencia NTC, neumática, válvula proporcional, control temperatura, StateChart, diagrama de estados, Arduino UNO, diseño de PCB, Altium Designer.*

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, agradecer a mi familia y muy especialmente a mis padres, ya que ellos han sido los responsables directos de toda mi formación universitaria. Además han estado apoyándome en todo momento, haciendo más llevaderos los malos momentos y compartiendo los buenos, por lo que siempre les estaré agradecido.*

*En segundo lugar agradecer a la Fundación PRODINTEC como institución y centro tecnológico, por haberme brindado la oportunidad de desarrollar mi TFM en sus instalaciones, ofreciéndome en todo momento los materiales y herramientas que he necesitado.*

*De forma más concreta, me gustaría dar las gracias a todos los integrantes del departamento de electrónica de la Fundación, que siempre han estado ahí para resolverme cualquier duda que me ha surgido o para echarme una mano cuando me encontraba con algún problema durante el desarrollo de mi TFM. Además, gracias a ellos he podido sentirme como uno más del departamento, comprobando la importancia y satisfacción que genera el hecho de trabajar en un ambiente de trabajo tranquilo, cercano y agradable.*

*Agradecer también a los operarios del taller, los responsables de la fabricación de todas las piezas del equipo que requerían el uso de la fresadora, y que han sido capaces de fabricarlas en ratos libres en los que la máquina se encontraba parada. De no haber sido así y haber tenido que cumplir la lista de espera de la máquina, el equipo no habría salido a tiempo.*

*También me gustaría agradecer a Fernando Berenguer y a Antonio López, tutor en la empresa y tutor académico respectivamente, por haberme guiado durante el desarrollo del TFM de la forma en la que lo han hecho, cada uno en sus competencias.*

*Por último, y no por ello menos importante, dar las gracias a todas esas personas con nombre propio que forman parte de mi vida, por todo el apoyo que me han ofrecido.*

*Muchas gracias a todos.*

*David Arias Pérez*

*Febrero de 2017*

## ÍNDICE

1.	Introducción.....	1
1.1.	Planteamiento del problema .....	2
1.2.	Objetivos .....	4
1.3.	Distribución de la memoria .....	5
2.	Estado del arte y aspectos técnicos.....	7
2.1.	Adhesivos anisotrópicos.....	7
2.2.	Equipos <i>thermodes</i> comerciales.....	9
3.	Diseño conceptual del equipo .....	14
4.	Diseño mecánico.....	16
4.1.	Selección de cabeza <i>thermode</i> .....	16
4.2.	Chasis e integración del cilindro neumático .....	17
4.3.	Pieza para fijar los <i>thermodes</i> al equipo .....	18
4.4.	Muelle de compresión como método de transmisión de la fuerza .....	20
4.5.	Pieza para fijar la resistencia al <i>thermode</i> .....	23
5.	Diseño neumático.....	25
5.1.	Cilindro neumático .....	25
5.2.	Regulador de presión proporcional.....	27
5.3.	Electroválvula .....	28
6.	Diseño eléctrico .....	30
6.1.	Alimentación de los <i>thermodes</i> .....	30
6.2.	Alternativa para el calentamiento de los <i>thermodes</i> .....	32
6.3.	Selección de la fuente de alimentación .....	33
6.4.	Diseño de un convertidor <i>Boost</i> para la obtención de 24V .....	34
7.	Diseño software.....	37
7.1.	Selección del hardware de control.....	37
7.2.	Tabla de entradas y salidas .....	38
7.3.	Interfaz gráfica de usuario utilizando una pantalla táctil.....	39
7.3.1.	Comunicación <i>SPI</i> para el control de la pantalla táctil .....	40
7.3.2.	Instalación de librerías para el control de la pantalla por <i>SPI</i> .....	40
7.4.	Diagrama de estados del equipo.....	41
7.4.1.	Estado <i>INICIO</i> .....	42
7.4.2.	Estado <i>REPOSO</i> .....	42

7.4.3.	Estado <i>EDITAR_TEMPERATURA</i> .....	43
7.4.4.	Estado <i>EDITAR_TIEMPO</i> .....	44
7.4.5.	Estado <i>ESPERA_TEMPERATURA</i> .....	44
7.4.6.	Estado <i>BAJAR_CILINDRO</i> .....	45
7.4.7.	Estado <i>CALENTAR</i> .....	46
7.4.8.	Estado <i>MODULO_MANUAL</i> .....	47
7.4.9.	Estado <i>ERROR</i> .....	48
7.5.	Programación de los estados del equipo en Arduino .....	49
7.6.	Control de los actuadores .....	52
7.6.1.	Estrategia para el control de la resistencia en lazo cerrado.....	52
7.6.2.	Control de la electroválvula.....	54
8.	Diseño del circuito y de la PCB de control .....	55
8.1.	Esquemas y diseño del circuito .....	55
8.1.1.	Uso de un <i>MOSFET</i> para las señales de control .....	56
8.1.2.	Entrada analógica para el sensor de temperatura .....	58
8.1.3.	Entradas digitales para el final de carrera y el pedal.....	58
8.1.4.	Salidas de control de la pantalla táctil.....	59
8.2.	Diseño de la PCB.....	60
9.	Fabricación y montaje del equipo .....	62
10.	Fabricación y montaje de la parte de control.....	69
10.1.	Fabricación de la PCB de control.....	69
10.2.	Instalación y soldado de componentes en las PCB .....	70
10.3.	Montaje de la electrónica .....	71
11.	Presentación final del equipo .....	74
12.	Pruebas y resultados del equipo .....	75
12.1.	Consideraciones sobre el ruido eléctrico en el equipo .....	77
13.	Conclusiones, discusión y trabajo futuro.....	79
13.1.	Discusión acerca del muelle de compresión y alternativas .....	79
13.2.	Discusión acerca del control de temperatura y alternativas .....	80
13.3.	Trabajo futuro .....	80
13.4.	Conclusión final .....	80
14.	Referencias .....	81
15.	Planificación.....	82
16.	Presupuesto .....	84

16.1. Importe de materiales.....	84
16.2. Importe en personal.....	86
16.3. Importe total .....	86
17. Anexo A: Pruebas iniciales.....	87
17.1. Uso de la cinta de para fijar 2 LEDs de tamaños 0805 y 0603 .....	87
17.2. Uso de la cinta para fijar un integrado con encapsulado WSON-14.....	90
17.3. Uso de la cinta para fijar un LED de tamaño 240x320µm.....	95
17.4. Uso del adhesivo fluido para fijar un LED de tamaño 1206 .....	97
17.5. Uso del adhesivo fluido para fijar un LED de tamaño 240x320µm.....	98
17.6. Conclusiones tras las pruebas iniciales .....	100
18. Anexo B: Diseño y desarrollo de la primera versión.....	101
18.1. Diseño y desarrollo mecánico .....	101
18.2. Diseño y desarrollo eléctrico.....	103
18.3. Sensor de temperatura .....	104
18.4. Interfaz de entrada y salida.....	106
18.5. Control del equipo con Arduino UNO .....	106
19. Anexo C: Pruebas y resultados de la primera versión .....	108
19.1. Conclusiones.....	111
20. Anexo D: Calibración de los termopares .....	112
21. Anexo E: Código de la primera versión del equipo.....	116
22. Anexo F: <i>StateChart</i> de la versión final del equipo .....	118
23. Anexo G: Código de la versión final del equipo.....	119
24. Anexo H: Esquema diseñado para la PCB de control.....	133

## 1. INTRODUCCIÓN

Hace unos años, el único concepto que existía de un circuito electrónico eran las tradicionales y conocidas placas de circuito impreso o PCBs. Dichas placas eran un soporte rígido sobre las cuales se diseñaban y fabricaban circuitos impresos para cualquier tipo de soluciones. Se trataba de una opción que cumplía con los objetivos ya que todas las aplicaciones en las que se utilizaban no necesitaban requerimientos que éstas no tuviesen.



Figura 1. Placas de circuito impreso o PCBs.

Actualmente las aplicaciones de electrónica han evolucionado mucho, surgiendo circuitos electrónicos en campos, y más concretamente en objetos, en los que anteriormente no estaba presente. Como consecuencia de esta evolución han ido surgiendo nuevos requerimientos ligados al diseño de los circuitos electrónicos que las tradicionales PCBs no pueden cumplir.

Una de las características más importantes que actualmente se demanda en un gran número de circuitos electrónicos es la flexibilidad. Se trata de una capacidad muy importante, y en algunos casos vital, para muchas aplicaciones en las que recientemente ha entrado la electrónica y un claro ejemplo de ello es el campo de la biomedicina, en el que se están diseñando y fabricando gran cantidad de sensores biomédicos que deben de ser flexibles. También existen numerosas aplicaciones que previamente se desarrollaban utilizando PCBs, pero que en la actualidad están siendo migradas hacia la electrónica flexible ofreciendo nuevas ventajas y posibilidades. Algunos ejemplos son las pantallas, los paneles de iluminación, pulsadores para interfaces, sensores, detectores, etc., todos ellos dotados de flexibilidad.

Con el objetivo de dotar a los circuitos electrónicos de tal flexibilidad, ha surgido el concepto de *FPC* o *Flexible Printed Circuits*. Se trata de circuitos electrónicos que se fabrican sobre sustratos flexibles tales como *Kapton* (Poliimida), *PET* (Polyethylene Terephthalate) o *COP* (Cyclo-olefin Polymer). La fabricación de dichos circuitos principalmente se lleva a cabo

utilizando *inkjet* o serigrafía, técnicas que consisten en la impresión sobre el sustrato flexible de las pistas y pads del circuito a fabricar utilizando tinta electroconductiva.

Una vez impreso el circuito sobre el sustrato, el siguiente paso es la colocación de los componentes electrónicos existentes en el diseño de forma análoga a como se fijan los componentes en una PCB utilizando estaño. En este caso el uso de estaño no es viable ya que muchos de los sustratos que se utilizan no soportan la temperatura necesaria para fundir el estaño. Como consecuencia de ello, los fabricantes de adhesivos han desarrollado una amplia gama de productos especialmente orientados a la fijación de componentes electrónicos sobre sustratos flexibles.

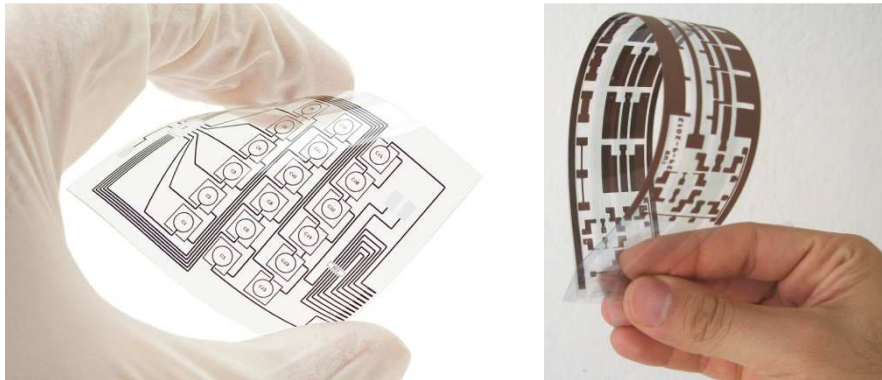


Figura 2. Circuitos electrónicos impresos flexibles (FPC).

Muchos de estos adhesivos tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica, por tanto cumplen la función de fijar el componente sobre el sustrato y a la vez de hacer la conexión eléctrica entre dicho componente y las pistas del circuito. En función de las propiedades electroconductoras, estos adhesivos pueden clasificarse en isotrópicos y anisotrópicos. Los primeros tienen la capacidad de conducir en todas las direcciones, de forma similar al estaño en las PCBs. Por el contrario, los adhesivos anisotrópicos tienen la característica de conducir en una única dirección, generalmente en la dirección perpendicular al sustrato. De esta forma se limita la conductividad únicamente a la dirección que va desde el pad impreso en el sustrato hasta el pin del componente.

Este TFM se centra en el uso de los adhesivos anisotrópicos, necesidad que surge como consecuencia de varios proyectos en los que actualmente trabaja Fundación PRODINTEC. En el siguiente apartado se detalla por qué surge esta necesidad y cómo se hace frente a ella dando lugar a este TFM, cuyo objetivo se detalla en el Apartado 1.2 de este capítulo.

## 1.1. Planteamiento del problema

Fundación PRODINTEC se encuentra actualmente trabajando en varios proyectos en los que se requiere el diseño y la fabricación de circuitos flexibles. Uno de los proyectos trata de conseguir una matriz de LEDs, con el objetivo de lograr una lámina flexible y capaz de proporcionar una iluminación totalmente uniforme.



De esta forma, el cliente busca desarrollar un producto de aspecto similar a los OLEDs pero conservando las propiedades de eficiencia, tiempo de vida y coste de los tradicionales LEDs orgánicos. Tras varias pruebas llevadas a cabo por el cliente, se llega a la conclusión que para alcanzar esta uniformidad en la iluminación, es necesario el empleo de un gran número de LEDs de reducidas dimensiones. El cliente de dicho proyecto ha propuesto el uso de un LED determinado, concretamente el *CREE DA2432*, con unas cotas de  $320\mu\text{m}$  y  $240\mu\text{m}$  en sus dos lados, y un espacio entre pads de  $60\mu\text{m}$ , como se puede ver en la siguiente imagen.

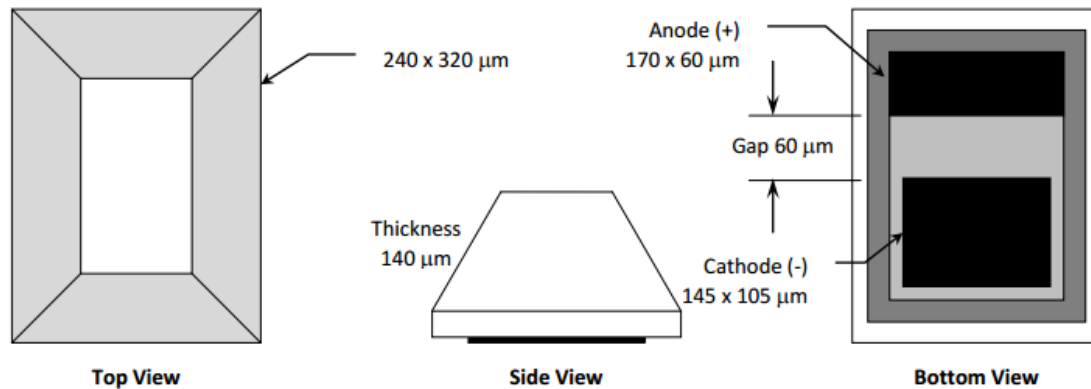


Figura 3. Dimensiones del LED *CREE DA2432*.

En un primer momento se ha intentado fijar este componente al circuito utilizando adhesivo isotrópico. Se recuerda que este adhesivo tiene la propiedad de conducir en todas direcciones, de forma análoga al estaño. El problema que se ha encontrado es la dificultad de dispensar el adhesivo en los pads impresos sobre el sustrato de forma que al colocar el integrado, este adhesivo no comunique los dos pads, separados  $60\mu\text{m}$ . Si esto ocurre, los pads de dicho integrado quedan cortocircuitados, dando lugar a un LED no funcional. Tras varias pruebas utilizando diferentes métodos de dispensado del adhesivo isotrópico, se concluye que el uso de este tipo de adhesivo con la tecnología disponible no es viable.

Posteriormente se ha estudiado el uso de adhesivos anisotrópicos. Como se ha comentado en la introducción, se tratan de adhesivos que tienen la capacidad de conducir la electricidad en una única dirección. Este tipo de adhesivos han sido desarrollados por sus fabricantes para conducir, generalmente, en la dirección perpendicular al plano donde se sitúan los componentes. De esta forma, el adhesivo comunica eléctricamente cada uno de los pads impresos en el circuito flexible con el pad correspondiente del componente, sin la necesidad de tener que aislar físicamente el adhesivo de cada pad. Esto facilita en gran medida la fijación de componentes pequeños ya que no es necesario un dispensado de adhesivo tan preciso como en el caso del adhesivo isotrópico. En este caso se dispensa adhesivo suficiente que cubra todos los pads del circuito y la precisión se limita al correcto posicionamiento del componente, de forma que cada pin del mismo quede sobre el pad correspondiente.

Fundación PRODINTEC ha adquirido un par de adhesivos anisotrópicos con el objetivo de hacer pruebas de viabilidad de la idea comentada en el párrafo anterior. Uno de estos adhesivos es un fluido de baja viscosidad del fabricante *DELO* y el otro es una cinta de doble cara del fabricante *3M*. Ambos fabricantes recomiendan el empleo de un equipo comercial, denominado *thermode*, para la utilización de sus adhesivos a la hora de fijar componentes. El

funcionamiento de estos equipos se puede resumir en ejercer una cierta presión y temperatura durante un tiempo determinado sobre el componente a fijar, tras haber previamente colocado el adhesivo anisotrópico bajo el mismo.



Figura 4. Fabricantes de los que se disponen de adhesivos para hacer prueba iniciales.

## 1.2. Objetivos

Los equipos comerciales mencionados en el apartado anterior tienen un elevado coste ya que abarcan un amplio rango de trabajo en cuanto a temperatura y presión se refiere. Además tienen un gran número de funcionalidades ya que son utilizados para más aplicaciones además de la utilización de adhesivos anisotrópicos.

La gran mayoría de los circuitos flexibles en los que Fundación PRODINTEC trabaja tienen como base sustratos poliméricos. Esto se traduce en que el rango de temperaturas que se necesita es mucho menor que el que ofrecen los equipos comerciales, el cual se podría acotar entorno a los 150-200°C. Como consecuencia de ello, se considera que adquirir un equipo comercial sería una solución totalmente sobredimensionada.

Por este motivo, parece más interesante desarrollar un equipo a medida que se adapte al rango de trabajo necesario para la aplicación en cuestión. Además, pensado en un futuro, el desarrollo de un equipo propio puede facilitar en gran medida la integración del mismo en la línea *roll-to-roll* (R2R) que Fundación PRODINTEC tiene para la fabricación continua de circuitos flexibles.

Como consecuencia de la necesidad planteada en el apartado anterior y el análisis de las ventajas del desarrollo de una solución a medida frente a la adquisición de un equipo comercial, este TFM tiene como objetivo desarrollar un equipo a medida que permita la fijación de componentes electrónicos utilizando adhesivos anisotrópicos, teniendo en cuenta los rangos de temperatura y presión requeridos para las aplicaciones en las que Fundación PRODINTEC trabaja.

### 1.3. Distribución de la memoria

En este primer capítulo se ha llevado a cabo una breve introducción de lo que es la electrónica flexible. Posteriormente se ha explicado cómo surge la necesidad de buscar una solución al problema tratado en este TFM y finalmente se ha presentado el objetivo que se busca con el desarrollo de este proyecto.

En el Capítulo2 se analiza en detalle el estado actual de la tecnología a utilizar. Además, se explican aspectos teóricos con el objetivo de facilitar la comprensión de los siguientes capítulos de este TFM por parte del lector.

En el Capítulo3 se presenta el diseño conceptual del equipo a desarrollar con el objetivo de dar una idea general de los diferentes módulos que lo integran y las partes más importantes de cada uno de dichos módulos.

El Capítulo4 detalla el diseño mecánico del equipo. Inicialmente se seleccionan los *thermodes* que se utilizan, después se explica cómo se va desarrollando la estructura del equipo y finalmente se detalla el método de transferencia de la fuerza mediante un muelle de compresión, todo ello acompañado de capturas del programa de diseño.

En el Capítulo5 se recoge la parte de diseño relacionada con el módulo neumático. En primer lugar se lleva a cabo la selección de un cilindro neumático encargado de ejercer la fuerza del proceso y posteriormente se presentan dos opciones para el control de dicha fuerza.

El Capítulo6 recoge toda la información relacionada con la parte eléctrica, comenzando por el análisis del método comercial de los *thermodes* y ofreciendo una alternativa cuyas especificaciones son más asequibles. Posteriormente se lleva a cabo la selección de la fuente de alimentación del equipo y finalmente se diseña un *Boost* para obtener 24 voltios de la fuente.

En el Capítulo7 se presenta en primer lugar la selección del hardware de control y de la interfaz con el usuario y posteriormente se recogen todos los aspectos relacionados con el diseño software, enumerando las señales del sistema y explicando en detalle los aspectos de programación de la pantalla táctil. Además, se presenta un diagrama de estado o *StateChart* que permite al lector crear una visión general del sistema y posteriormente se explica la metodología empleada para implementar dicho diagrama de estados.

El Capítulo8 recoge toda la información relativa al diseño de los esquemas empleados en la parte de control, detallando y referenciando todos los componentes necesarios.

El Capítulo9 recoge varias fotos adquiridas tras la fabricación de las piezas que conforman el equipo. Además se incluyen aspectos de fabricación tales como el método de mecanizado y el material de dichas piezas. Se muestran varias imágenes obtenidas durante el proceso de montaje y finalmente se presenta alguna foto del equipo listo para funcionar.

En el Capítulo10 se recogen imágenes donde se muestra en primer lugar las dos PCB diseñadas para el funcionamiento del equipo tras haber soldado todos los componentes. Al final se explica de forma breve, empleando fotos a modo de ayuda, el montaje de ambas placas dentro de una envolvente y de la instalación de la pantalla táctil en la tapa de dicha envolvente.

El Capítulo11 recoge la presentación final del equipo completo con un par de fotos.

En el Capítulo12 se muestran los resultados de una serie de pruebas y se presentan los productos solicitados por el cliente ya fabricados que integran los LEDs. Finalmente, se incluye un apartado explicando cómo el ruido eléctrico afecta negativamente a la medida de la temperatura y todas las medidas que se han tomado para reducirlo.

El Capítulo13 presenta las conclusiones tras el desarrollo del equipo. También se presentan varias discusiones en cuanto a alguna elección tomada durante el desarrollo, ofreciendo alternativas que podrían mejorar el diseño y el valor del equipo. Posteriormente, se presenta un apartado de trabajo futuro donde se explica la línea de trabajo en la que se debe de seguir tras el desarrollo de este equipo.

Posteriormente, en el Capítulo14, Capítulo15 y Capítulo16, se presentan las referencias consultadas durante el desarrollo del TFM, la planificación seguida para el mismo, y el presupuesto respectivamente.

Finalmente, se adjuntan los ocho anexos de la memoria a los que se hace referencia a lo largo de la misma. El contenido de cada uno se explica en el momento en el que se refiere al lector a uno concreto.

---

*Aprovechando el formato digital de este documento, se han ido incluyendo enlaces a diversos contenidos en línea tales como webs de fabricantes consultados, especificaciones de los adhesivos utilizados, hojas de características de componentes electrónicos, etc. Estos enlaces se han ido insertando en el texto como hipervínculos y se pueden identificar por un subrayado bajo la palabra o el concepto al que hacen referencia, como el que lleva a la página web del máster para el que se desarrolla este TFM.*

*De forma análoga a los enlaces externos en línea, se han insertado hipervínculos que permiten navegar a lo largo de la memoria, facilitando la consulta de un apartado o capítulo concreto al que se hace referencia desde otra parte del texto.*

---

## 2. ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TÉCNICOS

### 2.1. Adhesivos anisotrópicos

Como se ha introducido en el Capítulo 1 de esta memoria, para la fijación de componentes electrónicos en circuitos flexibles se utilizan adhesivos. Estos adhesivos generalmente son electroconductivos, por lo que permiten fijar el componente al sustrato y a la vez permiten la conexión eléctrica de los pines de los componentes con las pistas de dicho circuito. En función de la dirección de esta propiedad electroconductiva, los adhesivos se pueden clasificar como adhesivos isotrópicos y adhesivos anisotrópicos.

Los adhesivos isotrópicos son aquellos cuya conductividad se da en todas las direcciones, de forma análoga a como lo hace el estaño utilizado en las PCBs. Estos adhesivos pueden dar lugar a cortocircuitos si los componentes a fijar son pequeños y más aún si dichos componentes tienen los pines muy próximos. Como solución a este problema surgen los adhesivos anisotrópicos que se explican detalladamente a continuación por ser los utilizados a lo largo de todo el desarrollo del TFM.

Los adhesivos anisotrópicos son aquellos que poseen la capacidad de conducir la corriente eléctrica en una única dirección, generalmente en el eje Z, es decir en el eje perpendicular al plano sobre el cual los componentes van a ser pegados. De esta forma el adhesivo comunica eléctricamente cada uno de los pads impresos en el circuito flexible con cada uno de los pines de dicho componente. Esto elimina el problema de la aparición de cortocircuitos que ocurre con el uso de adhesivos isotrópicos, ya que aunque el adhesivo toque físicamente dos pines del componente, no existe conexión eléctrica entre ellos.

Estos adhesivos facilitan en gran medida la fijación de componentes pequeños ya que no es necesario un dispensado del mismo tan preciso como en el caso del adhesivo isotrópico. En este caso se dispensa adhesivo suficiente que cubra todos los pads del circuito y la precisión se limita al correcto posicionamiento del componente, de forma que cada pin del integrado quede colocado sobre el pad correspondiente.

Los fabricantes de adhesivos han generado dos versiones diferentes de adhesivos anisotrópicos. Una de ellas se trata de un fluido o cola de baja viscosidad y la otra es una lámina flexible. A pesar de que este TFM no tiene como objetivo estudiar este tipo de adhesivos sino el desarrollo de un equipo para su uso, a continuación se explica de forma breve y sencilla el principio de funcionamiento de ellos para ayudar al lector a comprender el funcionamiento y las necesidades de dicho equipo.

El fabricante *Amada Miyachi*, ofrece un documento técnico [1] en el que explica de forma detallada el funcionamiento y la composición de dichos adhesivos. Como se puede leer en él, tanto el fluido como la lámina flexible están compuestas de pequeñas partículas electroconductivas suspendidas en el adhesivo. Estas partículas tienen forma esférica y poseen un tamaño de entre 3 y 12µm. Normalmente se tratan de partículas de oro, plástico bañado en oro o grafito aunque existen más materiales en función de las necesidades de la unión tales como resistencia electroconductiva, resistencia mecánica, posibilidad de uniones reversibles...

Sea cual sea el material de estas partículas, antes del proceso de unión, todas ellas están separadas mediante una matriz aislante de adhesivo. En la *Figura 5* se muestra una representación esquemática en el caso de utilizar la versión de la cinta flexible (ACF), siendo similar en el caso de utilizar la versión de la cola.

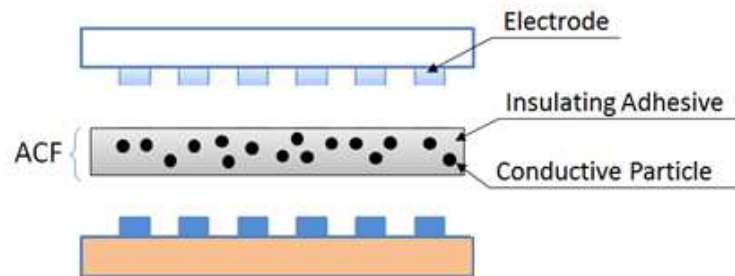


Figura 5. Representación esquemática antes de comenzar el proceso de unión.

El proceso comienza colocando el adhesivo entre el circuito y el componente a fijar como se muestra en la *Figura 5*. Posteriormente se aplica una temperatura y una presión sobre el componente durante un cierto tiempo, causando la deformación plástica del adhesivo y la compresión de las partículas conductoras. Como se puede ver en la *Figura 6*, las partículas son atrapadas entre los pads impresos en el circuito y los pines del componente conduciendo únicamente en el eje vertical.

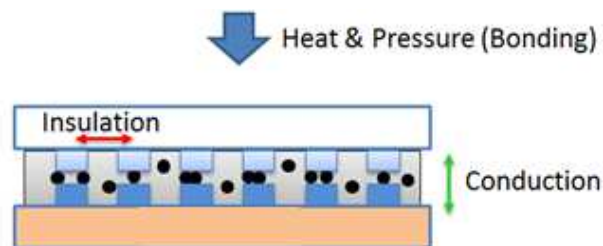


Figura 6. Representación esquemática tras finalizar el proceso de unión.

Este proceso permite que pueda llegar a haber entre 100 y 1000 partículas por cada pista tras el proceso de unión, dando lugar a la conexión eléctrica entre el componente y el circuito impreso. A continuación se presentan dos imágenes obtenidas con un microscopio electrónico de barrido (*SEM*) de una única partícula de 5µm.

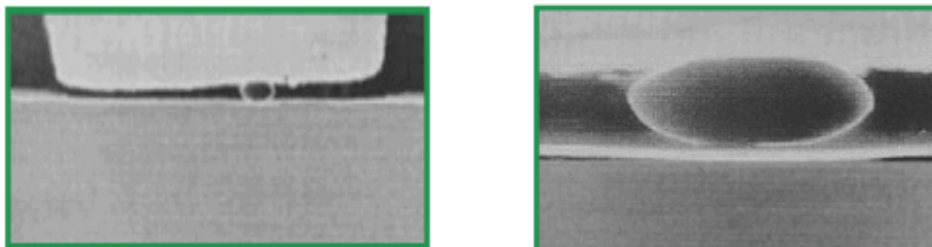


Figura 7. Imágenes obtenidas con un microscopio electrónico de barrido de una partícula de 5µm.

## 2.2. Equipos *thermodes* comerciales

Como ya se ha mencionado varias veces, el proceso de unión utilizando adhesivos anisotrópicos, tanto la versión en cinta flexible como la versión de cola, se basa en la aplicación de una cierta presión sobre el componente a la vez que se mantiene sobre el mismo una temperatura determinada, todo ello durante un tiempo concreto. Este es el funcionamiento muy resumido de un *thermode* como el que los fabricantes de adhesivos recomiendan utilizar a la hora de fijar componentes en circuitos electrónicos, tanto flexibles como rígidos.

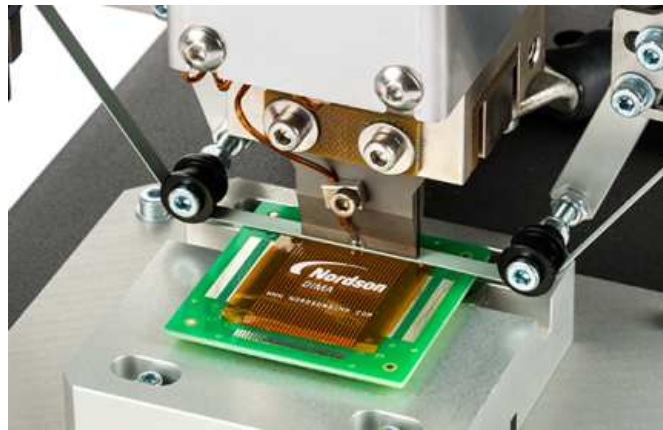


Figura 8. Imagen detalle del proceso de unión utilizando cinta anisotrópica (Nordson).

Se trata de un proceso cuyas variables son la presión, la temperatura y el tiempo. Estas tres variables no siempre son las mismas sino que dependen de parámetros químicos de composición del adhesivo que en este caso no son de nuestro interés. Para el uso de estos adhesivos tan solo hay que consultar la hoja de especificaciones y analizar estas tres variables del proceso que en ocasiones son tres valores concretos y en algún caso se trata de un perfil de temperatura. En la *Figura9* se presenta un ejemplo del primer caso.

Bonding Conditions	
Temperature <sup>(1)</sup>	160 - 190°C
Pressure	20 - 30 kg/cm <sup>2</sup>
Time <sup>(1)</sup>	10 - 20 sec

Figura 9. Parámetros del proceso de unión de una cinta anisotrópica del fabricante 3M.

Llegados a este punto se han consultado un gran número de equipos comerciales con el fin de ver las diferentes variedades que hay en cuanto a forma, capacidad de presión, capacidad de temperatura, rango de alimentaciones, etc. Para obtener un poco de información técnica sobre dichos equipos se han consultado principalmente tres fabricantes que se enumeran a continuación:

- *Amada Miyachi.*
- *Nordson Dima.*
- *AIT (Advanced Integrated Technologies).*



Figura 10. Principales fabricantes de *thermodes* consultados para el análisis de este tipo de equipos.

Se tratan de tres fabricantes altamente especializados en equipos de soldadura y fijación de componentes sobre circuitos impresos tanto flexibles como rígidos. Estos tres fabricantes disponen de equipos integrados que se comercializan completos y listos para comenzar a trabajar con ellos. Se muestra un ejemplo en la *Figura11*.



Figura 11. Equipo comercial modelo *C-Prime* del fabricante *Nordson Dima*.

Todos los fabricantes de este tipo de equipos dividen sus equipos integrados como el mostrado en la *Figura11* en tres principales partes: la fuente de alimentación, el actuador neumático y el cabezal del *thermode*. Debido a esto ofrecen soluciones modulares, pudiendo adquirir cada una de esas tres partes de forma individual. A continuación se explica de forma breve la función y los aspectos más relevantes de cada parte.

La fuente de alimentación. Se trata de un equipo complejo cuya función es el control de todo el equipo. Como consecuencia de ello, incluye todo el software necesario para establecer las consignas de los parámetros del proceso, configuración de perfiles de temperatura y demás funcionalidades. Además es la fuente que suministra la corriente necesaria para alcanzar y mantener la temperatura de referencia en el cabezal del *thermode* que estará en contacto con el componente. A continuación se muestra una imagen del modelo *Uniflow4 Pulsed Heat Control System* del fabricante *Amada Miyachi*.





Figura 12. Fuente modelo Uniflow4 Pulsed Heat Control System (Amada Miyachi).

El módulo neumático. Se trata del actuador neumático que se encarga de ejercer la presión necesaria para llevar a cabo el proceso de unión. Debe de ir anclado a la estructura del equipo de forma sólida ya que los requerimientos de presión de estos equipos son altos. Existen gran variedad de modelos en función de la presión que se necesite en la aplicación y del tipo de cabezal de *thermode* a utilizar. A continuación se muestra un modelo del fabricante *AIT*, un modelo con regulación de velocidad y capaz de trabajar con presiones de hasta 6 bar.



Figura 13. Módulo neumático modelo NA-221 del fabricante AIT.

El cabezal del *thermode*, en ocasiones denominado simplemente como *thermode*. Se trata de la pieza que va anclada al módulo neumático y que a través de ella el cilindro ejerce la fuerza sobre el componente a fijar sobre el circuito impreso.

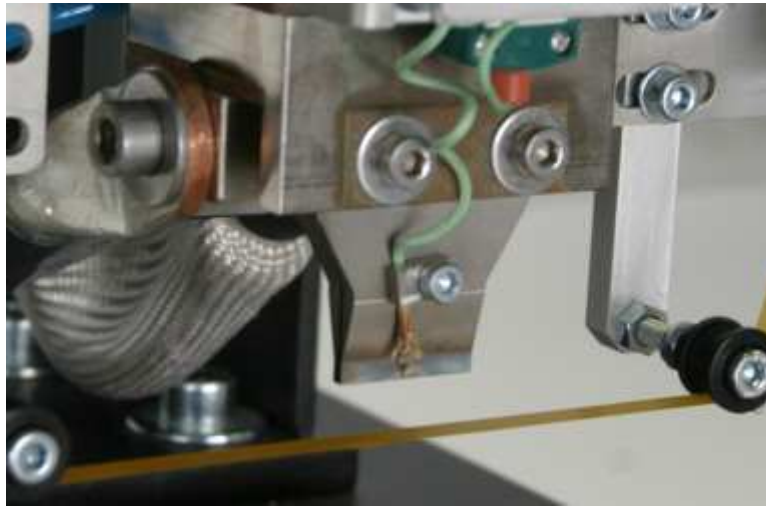


Figura 14. Imagen detalle de un *thermode* montado sobre un actuador neumático.

Los fabricantes han desarrollado una amplia gama de cabezales con el fin de adaptarse de forma muy precisa a la aplicación en la que el cliente esté interesado, existiendo diversas formas y tamaños. En la *Figura15* se muestran dos ejemplos diferentes.

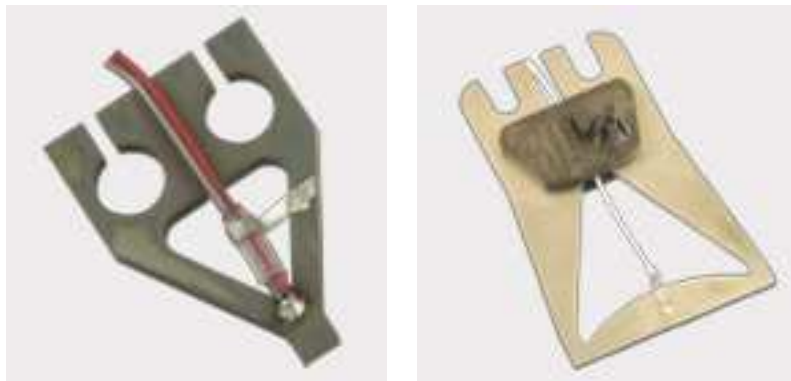


Figura 15. Ejemplos de cabezales *thermodes* disponibles del fabricante AIT.

Como se puede ver en la *Figura15*, el cabezal de la izquierda está orientado para la unión de componentes de forma cuadrada y de pequeña dimensión. También existen cabezas alargadas para fijar componentes alargados como el cable plano propio de las pantallas LCD.

Sea cual sea el modelo seleccionado, todos tienen dos cosas en común, la primera de ellas es que o bien disponen de un sensor de temperatura en su extremo o bien un emplazamiento para instalar uno. El segundo aspecto común es la forma general en V, es decir, la única zona común entre ambos lados del *thermode* es el extremo inferior, existiendo dos anclajes en el extremo superior aislados uno en cada lado. Esto es así porque los *thermodes* se anclan al módulo neumático y se unen con la fuente de alimentación conectando cada uno de los dos polos de la misma con cada uno de los laterales superiores del *thermode*. De esta forma,

cuando la fuente de alimentación ofrece en su salida una tensión controlada utilizando el sensor de temperatura, la corriente circula por el *thermode* elevando la temperatura del extremo inferior del mismo como se muestra en la *Figura16*.

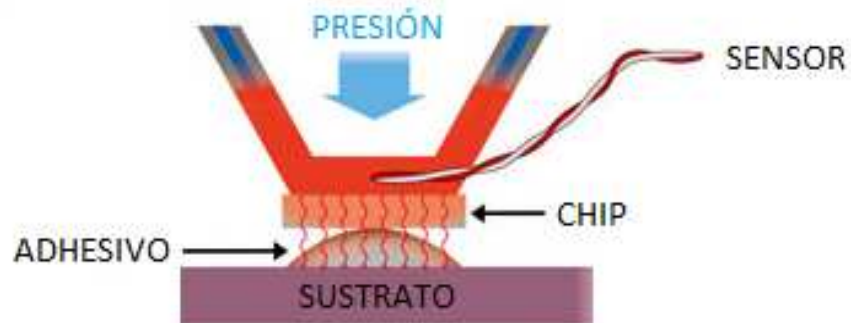


Figura 16. Esquema de la circulación de corriente a través del extremo del *thermode* (AIT).

Como consecuencia del uso de corriente para controlar la temperatura en el *thermode*, la selección del cabezal es un aspecto muy importante. Aspectos como la forma y el tamaño son importantes a la hora del tiempo necesario para alcanzar la temperatura ya que *thermodes* más grandes serán térmicamente más lentos. Otro aspecto muy importante es el material, ya que las propiedades de resistividad del mismo condicionan aspectos claves como por ejemplo el rango de corriente necesario para alcanzar las temperaturas de trabajo. Existen varios materiales comúnmente utilizados por los fabricantes de *thermodes* como por ejemplo acero inoxidable, molibdeno o tungsteno. El fabricante *Amada Miyachi* ofrece una interesante guía [2] que puede ayudar a selección de un *thermode* adecuado de acuerdo a la aplicación concreta, y el tamaño y la forma del componente a fijar.

### 3. DISEÑO CONCEPTUAL DEL EQUIPO

Antes de comenzar con el desarrollo del equipo planteado para este TFM se han llevado a cabo una serie de pruebas iniciales de forma manual. Dichas pruebas están recogidas en el AnexoA y han sido un paso importante para el desarrollo del equipo.

Tras analizar los resultados obtenidos tras estas pruebas, se ha desarrollado una primera versión manual del equipo que permite observar aspectos importantes del proceso que condicionan el correcto funcionamiento del componente fijado. Esta versión se basa en una herramienta de aluminio diseñada a medida, en la que se ha instalado una resistencia calefactora con el objetivo de alcanzar y mantener una temperatura de referencia. En dicha herramienta se ha instalado un sensor de temperatura que sirve como realimentación para el lazo de control implementado en Arduino. El desarrollo en detalle de esta primera versión del equipo se puede consultar en el AnexoB.

Tras dicho desarrollo, se han llevado a cabo varias pruebas presentadas en el AnexoC, comprobando el correcto funcionamiento del equipo y teniendo por tanto, un planteamiento inicial sobre el cual poder comenzar a diseñar el equipo final. En los siguientes párrafos se resume la idea general de funcionamiento, mencionando las diferentes partes que componen el equipo desarrollado. Todas estas partes, se encuentran detalladas con mayor profundidad en los capítulos sucesivos de acuerdo al esquema presentado en la *Figura17*.

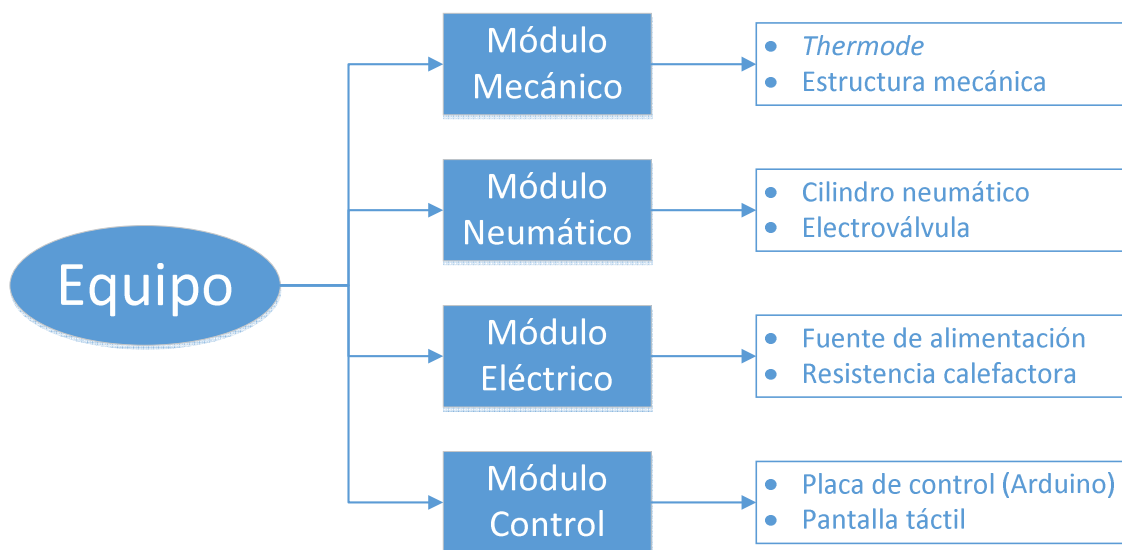


Figura 17. Esquema de los diferentes módulos que conforman el equipo.

En primer lugar es necesaria la herramienta que ejercerá la presión y temperatura sobre el componente a fijar, el *thermode*. Dicha pieza debe de ir integrada en un módulo neumático que permita su movimiento vertical. Dicho módulo estará compuesto en primer lugar por un cilindro neumático, el responsable de ejercer la fuerza requerida durante el proceso. El segundo componente que integrará dicho módulo es un actuador capaz de accionar el cilindro.

Con el objetivo de alimentar todos los componentes del equipo, es necesario una fuente de alimentación. Esta fuente será la encargada también de suministrar la energía necesaria para elevar y mantener la temperatura del *thermode* durante el proceso, a través de una resistencia calefactora como la utilizada en el equipo presentado en el *AnexoB*.

Como es obvio, es necesario fabricar y diseñar una estructura mecánica que permita integrar todas las piezas del equipo como el cilindro, los *thermodes*, la electroválvula, etc.

Finalmente, es necesario un hardware de control. En este caso consistirá en una placa de desarrollo comercial de Arduino. Este hardware se encargará del control de todo el equipo de forma conjunta, y será el microcontrolador encargado de gestionar el lazo de control de temperatura necesario para el *thermode*, empleando un sensor de temperatura *NTC* como método de lectura del valor en cada momento.

Con el fin de hacer más sencilla e intuitiva la interfaz entre el equipo y el operario, se dotará al sistema con una pantalla táctil que permitirá la configuración de los parámetros del proceso y la selección de los diferentes modos de funcionamiento.

A continuación se presenta un esquema que muestra de forma gráfica el diseño conceptual del equipo y la relación y localización de las partes más importantes.

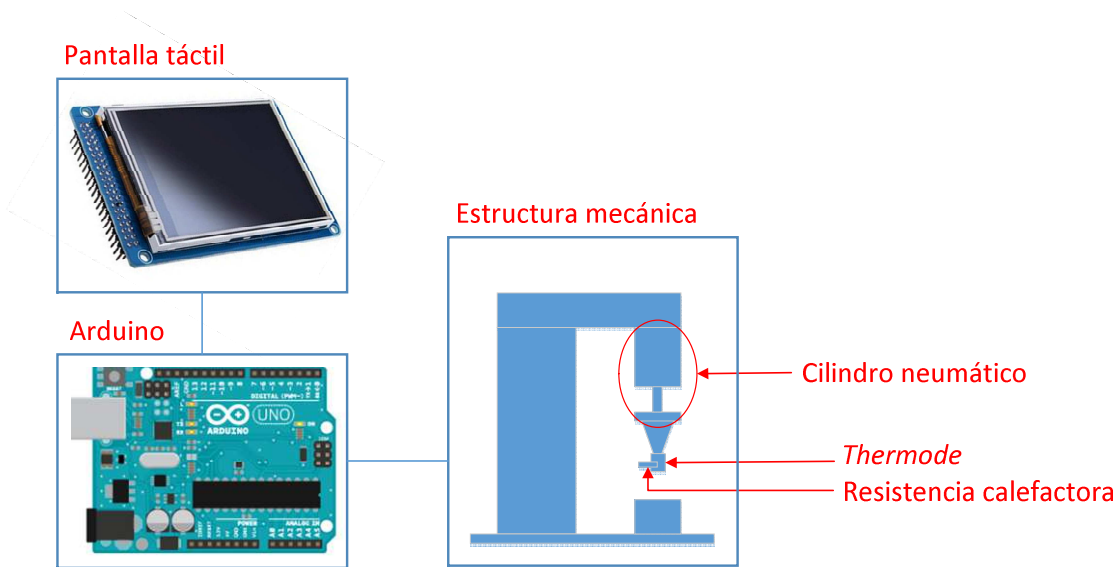


Figura 18. Esquema gráfico del diseño conceptual del equipo.

## 4. DISEÑO MECÁNICO

Tras toda la información consultada, se ha podido comprobar que todos los equipos comerciales son diferentes. Cada fabricante instala los elementos en una posición concreta e incluso hay fabricantes que integran pequeños módulos específicos en su equipo, como un sistema de dos motores para bobinar y desbobinar la cinta anisotrópica, o un sistema de visión artificial para controlar de forma micrométrica el proceso. A pesar de estos detalles específicos, todos los equipos mantienen una estructura básica común.

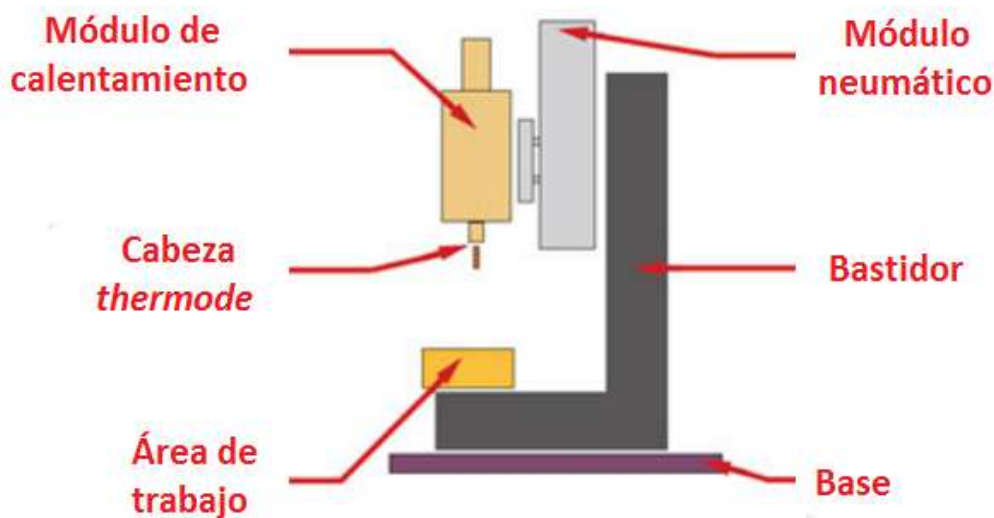
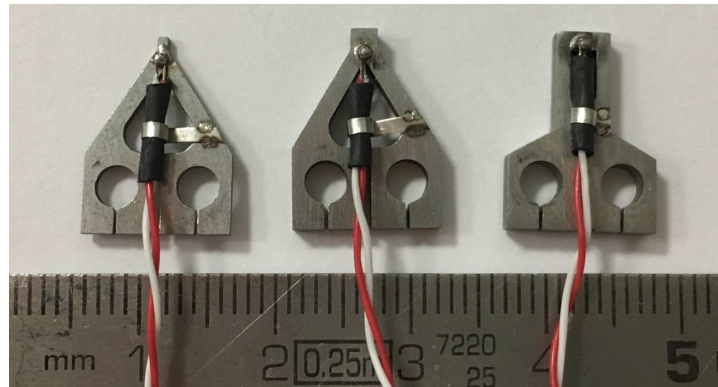


Figura 19. Esquema de la estructura básica de un *thermode* comercial.

### 4.1. Selección de cabeza *thermode*

En primer lugar es necesario seleccionar el cabezal *thermode* que se instala en el equipo y que está en contacto con el componente a fijar. Como ya se ha mencionado en el estado del arte, existe una amplia gama de *thermodes* comerciales. El fabricante Amada Miyachi ofrece una guía [2] para seleccionar uno adecuado de acuerdo a los objetivos que se busquen. Tras consultar las opciones y fabricantes disponibles, se seleccionan varias unidades de diferentes tamaños en dos materiales que se enumeran en la *Tabla1*. El fabricante informa de las diferencias entre ambos materiales. El tungsteno tiene una mayor resistencia mecánica, importante teniendo en cuenta que se va a ejercer cierta presión, y presenta una mayor conductividad eléctrica por lo que se necesita más energía para calentar la pieza y el calentamiento es más lento. Por el contrario, el molibdeno tiene una menor conductividad eléctrica por lo que la energía necesaria es menor y el calentamiento es más rápido. Ambos tienen la ventaja de ser materiales de alta densidad con un muy alto punto de fusión y un buen comportamiento eléctrico. En la *Figura20* se muestra una foto de los diferentes tamaños que se han seleccionado.

Material	Dimensiones	Ud.
Molibdeno (Mo)	0.8 x 0.8 mm	2
Molibdeno (Mo)	2 x 2 mm	2
Molibdeno (Mo)	2 x 4 mm	2
Tungsteno (W)	0.8 x 0.8 mm	1
Tungsteno (W)	2 x 2 mm	1
Tungsteno (W)	2 x 4 mm	1

Tabla 1. *Thermodes* adquiridos.Figura 20. *Thermodes* adquiridos de los tres tamaños diferentes.

## 4.2. Chasis e integración del cilindro neumático

De acuerdo a esta estructura representada en la *Figura19*, se comienza el diseño mecánico del equipo utilizando el software de diseño *Solidworks*. Dicho diseño se lleva a cabo partiendo del cilindro neumático. De esta forma, dicho cilindro se encuentra orientado de forma opuesta al sentido en el que se debe ejercer la fuerza sobre el componente, por lo que dicha fuerza es aplicada durante la carrera de entrada del cilindro, siendo la posición de reposo del equipo cuando el vástago se encuentra en posición extendida.

En la *Figura21* se representan tres capturas tomadas durante el diseño para facilitar la comprensión por parte del lector de la idea explicada en el párrafo anterior sobre el sentido de colocación del cilindro neumático. En las capturas, el cilindro se encuentra con el vástago recogido, es decir, en el momento en el que se está ejerciendo la fuerza en el componente.

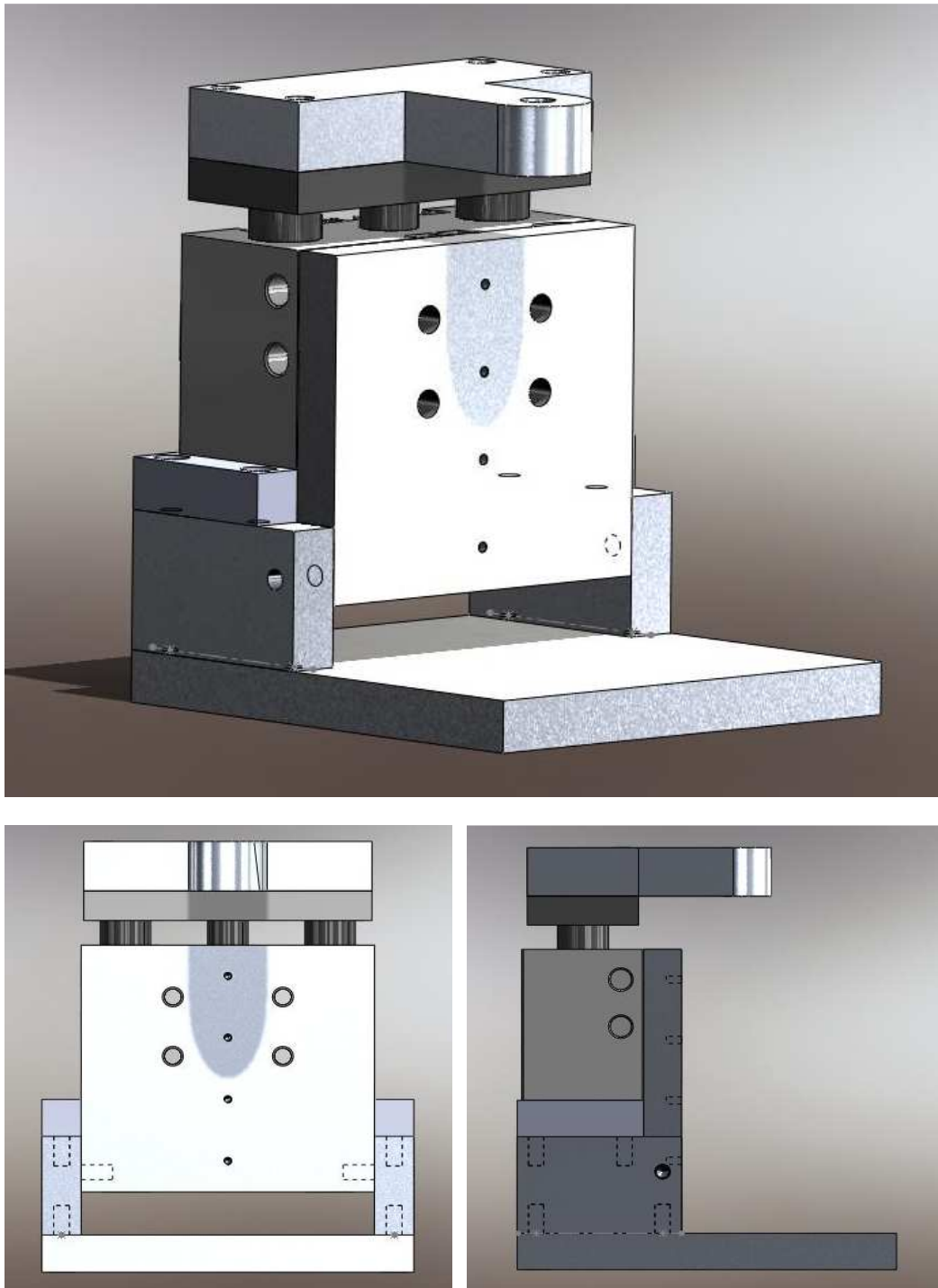


Figura 21. Capturas tomadas durante el diseño del chasis del equipo (Solidworks).

### 4.3. Pieza para fijar los *thermodes* al equipo

Posteriormente se diseña la pieza que permite fijar las cabezas *thermodes* adquiridas en el equipo. En el caso de que dichas piezas se calentasen empleando corriente, esta pieza debería de ser aislante por lo que, a pesar de utilizar finalmente una alternativa que se explicará más adelante, parece correcto seleccionar un material aislante para una posible modificación futura.



El material seleccionado finalmente es PEEK, un plástico ya empleado en la primera versión que presenta un buen comportamiento mecánico y soporta elevadas temperaturas. Dicha pieza debe moverse verticalmente para ejercer la fuerza sobre el componente a fijar. En las conclusiones del AnexoC se ha comentado la necesidad de que la fuerza sea totalmente vertical al componente para asegurar una correcta conexión eléctrica entre el componente a fijar y el circuito impreso. Como consecuencia, se ha adquirido una guía lineal y un patín. En la Figura22 se muestra una foto de la guía y el patín adquiridos.



Figura 22. Foto de la guía y el patín adquiridos para el movimiento vertical del *thermode*.

Con el fin de integrar ambos elementos en el modelo 3D desarrollado en el *Solidworks*, se ha diseñado la guía y el patín de acuerdo a los adquiridos y se han integrado en el conjunto.

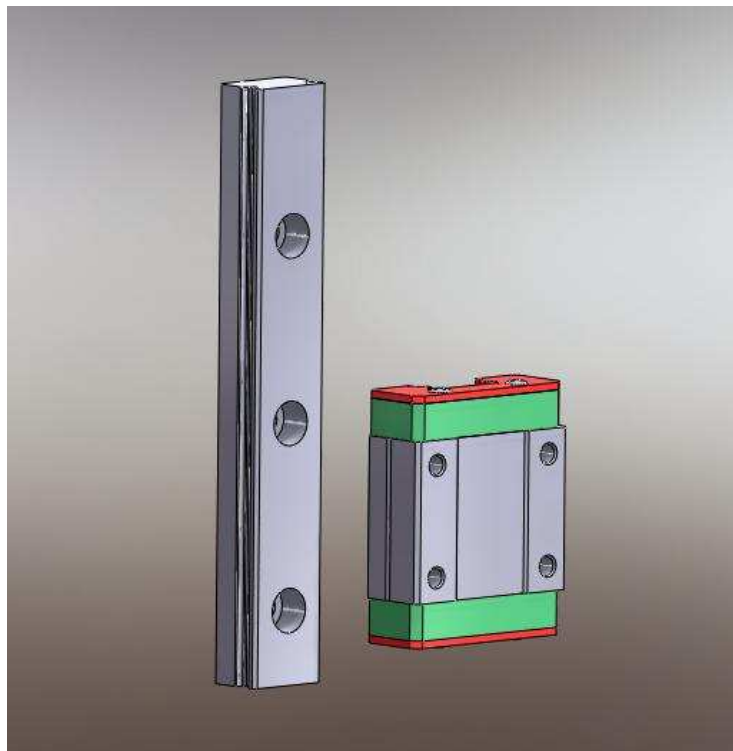


Figura 23. Modelo 3D de la guía y el patín adquiridos.

Dicha guía se fija al chasis del equipo como se muestra en la imagen de la izquierda de la Figura24, y sobre el patín se ancla la pieza de PEEK como se muestra a la derecha de la misma figura, logrando la linealidad requerida durante el movimiento vertical del *thermode*.

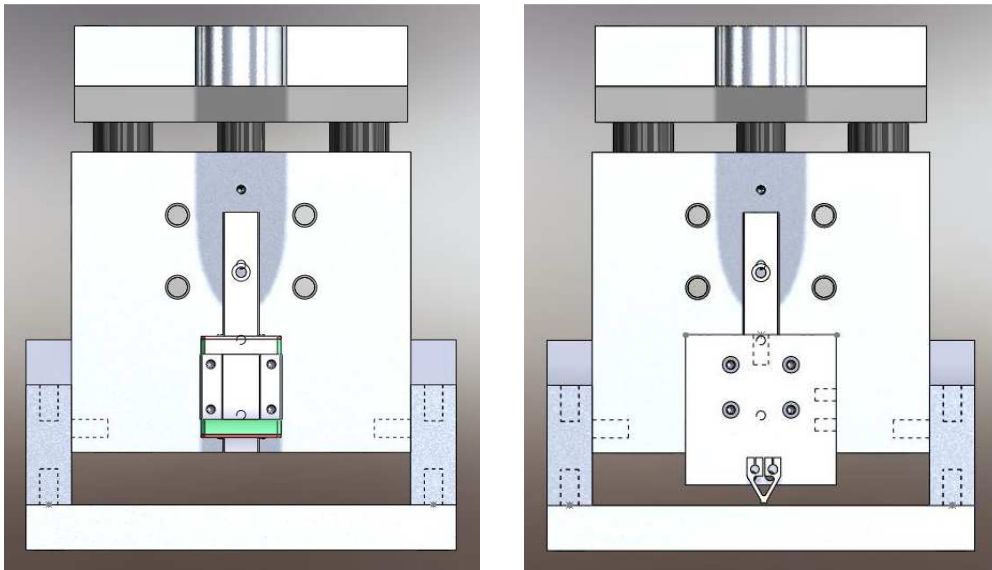


Figura 24. Capturas tomadas durante el diseño de la fijación de la guía y la pieza de PEEK sobre ésta.

#### 4.4. Muelle de compresión como método de transmisión de la fuerza

Diseñado el chasis que integra el cilindro encargado de hacer la fuerza requerida durante el proceso y la pieza que permite anclar los *thermodes*, el siguiente paso es el diseño de un mecanismo que permita transmitir la fuerza desde entre ambas partes. Para ello, en un primer momento se estableció un sistema fijo como un tornillo como método de transmisión de la fuerza ya se trata de una opción sencilla.

Posteriormente, se analizaron los posibles problemas que se podrían dar durante el proceso como consecuencia de una unión fija. En primer lugar, la fuerza ejercida sobre el componente sería la misma que la ejercida por el cilindro neumático, eliminando cualquier posible control salvo la presión de la alimentación neumática. En segundo lugar, la fuerza sería aplicada de forma brusca, lo que puede suponer un problema a la hora de utilizar el equipo para fijar componentes delicados como los LEDs de tamaño  $240 \times 320 \mu\text{m}$ .

Contemplando estos dos detalles se ha seleccionado un muelle de compresión como elemento de transmisión de la fuerza entre cilindro y *thermode*. Este muelle va fijado por la parte inferior a la pieza que ancla el *thermode* y por la parte superior se ha soldado una tuerca que permite regular la altura a lo largo de un tornillo roscado fijado al cilindro neumático. Con esta configuración se puede controlar la fuerza transmitida desde el cilindro al *thermode* conociendo los parámetros del muelle, solucionando el primer detalle comentado en el párrafo anterior. Además permite una transmisión de la fuerza de forma suave, beneficiando el proceso cuando el equipo se emplee para componentes de pequeño tamaño, lo que soluciona el segundo aspecto mencionado antes.

De acuerdo al diseño mecánico del equipo y con el objetivo de emplear el último método explicado es necesario un muelle con los siguientes parámetros aproximados.

Parámetro	Valor
Diámetro interno	$\geq 10\text{mm}$
Diámetro externo	$\leq 18\text{mm}$
Longitud en reposo	60mm
Carrera	20mm

Tabla 2. Tabla de parámetros necesarios para la selección de un muelle.

En la tabla anterior se añade el parámetro *Carrera*. Dicho parámetro indica que con una carrera de 20mm, el muelle debe de ser capaz de ejercer el límite superior del rango de fuerza para el que el equipo ha sido diseñado, 300 Newton. En el caso de querer modificar el rango de trabajo, con esta configuración simplemente sería necesario modificar el muelle, buscando uno con un constante de elasticidad adecuada a los requerimientos.

En este caso, la máxima fuerza requerida es de 300N por lo que se lleva a cabo una búsqueda de un muelle que cumpla con los requerimientos recogidos en la *Tabla 2*. El muelle finalmente seleccionado es del fabricante *MuelleStock*, y su referencia es *204512*. Se trata de un muelle cuyos parámetros de fabricación se presentan en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor
Diámetro interno	12 mm
Diámetro externo	17 mm
Longitud en reposo	60 mm
Hilo	2.5 mm
Paso	7.5
Espiras útiles	8
Cte. elasticidad, K	1.6016 DaN/mm
Material	Acero inoxidable

Tabla 3. Parámetros de fabricación del muelle de compresión seleccionado.

Conocida la constante de elasticidad del muelle, es posible comprobar que cumple con la fuerza requerida de 300N en la carrera disponible de 20mm. Pasando los DaN/mm a N/mm,

$$1.6016\text{DaN/mm} = 16.016\text{N/mm}$$

Ecuación 1. Conversión de DaN/mm a N/mm de la constante K del muelle.

Dividiendo la fuerza requerida entre la constante del muelle se obtiene la carrera necesaria para aplicar dicha fuerza, comprobando que es menor que la carrera máxima permitida de acuerdo al diseño mecánico, 20mm. Como consecuencia se puede confirmar que este muelle cumple todo los parámetros necesarios.

$$\frac{300\text{N}}{16.016\text{N/mm}} = 18.73\text{mm}$$

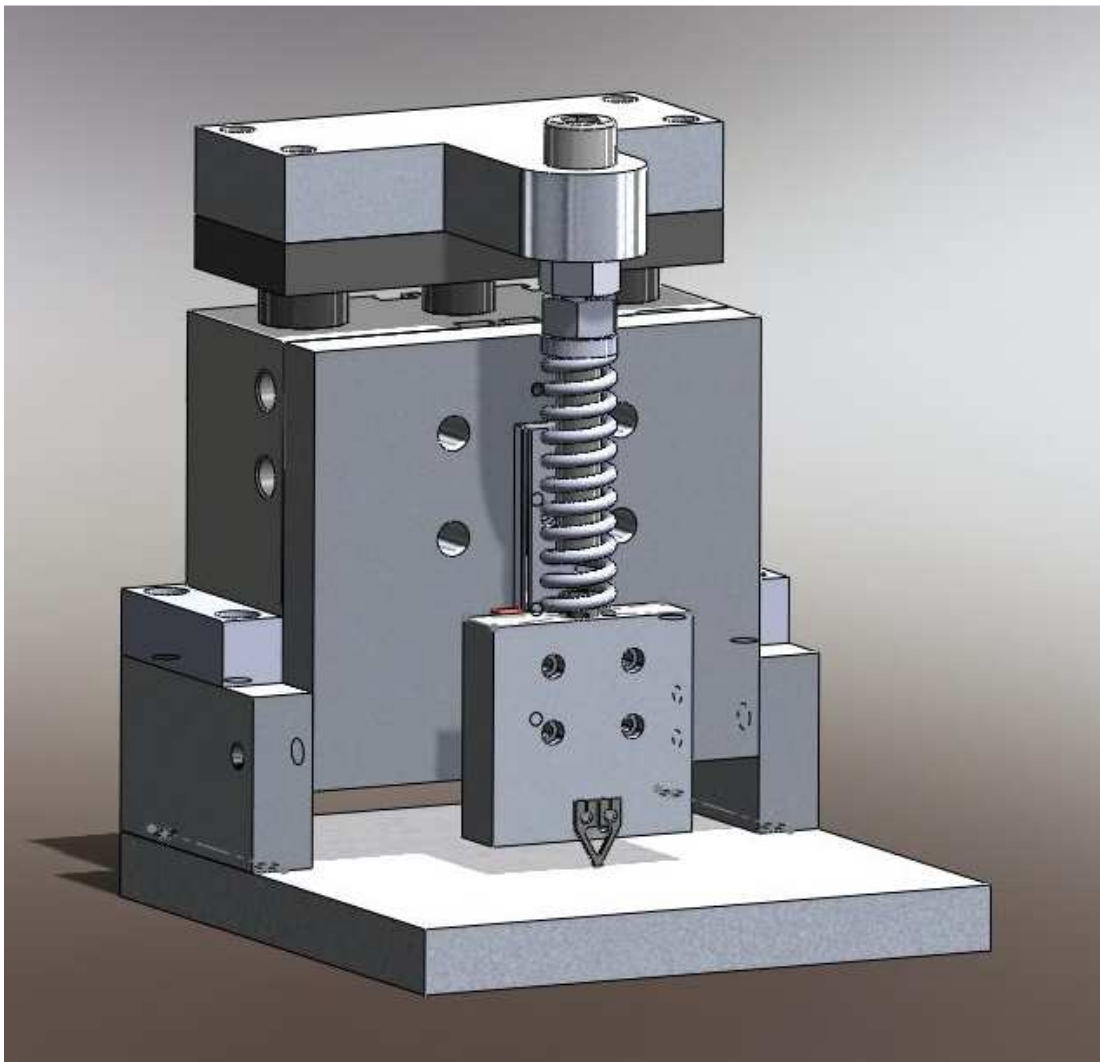
Ecuación 2. Cálculo de la carrera necesaria para aplicar 300N.

Una vez adquirido el muelle es necesario soldar una tuerca que permita variar la posición superior de anclaje del mismo como se ha comentado anteriormente, permitiendo un ajuste de la fuerza transmitida desde el cilindro hacia el *thermode* proporcional a la elongación del mismo. En la *Figura25* se muestra una foto del muelle tras soldar la tuerca.



Figura 25. Muelle seleccionado tras haber soldado la tuerca de ajuste.

El muelle con la tuerca soldada se introduce en el modelo 3D obteniendo un diseño del conjunto como el que se muestra en las diferentes capturas de la *Figura26*.



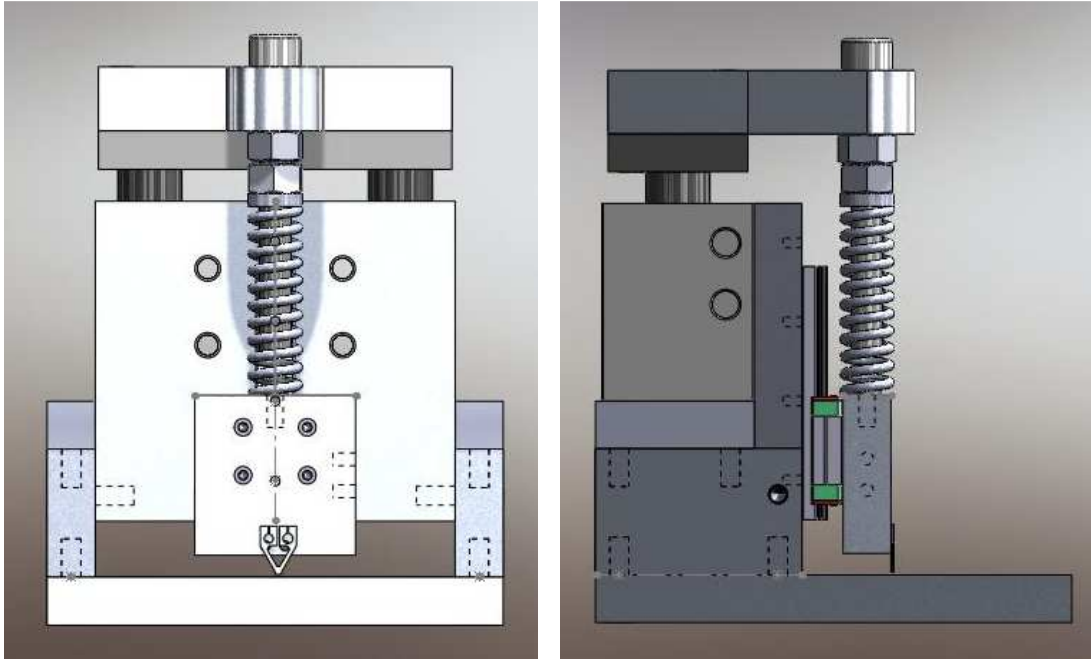


Figura 26. Capturas tomadas del modelo 3D del equipo completo.

En este momento el diseño del equipo está completo en el caso de que los *thermodes* se calienten empleando el método comercial, es decir, con el paso de corriente.

#### 4.5. Pieza para fijar la resistencia al *thermode*

Como se explica más adelante, en el [Apartado 6.2](#), se ha optado por una alternativa al paso de corriente para calentar los *thermodes*, el empleo de una resistencia calefactora. Como consecuencia, es necesario el diseño de una pieza específica que permita fijar la resistencia al *thermode*. Además, en dicha pieza se incluye un pequeño orificio con el objetivo de instalar un sensor de temperatura por si en algún futuro se adquieren *thermodes* que no incluyan un sensor propio o si por alguna razón se desea utilizar un sensor externo.

Dicha pieza se ha diseñado de forma que el resto del equipo no deba de modificarse sea cual sea la opción elegida para calentar el *thermode*, o bien empleando el paso de corriente o bien la resistencia calefactora. Se trata de un anclaje que se coloca entre la pieza de PEEK explicada anteriormente y el *thermode*, por lo que para su instalación en el equipo tan solo es necesario retirar el *thermode*, colocar este anclaje, colocar de nuevo el *thermode* y finalmente volver a fijar los tornillos. En la [Figura 27](#) se presenta una captura en la que se puede ver la pieza junto con el *thermode*.

En cuanto al material, se ha seleccionado el acero inoxidable [AISI 304](#), ya que se trata de un acero que presenta buenos parámetros de resistencia mecánica y tiene una buena conducción de calor, detalle importante ya que el objetivo de esta pieza es transmitir la energía térmica generada por la resistencia hasta el *thermode*.

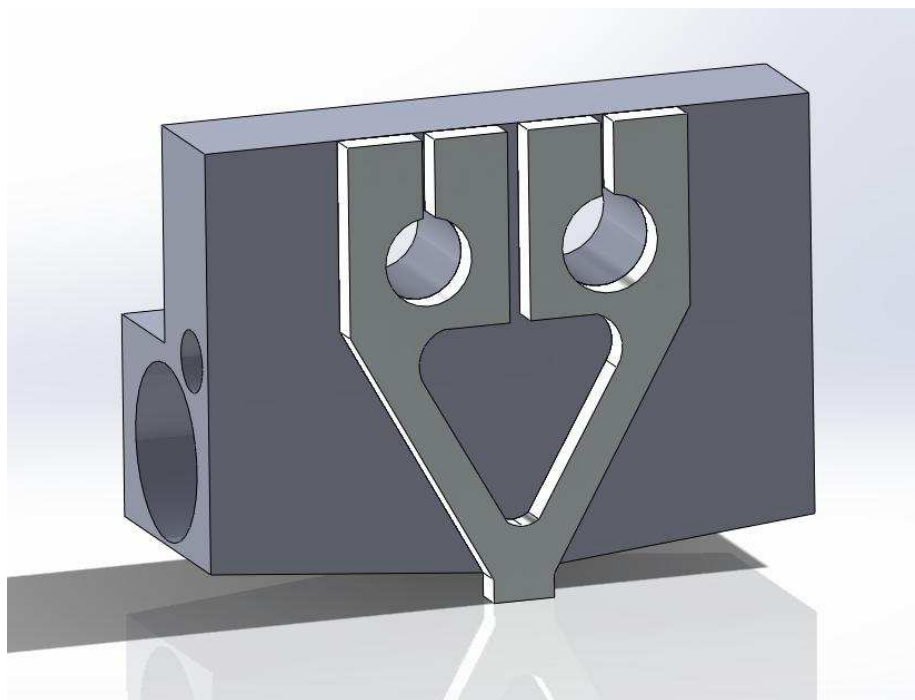


Figura 27. Captura del diseño del conjunto formado por la herramienta y el *thermode*.

## 5. DISEÑO NEUMÁTICO

### 5.1. Cilindro neumático

Para dimensionar de forma correcta la parte neumática del equipo, se han evaluado los adhesivos anisotrópicos que se van a utilizar tras el desarrollo del equipo. Además se ha comprobado que los adhesivos utilizados para la fijación de componentes sobre circuitos flexibles, principal objetivo del equipo a desarrollar, tienen unos requerimientos de presión similares. No obstante, a continuación se presenta la información de los dos adhesivos de los que Fundación PRODINTEC dispone.

El primero de ellos se trata de 3M Anisotropic Conductive Film 7379, un adhesivo en forma de cinta flexible cuya hoja de características apunta la necesidad de una fuerza de 20-30kg/cm<sup>2</sup> para el correcto funcionamiento de la unión.

El segundo es DELO-MONOPOX AC365, un adhesivo en forma de cola cuya hoja de características dice que se ha de ejercer una fuerza de 1.5N sobre un integrado de 0.8x0.8mm. Dado a que este fabricante especifica la fuerza en una unidad diferente, el primer paso es referir esta fuerza a la misma unidad que el primer adhesivo, kg/cm<sup>2</sup>.

Según la *primera ley de Newton* se cumple  $F[N] = m[kg] \cdot a[m/s^2]$  por lo tanto, despejando esta fórmula y sustituyendo la fuerza se pueden calcular los kg a aplicar.

$$\frac{1.5N}{9.8m/s^2} = 0.153kg$$

Ecuación 3. Kilogramos a aplicar sobre un componente de 0.8x0.8mm.

Según la información del fabricante, esta es la fuerza a aplicar sobre un componente de 0.8x0.8mm, por tanto se puede calcular la fuerza requerida para un chip de 1 cm<sup>2</sup>.

$$\frac{0.153kg}{0.0064cm^2} = 23.9kg/cm^2$$

Ecuación 4. Kilogramos a aplicar sobre un componente de 1 cm<sup>2</sup>.

En la siguiente tabla se recoge la fuerza que se requiere para ambos adhesivos anisotrópicos, que como se puede ver están en el mismo rango de valores.

Referencia adhesivo anisotrópico	Fuerza [kg/cm <sup>2</sup> ]
3M Anisotropic Conductive Film 7379	20-30
DELO-MONOPOX AC365	24

Tabla 4. Fuerzas requeridas para el uso de los dos adhesivos anisotrópicos disponibles.

Conocidas las fuerzas requeridas para ambos adhesivos el siguiente paso es la selección de un cilindro neumático capaz de ejercer dichas fuerzas. El cilindro neumático seleccionado es el MGPM32TF-25Z, del fabricante SMC. Se trata de un cilindro de doble efecto con un rango de

presión de trabajo de 0.2 a 1MPa. La hoja de características recoge una tabla con la fuerza capaz de ejercer de acuerdo a la presión de entrada proporcionada.

Bore size (mm)	Rod size (mm)	Operating direction	Piston area (mm <sup>2</sup> )	Operating pressure psi (MPa)								
				29 (0.2)	44 (0.3)	58 (0.4)	73 (0.5)	87 (0.6)	102 (0.7)	116 (0.8)	131 (0.9)	145 (1.0)
32	14	OUT	804	161	241	322	402	483	563	643	724	804
		IN	650	130	195	260	325	390	455	520	585	650

Figura 28. Tabla obtenida del datasheet del cilindro neumático *MGPM32TF-25Z* (SMC).

Pasando las fuerzas máxima y mínima respectivamente de la tabla anterior a las mismas unidades en las que se tienen las fuerzas requeridas para los adhesivos anisotrópicos, se comprueba que este cilindro cumple correctamente con las necesidades por lo que es el cilindro que se utiliza como actuador neumático del equipo a desarrollar. En la *Figura29* se muestra una imagen del cilindro.

$$Fuerza_{m\acute{a}xima} = \frac{804N}{9.8m/s^2} = 81kg$$

$$Fuerza_{m\acute{i}nima} = \frac{161N}{9.8m/s^2} = 16kg$$

Ecuación 5. Fuerza máxima y mínima en kg del cilindro neumático *MGPM32TF-25Z* (SMC).



Figura 29. Foto del cilindro seleccionado para el módulo neumático en el desarrollo del equipo.



## 5.2. Regulador de presión proporcional

El control de la fuerza en el proceso de fijado es un factor clave, ya que aplicar más o menos fuerza de la requerida puede dar lugar a un funcionamiento incorrecto o al deterioro del componente fijado. Por este motivo, el control de la presión neumática aplicada en el cilindro es una forma de regular la fuerza que se ejerce sobre el componente durante el proceso. Como consecuencia de esto, se lleva a cabo un análisis de productos comerciales que sirvan para desarrollar tal control.

Tras este análisis, se concluye que la mejor solución se trata de regulador proporcional o válvula proporcional. Dentro de estas válvulas existen dos tipos, las que permiten regular el caudal y las que permiten regular la presión. Para este proyecto, el tipo que nos interesa son las que permiten regular presión. Estas válvulas ofrecen una presión de salida regulable y proporcional a la presión de entrada, normalmente fija, utilizando una señal de control.

Aplicando esto al equipo que estamos desarrollando, la presión de entrada de esta válvula proporcional será constante, concretamente la presión de la línea neumática general de Fundación PRODINTEC. Utilizando una señal de control, se regula la presión de salida proporcionalmente a la presión de entrada conocida. De esta forma, se consigue tener a la salida de la válvula proporcional la presión deseada en función de la fuerza que requiera el proceso, dependiendo del adhesivo y del tamaño del componente.

El fabricante *SMC* dispone de un amplio catálogo de este tipo de válvulas por lo que se utiliza a modo de guía para definir que producto se debe de adquirir. Para seleccionar la válvula adecuada se establece en primer lugar el rango de presión de trabajo de acuerdo al cilindro neumático seleccionado, de 0.2 a 1MPa. Posteriormente, se comprueba que existen varias series de productos en función del caudal, desde los 6 litros por minuto, representado a la derecha en la *Figura30*, hasta los 4000 litros por minutos, representado a la izquierda.



Figura 30. Válvulas proporcionales del fabricante SMC.

Dado que para este equipo el caudal de aire no es un parámetro condicionante, se selecciona la serie compacta representada a la derecha en la figura anterior. Dicha serie se puede configurar previamente a la adquisición por tanto se selecciona una referencia con 24 voltios de tensión continua como alimentación. En cuanto a la señal de control, existen varias opciones, mostradas en la *Figura31*, seleccionando finalmente la opción 3 de una señal de 0 a 10 voltios de continua.

0	Current type 4 to 20 mA DC
1	Current type 0 to 20 mA DC
2	Voltage type 0 to 5 VDC
3	Voltage type 0 to 10 VDC

Figura 31. Opciones de la señal de control de la válvula proporcional seleccionada.

Tras toda esta selección de parámetros de la válvula proporcional, el configurador del fabricante *SMC* ofrece la referencia *ITV0050-3N*.

Como se ha comentado al inicio de este apartado, la válvula proporcional es una buena opción a la hora de controlar la fuerza ejercida sobre el componente ya que controla de forma continua la presión del aire introducido al cilindro, pero existen otras opciones. Si bien se trata de una solución que ofrece un control exacto y una gran flexibilidad para futuras modificaciones, quizás sea una solución sobredimensionada en este momento ya que durante el proceso la fuerza requerida no varía. De hecho, la fuerza a aplicar se debe de variar solo en el caso de cambiar el adhesivo utilizado y/o el área del componente a fijar, por lo que es posible llevar a cabo un control de dicha fuerza fuera del proceso de forma más sencilla y mantener dicha fuerza durante el mismo.

Por este motivo, la idea de usar una válvula proporcional ha sido analizada y como consecuencia se ha seleccionado una del fabricante *SMC* de acuerdo a las especificaciones del equipo. No obstante, para el desarrollo del equipo final, no se va a utilizar ya que se empleará una solución alternativa, basada en el uso de un muelle de compresión, que se explicará más adelante, *Apartado4.4*.

### 5.3. Electroválvula

Dado a que en el equipo final no se va a utilizar la válvula proporcional, se utiliza una válvula de tipo todo-nada para el control del cilindro neumático seleccionado. Se recuerda que se trata de cilindro de doble efecto, detalle necesario para la selección de una electroválvula. Por este motivo la selección se reduce a aquellas con función 5/2. Concretamente se busca una cuyo funcionamiento sea simple, es decir, que tenga una única señal de control y cuando no se actúe sobre la misma la electroválvula vuelva a su posición de reposo automáticamente. El esquema de la electroválvula buscada se presenta en la *Figura32*.

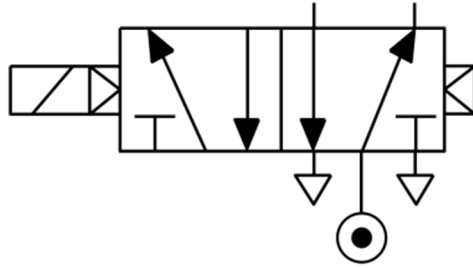


Figura 32. Esquema de electroválvula 5/2.

Para la selección de la electroválvula, se establecen unos criterios similares a los establecidos para la selección de la válvula proporcional, 24 voltios de tensión continua como alimentación y un rango de presión de 0.2 a 1MPa. Consultando el [catálogo](#) del fabricante SMC de válvulas de 5 vías y utilizando el configurador de producto empleado para la válvula proporcional, el fabricante ofrece la referencia SY5120-5DZ-01F-Q.



Figura 33. Electroválvula 5/2 seleccionada del fabricante SMC.

## 6. DISEÑO ELÉCTRICO

### 6.1. Alimentación de los *thermodes*

Como ya se ha explicado en el estado del arte de forma breve, los equipos comerciales empleados para el uso de adhesivos anisotrópicos utilizan corriente para calentar los *thermodes*. De forma resumida, estos equipos disponen de fuentes de alimentación de una alta potencia que proporcionan en su salida una baja tensión, lo que permite obtener una alta corriente. Dicha corriente se hace pasar por el *thermode* y debido a su pequeña sección éste alcanza una alta temperatura, lo que se conoce por efecto *joule*.

Los fabricantes de estas fuentes solo tienen información sobre las especificaciones de entrada de este tipo de fuentes, es decir, la alimentación que requieren. En el momento en el que se busca algún parámetro sobre la salida de las mismas, se comprueba que esta información no está disponible en sus respectivas páginas web. Como consecuencia, parece necesario ponerse en contacto con varios fabricantes con el fin de conocer alguna información de la salida de este tipo de fuentes, tensión, corriente, tipo de señal...

En primer lugar se contacta con el fabricante *AIT (Advanced Integrated Technologies)*. Este fabricante envía un datasheet de una fuente comercial en el que se pueden observar los parámetros de salida. Esta fuente es la *TCW-315* y se trata de una fuente de alimentación y control especialmente diseñada para un equipo *thermode*. Una vez consultado el datasheet se obtiene la información representada en la *Figura34* respecto de la salida.

Item		Pulse heat reflow power supply
Type		TCW-315
Power voltage		AC200-230V 10% 50/60Hz 4A
Max output	RANGE 5	Output voltage 3.50V 750.0VA
	RANGE 4	Output voltage 2.47V 530.3VA
	RANGE 3	Output voltage 1.75V 375.0VA
	RANGE 2	Output voltage 1.24V 265.2VA
	RANGE 1	Output voltage 0.88V 187.5VA

Figura 34. Especificaciones de salida de la fuente de alimentación *TCW-315* del fabricante *AIT*.

Posteriormente se consulta al fabricante *Amada Miyachi* por un equipo comercial que tiene en su catálogo de productos, concretamente el equipo *Uniflow 4 Pulsed Heat Control*. Este fabricante proporciona el datasheet de dicho equipo, del que se obtiene la información presentada en la *Figura35*.

Tras estas dos consultas a fabricantes, se puede conocer el rango de los parámetros eléctricos que proporcionan a la salida las fuentes de alimentación comerciales orientadas al calentamiento de *thermodes*. Se trata de especificaciones no comunes, ya que estos equipos se pueden resumir como un transformador cuya función es proporcionar en su salida una baja tensión y una muy alta corriente.

<b>2 kVA transformer (90 – 132 VAC input single phase)</b> Secondary Voltage: 3.81V (Fast) 1.9V (Medium) 1.27V (Slow) 0.95V (Very Slow)	<b>4 kVA transformer (180-264 VAC single phase input)</b> Secondary Voltage: 3.81V (Fast) 1.9V (Medium) 1.27V (slow) 0.95V (very slow)	<b>4 kVA transformer (180-264 VAC single phase input)</b> Secondary Voltage: 7.62V (Fast) 3.8V (Medium) 2.54V (Slow) 1.90V (Very Slow)	<b>2 kVA transformer (180-264 VAC single phase input)</b> Secondary Voltage: 3.81V (Fast) 1.9V (Medium) 1.27V (Slow) 0.95V (Very Slow)	<b>2 kVA transformer (180-264 VAC single phase input)</b> Secondary Voltages: 7.62V (Fast) 3.8V (Medium) 2.54V (Slow) 1.90V (Very slow)
--	---	---	---	--

Figura 35. Especificaciones de salida del equipo *Uniflow 4 Pulsed Heat Control* de *Amada Miyachi*.

Fundación PRODINTEC no dispone de fuentes capaces de ofrecer estos requerimientos y la adquisición de una fuente de este tipo no es el objetivo en este momento. Lo que se busca es el desarrollo propio de un equipo que permita trabajar con los adhesivos anisotrópicos para comprobar de esta forma la viabilidad y las ventajas de los mismos. En el caso de que los resultados de este equipo desarrollado en este TFM sean buenos, toda esta información se utilizará para establecer el trabajo futuro.

En los datasheet que los fabricantes han enviado, se puede comprobar que el rango de temperatura en el que se puede trabajar es muy amplio, pudiendo llegar a los 1000°C en el extremo del *thermode* en un tiempo relativamente pequeño. Como consecuencia de esta apreciación y dado a que el rango de temperatura que interesa en este caso se limita a los 200°C, parece interesante llevar a cabo un test de alimentación comprobando el comportamiento de los *thermodes* empleando una corriente más baja.

Para llevar a cabo este test se emplea la fuente de alimentación con mayor corriente de salida que dispone Fundación PRODINTEC. Esta fuente se trata de la *KEPCO BOP 36-28 MG*, capaz de proporcionar un máximo de 28 amperios. Existen fuentes con mayor corriente de salida pero no a una tensión tan baja como la necesaria, por lo que si la fuente de alimentación no tiene una baja tensión o no está protegida frente a cortocircuitos ésta se dañaría. Esto no ocurre con la fuente seleccionada ya que ajustando la corriente de salida al máximo, ésta detecta el cortocircuito y baja la tensión lo necesario para mantener la consigna de corriente establecida. Los parámetros eléctricos durante el ensayo se incluyen en la *Tabla5*.

Parámetro	Valor
Corriente	27.989 A
Tensión	1.5 V

Tabla 5. Parámetros eléctricos medidos durante el ensayo de alimentación.

<i>Thermode</i>		Temperatura [°C]						
Material	Tamaño	10 seg.	20 seg.	30 seg.	40 seg.	50 seg.	60 seg.	90 seg.
Molibdeno	0.8x0.8	44.9	49.9	54.9	57.4	61.1	63.6	71.1
Molibdeno	2x2	35.0	39.9	43.7	47.4	49.9	52.4	59.9
Molibdeno	2x4	35.0	38.7	43.7	46.2	48.7	49.9	54.9
Tungsteno	0.8x0.8	38.7	43.7	47.4	51.2	54.9	57.4	64.9
Tungsteno	2x2	35.0	39.5	43.7	47.4	49.9	52.4	58.6
Tungsteno	2x4	35.0	37.9	39.9	42.4	44.9	47.4	53.6

Tabla 6. Resultados tras el ensayo de alimentación.

En la *Tabla6* se muestra la temperatura alcanzada durante los primeros 90 segundos de ensayo de los 6 diferentes modelos de *thermode* adquiridos.

En primer lugar se puede confirmar la información proporcionada por el fabricante de los *thermodes* respecto al material, que en su momento había indicado que el molibdeno requería una menor energía que el tungsteno para calentar la pieza si se mantenía la sección.

De dicho ensayo también se puede comprobar que la corriente de 28 amperios utilizada no sirve para alcanzar la temperatura que interesa, ya que se busca un rango de trabajo en torno a 100-200°C y está muy por encima de la alcanzada durante el ensayo. Además de no alcanzar la temperatura deseada, la dinámica de calentamiento es muy lenta.

Se concluye entonces que debido a que la adquisición de un equipo de alimentación comercial no es el objetivo como se ha explicado antes y que la fuente disponible en Fundación PRODINTEC no es suficiente, se busca una alternativa para calentar los *thermodes*.

## 6.2. Alternativa para el calentamiento de los *thermodes*

Llegados a este punto es necesario diseñar una alternativa al método comercial que se emplea para calentar los *thermodes* ya que, como se ha explicado en el apartado anterior, es necesario un gran amperaje para calentarlos.

Debido a que la versión inicial del equipo presentada en el *AnexoB* ha reportado buenos resultados, parece razonable la posibilidad de emplear la misma idea, una resistencia calefactora como método de calentamiento como la representada en la *Figura36*.



Figura 36. Resistencia calefactora empleada en la versión inicial del equipo.

Esta resistencia tiene unos requerimientos eléctricos mucho más asumibles que las fuentes comerciales, con una tensión de alimentación de 12 voltios y una potencia de 40 vatios. A pesar de esto, es capaz de elevar la temperatura por encima del límite superior del rango que se ha establecido para el equipo a desarrollar, siendo ésta de 200°C. Además, la velocidad de calentamiento es rápida. Como consecuencia de este análisis, parece razonable llevar a cabo un ensayo fijando esta resistencia a un *thermode*, midiendo la temperatura alcanzada en el extremo del mismo y el tiempo. Los resultados del ensayo se presentan en la *Tabla 7*.

Tiempo [s]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Temp. [°C]	28.7	42.4	67.3	94.7	120.9	145.8	165.7	190.6	211.8	238.0

Tabla 7. Resultados del ensayo de calentamiento del *thermode* utilizando la resistencia calefactora.

Estas temperaturas se han medido utilizando el termopar ya calibrado integrado en los propios *thermodes*. Hay que tener en cuenta que el método de fijación entre el *thermode* y la resistencia utilizado durante el ensayo era provisional por lo que una gran cantidad de energía se disipaba al aire en lugar de hacerlo al *thermode*. A pesar de esto, este método permite alcanzar el rango de temperatura deseado y no requiere de unas especificaciones tan críticas como el método comercial, por lo que será el método utilizado para calentar los *thermodes* empleados en el equipo. Como consecuencia, en el Apartado 4.4 se ha diseñado una pieza que permite fijar la resistencia al *thermode* aprovechando al máximo la superficie de contacto entre ambos, lo que supone una mejora respecto a los datos recogidos durante el ensayo.

### 6.3. Selección de la fuente de alimentación

En primer lugar es necesario alimentar la placa de desarrollo. En este caso se trata de un Arduino UNO por lo que se puede alimentar a través del conector USB suministrando 5 voltios o bien a través del adaptador específico de alimentación suministrando 7-12 voltios.

En segundo lugar se necesita alimentar la electroválvula seleccionada y presentada en el Apartado 5.3, con referencia *SY5120-5DZ-01F-Q*. Esta electroválvula requiere una alimentación de 24 voltios de tensión continua.

Por último, es necesario alimentar la resistencia calefactora presentada en el apartado anterior como alternativa a la alimentación comercial de los *thermodes*. Esta resistencia se alimenta a 12 voltios de tensión continua con una potencia teórica de 40 vatios, aunque de forma experimental no supera los 3 amperios como se ha visto en el Anexo B.

Elemento	V	I <sub>MAX</sub>	P <sub>MAX</sub>
Arduino UNO	5V	0.25A	1.25W
Resistencia	12V	3A	36W
Electroválvula	24V	0.01875A	0.45W

Tabla 8. Resumen de las tensiones empleadas en el equipo.

En la tabla anterior se presenta un resumen con los parámetros eléctricos de los tres elementos que se han de alimentar y como se puede ver todos tienen tensiones de alimentación diferentes. La opción de adquirir tres fuentes de alimentación no es viable ya que se busca un equipo relativamente compacto y estas aumentarían el peso y el volumen.

En primer lugar cabe destacar que el consumo de la electroválvula es muy bajo, por tanto parece una solución correcta la obtención de esta tensión empleando un circuito de adaptación a partir de una de las otras tensiones. Dicho circuito se presenta en el siguiente apartado.

Con respecto a las otras dos tensiones necesarias, la de 5V y la de 12V, se lleva a cabo una búsqueda de una única fuente que disponga de dos salidas y que cumpla las especificaciones de la *Tabla 8*. Para esta búsqueda se consulta la página del distribuidor *Farnell* y finalmente se selecciona la fuente *TRACOPOWER TXL 060-0512DI*. De acuerdo a la hoja de características de dicha fuente, la máxima corriente capaz de suministrar en cada salida es inferior a la corriente que se necesita en cada una de las dos tensiones en esta aplicación. Además, la máxima potencia es de 60 vatios, por encima de los escasos 40 vatios totales de los tres elementos.

#### 6.4. Diseño de un convertidor *Boost* para la obtención de 24V

Un convertidor *Boost* se puede definir de forma breve como un convertidor DC a DC que obtiene en su salida una tensión continua mayor que la suministrada en su entrada, concretamente lo que se necesita para esta aplicación. La idea es diseñar un circuito en el que se suministre a la entrada 12 voltios, la tensión más alta disponible en la fuente, y permita obtener en la salida la tensión de 24 voltios que se necesita para alimentar la electroválvula.

Para ello, en primer lugar se busca un convertidor *Boost* comercial que cumpla con las especificaciones eléctricas de entrada y salida. Para esta búsqueda se emplea la web del distribuidor de componentes *RS*, que ofrece filtros que hacen muy cómoda la búsqueda de componentes electrónicos a partir de los parámetros eléctricos. El convertidor *Boost* finalmente seleccionado es el *LT1930* del fabricante *Linear Technology*.

De acuerdo a la hoja de características de este integrado, se trata de un convertidor *Boost* con un rango de tensión en la entrada de 2.6 a 16 voltios que ofrece en la salida una tensión de hasta 36 voltios y 1 amperio. Estas especificaciones cumplen correctamente con las necesidades de esta aplicación concreta ya que como se ha explicado, la entrada será de 12 voltios y la salida de 24, con un consumo eléctrico máximo de 0.45 vatios.

En la hoja de características se presentan los esquemas de varias aplicaciones comunes de uso del *LT1930*. El esquema que se seguirá en esta aplicación es el mostrado en la *Figura 37*.

Para obtener una tensión concreta en la salida a partir de la tensión de entrada es necesario ajustar el valor de las resistencias *R1* y *R2*. Además, los condensadores y la bobina también dependen de las tensiones de entrada y salida. Todos estos cálculos están explicados en la propia hoja de características del integrado. En este caso, los componentes seleccionados de acuerdo a los cálculos realizados para el circuito anterior se recogen en la *Tabla 9*.



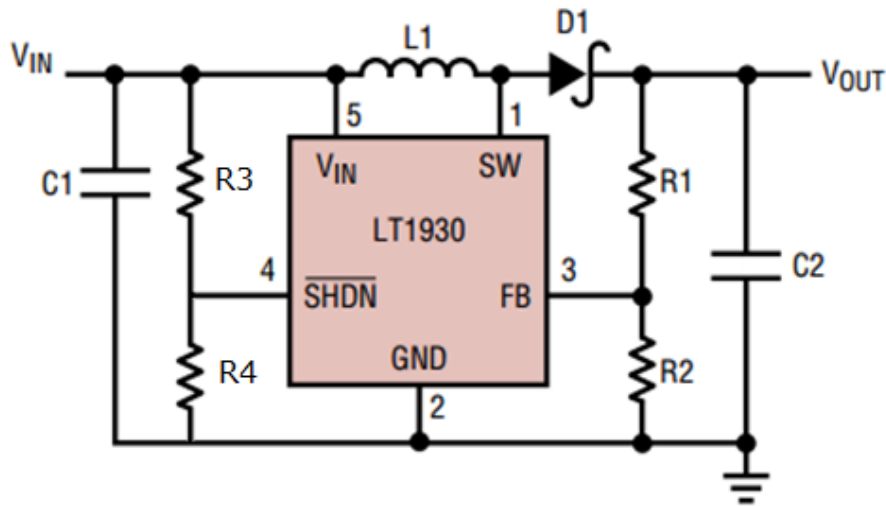


Figura 37. Esquema del circuito diseñado para el Boost empleado en el desarrollo del equipo.

Ref.	Componente	Ref. Farnell	Parámetros
C1	Condensador	1754176	2.2uF, 16V
C2	Condensador	1281865	47uF, 35V
D1	Diodo Schottky	1459070	30V, 1A
L1	Bobina	1636116	10uH, 1,1A
R1	Resistencia	9336230	240KΩ
R2	Resistencia	9335927	13KΩ
R3	Resistencia	9335889	120KΩ
R4	Resistencia	9335889	120KΩ

Tabla 9. Componentes utilizados para el circuito del convertidor Boost.

Una vez se ha diseñado el circuito, se utiliza el *Altium Designer* para diseñar la PCB que se ha de fabricar. Para ello, en primer lugar, es necesario hacer el esquema eléctrico, del que se presenta una captura en la *Figura38*.

Tras tener el circuito, el siguiente paso es el diseño de la PCB. Debido a que se trata de un circuito sencillo en cuanto a número de componentes, se ha limitado el diseño a una sola cara, por lo que todos los componentes se encuentran en la cara superior o *TopLayer*. En la *Figura39*, se presenta el diseño de la *TopLayer* de la PCB desarrollada en dicho programa.

Diseñada la PCB, se fabrica la misma utilizando una fresadora CNC mecánica especialmente diseñada para estas tareas, concretamente la *LPKF ProtoMat S100*. Tras la fabricación de la PCB, se sueldan todos los componentes y se comprueba que funciona como lo esperado, ya que en la conexión *VOOUT* ofrece 24 voltios cuando se alimenta con 12 por *VIN*.

Utilizando esta placa que incluye el convertidor *Boost* diseñado, se consiguen obtener los 24 voltios necesarios para alimentar la electroválvula a partir de los 12 voltios de la fuente seleccionada.

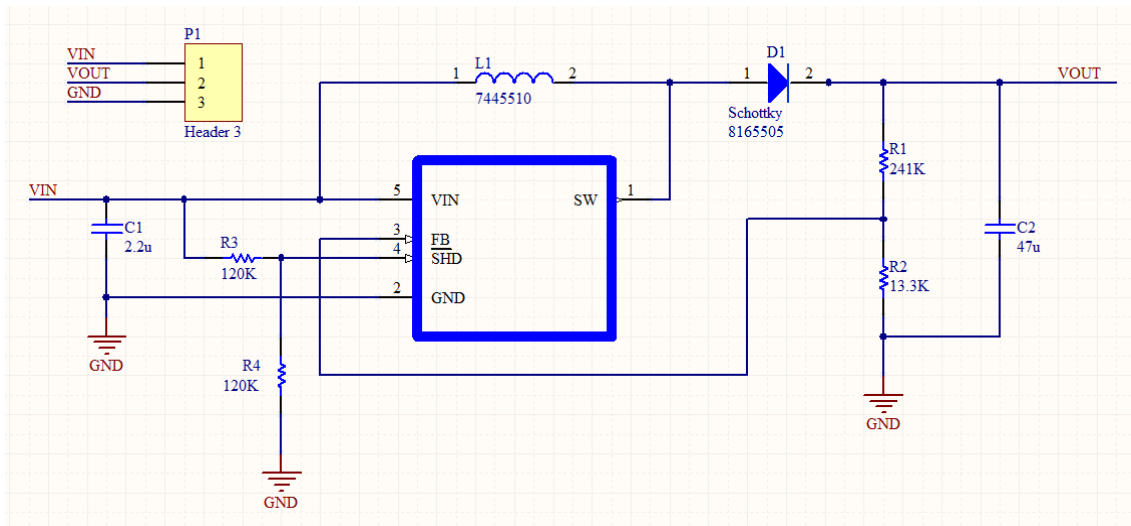


Figura 38. Esquema eléctrico diseñado para la PCB que integra el convertidor Boost.

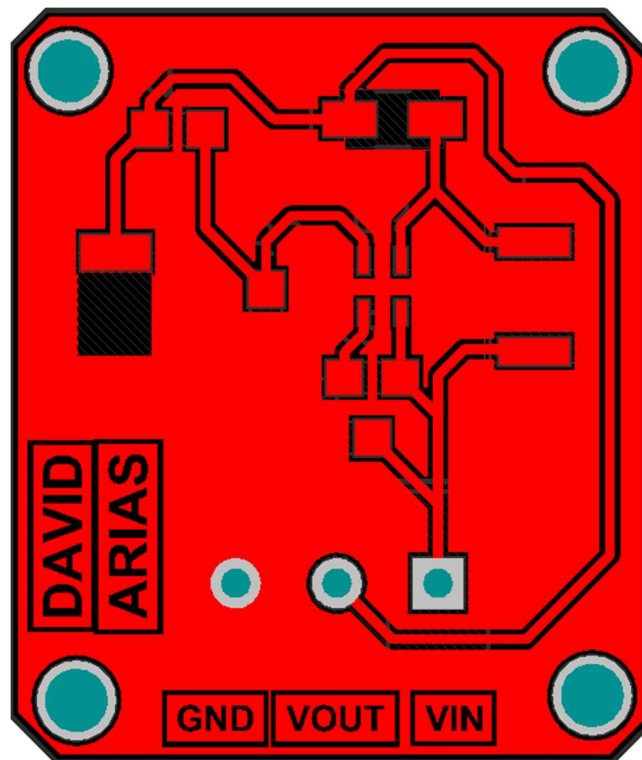


Figura 39. Captura del diseño de la PCB del convertidor Boost.

## 7. DISEÑO SOFTWARE

En los dos primeros apartados de este capítulo dedicado al software, se lleva a cabo la selección del hardware de control y del hardware utilizado como interfaz. Esto se debe a que ambas selecciones repercuten directamente en aspectos software y es el motivo por el que dichos apartados se encuentren al inicio de este capítulo.

### 7.1. Selección del hardware de control

Para el control del equipo desarrollado se han estado analizando dos opciones. La primera de ellas ha sido utilizar un *PLC* básico, concretamente el modelo *LOGO* del fabricante *Siemens*. Se trata de un módulo lógico asequible que ofrece las opciones más básicas de un *PLC* al uso, una buena opción para el control de un sistema sencillo y reducido.

La segunda opción valorada ha sido el uso de una placa de desarrollo comercial, concretamente un *Arduino UNO*. Se trata de la placa de desarrollo empleada para llevar a cabo el control de la primera versión manual del equipo que se ha desarrollado.

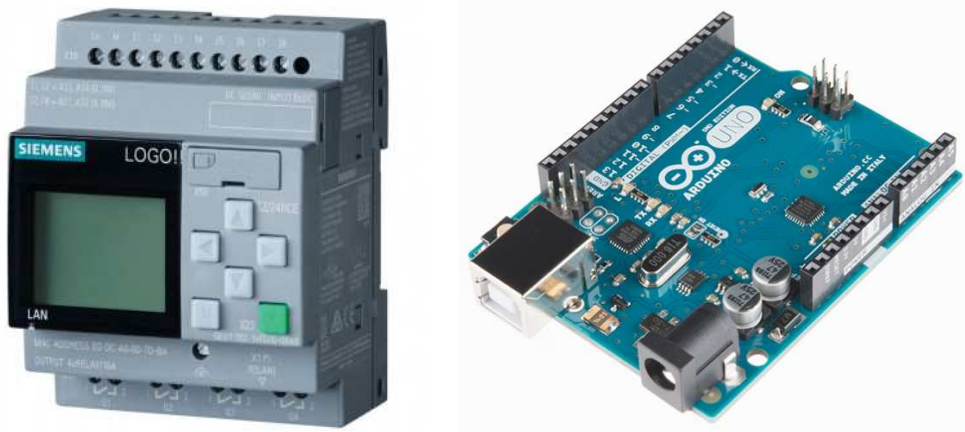


Figura 40. Opciones valoradas para hacer el control del equipo desarrollado.

Las dos opciones presentadas tienen una serie de ventajas e inconvenientes que se han analizado con el fin de seleccionar la mejor opción atendiendo a las necesidades de esta aplicación. Además, la selección de una u otra opción condiciona aspectos de vital importancia como el lenguaje y la metodología de programación, las opciones del desarrollo de una interfaz y demás aspectos. Tras un análisis en profundidad de ambas opciones, se ha seleccionado la placa de desarrollo comercial como hardware de control. Esta selección se justifica con una serie de aspectos que se detallan a continuación.

El primero de ellos se trata del uso de señales analógicas. En el caso del *PLC LOGO* de *Siemens*, para el uso de variables analógicas es necesario adquirir un módulo específico, por lo que supone un mayor gasto. Por el contrario, el *Arduino* integra un convertidor *AD* con el que es

capaz de leer variables analógicas y un módulo de señal *PWM* que ofrece la simulación de señales analógicas de salida.

Otro aspecto importante es la flexibilidad a la hora de añadir componentes al sistema. En el caso de emplear el *PLC*, la adquisición de sensores, pantallas y demás componentes se vuelve estricta, siendo necesario que dichos componentes sean adecuados para el *PLC*. Por el contrario, si se trabaja con el Arduino cualquier dispositivo puede ser utilizado directamente o con pequeñas adaptaciones. Además, se dispone de una amplia variedad de componentes especialmente indicados para su uso sobre Arduino, existiendo gran cantidad de información en la web e incluso librerías que facilitan la programación.

En relación a lo comentado en el párrafo anterior, se quiere desarrollar una interfaz gráfica para el control del equipo y la idea es utilizar una pantalla táctil. Para conectar una pantalla táctil al *PLC* de *Siemens* es necesario que dicha pantalla sea del mismo fabricante y las posibilidades de uso son relativamente limitadas. Por el contrario, existe una amplia variedad de pantallas táctiles diseñadas para su uso con Arduino, posibilitando de forma muy flexible el desarrollo de una interfaz gráfica.

Como consecuencia de estos aspectos mencionados y del menor precio que ofrece esta opción, finalmente se ha decidido utilizar un Arduino UNO como hardware de control.

## 7.2. Tabla de entradas y salidas

Con el objetivo de presentar las señales de las que se dispone para hacer el control del equipo, a continuación se muestran dos tablas en las que se enumeran y se describen las entradas y salidas existentes.

Tipo	Descripción
Analógica	Sensor de temperatura instalado en el <i>thermode</i>
Digital	Final de carrera del cilindro neumático
Digital	Pedal que permite accionar el sistema en modo manual

Tabla 10. Lista de entradas existentes.

Tipo	Descripción
PWM	Control de la resistencia calefactora instalada en el <i>thermode</i>
PWM	Control de la electroválvula que acciona el cilindro neumático

Tabla 11. Lista de salidas existentes.

De forma adicional a estas entradas y salidas, se ha empleado una pantalla táctil sobre la que se ha desarrollado una interfaz gráfica con el objetivo de facilitar el control del equipo de forma cómoda e intuitiva. Dicha pantalla táctil se presenta en el siguiente apartado.



### 7.3.1. Comunicación SPI para el control de la pantalla táctil

Con el objetivo de reducir el número de pines dedicados a la pantalla táctil, se ha seleccionado el modo de comunicación *SPI* para el control de la pantalla. Como se ha mencionado anteriormente, se necesitan 11 pines que se detallan en la *Tabla 12*.

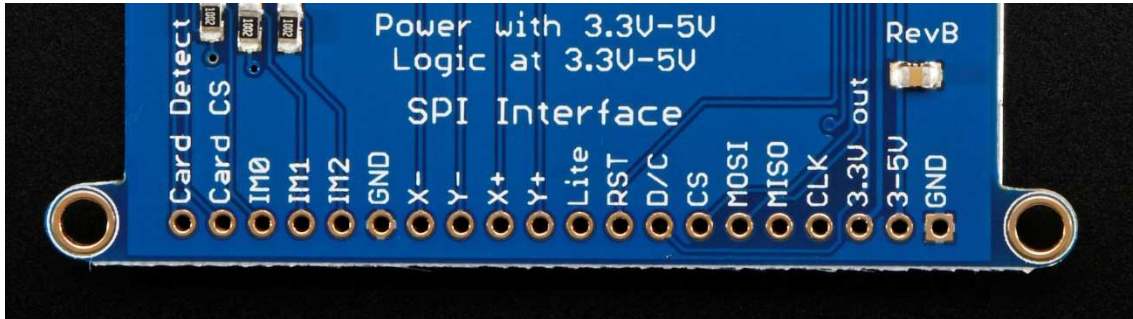


Figura 42. Pines utilizados para la comunicación *SPI* con la pantalla táctil.

Pin	Descripción
GND	Referencia de alimentación.
3-5V	Entrada de alimentación.
CLK	Señal de entrada de reloj <i>SPI</i> .
MISO	"Master In Slave Out". Señal de comunicación pantalla→micro.
MOSI	"Master Out Slave In". Señal de comunicación micro→pantalla.
CS	"Chip select". Selección de chip <i>SPI</i> .
D/C	Selección de datos/comandos.
Y+, X+, Y-, Y-	Pines analógicos para la lectura de la resistencia de la parte táctil.

Tabla 12. Pines utilizados para la comunicación *SPI* con la pantalla táctil.

### 7.3.2. Instalación de librerías para el control de la pantalla por SPI

Para el control de la pantalla utilizando el modo de comunicación *SPI*, es necesario descargar e instalar tres librerías que a continuación se detallan. Las tres librerías se pueden descargar en el repositorio *GitHub* y los enlaces de descarga se detallan en el tutorial [3].

- 1- En primer lugar, la librería de *AdaFruit* desarrollada especialmente para comunicarse con el controlador que integra la pantalla seleccionada, el *HX8357*.
- 2- En segundo lugar, se ha de instalar la librería gráfica de *AdaFruit* que integra funciones para la representación de formas geométricas y la escritura.
- 3- Finalmente, se necesita la librería de *Arduino TouchScreen* que integra funciones que permiten la lectura de las pulsaciones en pantalla.

### 7.4. Diagrama de estados del equipo

Seleccionado el Arduino como hardware de control del *thermode* y la pantalla táctil como hardware de la interfaz, el siguiente paso es diseñar la parte software de dicho equipo. Para ello es necesario llevar a cabo un análisis del funcionamiento que se quiere programar en el equipo, los diferentes modos de operación y demás aspectos. Previamente a la programación del equipo, se ha realizado un diagrama de estados o *StateChart* básico empleando la herramienta *MATLAB*. En [4], *D.Harel* profundiza en el concepto, el diseño y el uso de la metodología del *StateChart*. En este proyecto el diagrama que se utiliza es muy básico por lo que se ha considerado prescindible profundizar en dicha metodología.

El propósito del siguiente diagrama es mostrar al lector de forma detallada los estados implementados en la máquina y las condiciones que se han de dar para que el equipo evolucione de un estado a otro. Con el fin de ampliar la información básica recogida en el gráfico, a continuación se irán explicando cada uno de los estados junto con las acciones que el equipo ha de llevar a cabo, representadas en el gráfico mediante funciones. También se explican de forma detallada las condiciones de evolución entre los estados del equipo.

Para cada uno de los estados, se presenta una tabla con una descripción del mismo, las acciones que el equipo lleva a cabo cuando entra en dicho estado, *ENTRY*, las acciones que lleva a cabo el tiempo que está en el mismo, *DO*, y finalmente las condiciones que se han de dar para salir de ese estado y evolucionar hacia el siguiente. Además, como se ha diseñado una pantalla específica para cada estado de la máquina, se aprovecha este apartado para presentarla junto con la información que se va a explicar de cada uno de los estados.

El siguiente diagrama se puede ver con un mayor tamaño en el *AnexoF*.

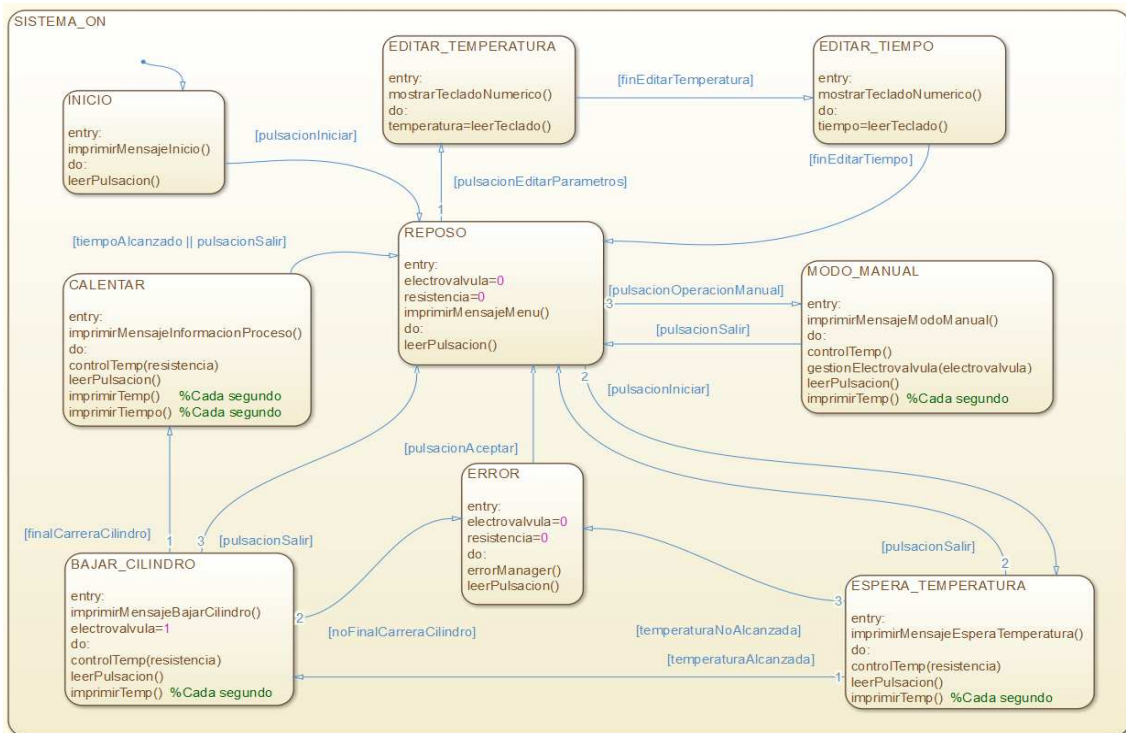


Figura 43. Diagrama de estados o *StateChart* del equipo desarrollado.

### 7.4.1. Estado *INICIO*


<b>Descripción</b>	Estado en el que el sistema se encuentra tras conectar el equipo a la red. Es un estado al que no es posible volver a llegar hasta una nueva conexión.
<b>Entry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>imprimirMensajeInicio()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un mensaje de inicio y un botón de inicio.</li> </ul>
<b>Do</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>leerPulsacion()</i>: función que se encarga de comprobar si se ha pulsado alguno de los botones existentes en ese momento en la pantalla.</li> </ul>
<b>Transiciones</b>	→ <i>REPOSO</i> : en el caso de que el usuario presione el botón de iniciar.
<b>Diseño Interfaz</b>	

Tabla 13. Información del estado *INICIO*.

### 7.4.2. Estado *REPOSO*

<b>Descripción</b>	Hace referencia al estado en el que el equipo se encuentra una vez ha sido conectado a la red e iniciado pero no está trabajando en ninguno de sus modos de operación.
<b>Entry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>electroválvula=0</i>: cuando el equipo se encuentra en el estado de reposo la salida de control de la electroválvula debe de ser 0 para que el cilindro se encuentre en su posición de reposo.</li> <li>• <i>resistencia=0</i>: de forma análoga, la salida de control de la resistencia debe de ser 0 para que el sistema no caliente en reposo.</li> <li>• <i>imprimirMensajeMenu()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un mensaje con los parámetros de temperatura y tiempo configurados y los botones correspondientes a las opciones disponibles desde el menú principal.</li> </ul>
<b>Do</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>leerPulsacion()</i>: función que se encarga de comprobar si se ha pulsado alguno de los botones existentes en ese momento en la pantalla.</li> </ul>
<b>Transiciones</b>	→ <i>EDITAR_TEMPERATURA</i> : en el caso de haber presionado <i>Editar</i> . → <i>MODULO_MANUAL</i> : en el caso de haber presionado <i>Operación Manual</i> . → <i>ESPERA_TEMPERATURA</i> : en el caso de haber presionado <i>Iniciar</i> .



<p><b>Diseño Interfaz</b></p>	
-------------------------------	--

Tabla 14. Información del estado *REPOSO*.

**7.4.3. Estado *EDITAR\_TEMPERATURA***


<p><b>Descripción</b></p>	<p>Estado en el que el usuario utiliza un teclado numérico para cambiar la temperatura configurada que se debe alcanzar durante el proceso.</p>
<p><b>Entry</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>mostrarTecladoNumerico()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un teclado numérico a través del cual el usuario puede cambiar la referencia para el parámetro de temperatura.</li> </ul>
<p><b>Do</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>temperatura=leerTeclado()</i>: función que se encarga de leer las pulsaciones del usuario sobre el teclado numérico y almacenar la temperatura introducida en una variable de configuración.</li> </ul>
<p><b>Transiciones</b></p>	<p>→<i>EDITAR_TIEMPO</i>: el sistema evoluciona una vez se han introducido 3 dígitos o el usuario ha pulsado la tecla <i>Siguiente (&gt;)</i>.</p>
<p><b>Diseño Interfaz</b></p>	

Tabla 15. Información del estado *EDITAR\_TEMPERATURA*.

7.4.4. Estado *EDITAR\_TIEMPO*

<b>Descripción</b>	Estado en el que el usuario utiliza un teclado numérico para cambiar el tiempo configurado que se debe llevar a cabo el proceso.
<b>Entry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>mostrarTecladoNumerico()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un teclado numérico a través del cual el usuario puede cambiar la referencia para el parámetro de tiempo.</li> </ul>
<b>Do</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>tiempo=leerTeclado()</i>: función que se encarga de leer las pulsaciones del usuario sobre el teclado numérico y almacenar el tiempo introducido en una variable de configuración.</li> </ul>
<b>Transiciones</b>	→ <i>REPOSO</i> : el sistema evoluciona una vez se han introducido 2 dígitos o el usuario ha pulsado la tecla <i>Siguiente (&gt;)</i> .
<b>Diseño Interfaz</b>	 <p>The image shows a small LCD screen mounted on a metal plate. The screen displays a numeric keypad with digits 1-9, 0, and a right arrow (&gt;). To the right of the keypad, the text reads: 'INTRODUCIR TIEMPO', 'MIN: 5', 'MAX: 60', and a small empty rectangular box below. The keypad is arranged in a 4x3 grid.</p>

Tabla 16. Información del estado *EDITAR\_TIEMPO*.

7.4.5. Estado *ESPERA\_TEMPERATURA*

<b>Descripción</b>	Estado en el que el sistema comienza a calentarse. Se trata de un estado auxiliar de espera hasta que la temperatura configurada se alcanza.
<b>Entry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>imprimirMensajeEsperaTemperatura()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un mensaje indicando que se está iniciando el proceso. Además informa que se está alcanzado la temperatura y muestra la temperatura configurada y la temperatura actual del <i>thermode</i>.</li> </ul>
<b>Do</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>controlTemp(resistencia)</i>: función que utiliza la lectura de la temperatura actual y con ella calcula la acción de control a aplicar, sacando una señal de tipo <i>PWM</i> por la salida de control de la resistencia.</li> <li>• <i>leerPulsacion()</i>: función que se encarga de comprobar si se ha pulsado alguno de los botones existentes en ese momento en la pantalla.</li> <li>• <i>imprimirTemp()</i>: función con periodo de ejecución de 1Hz que se encarga de actualizar la temperatura actual del <i>thermode</i>.</li> </ul>
<b>Transiciones</b>	<p>→<i>BAJAR_CILINDRO</i>: en el momento en que la temperatura actual del <i>thermode</i> alcanza la temperatura configurada por el usuario.</p> <p>→<i>REPOSO</i>: en el caso de haber presionado el botón de <i>Salir (X)</i>.</p> <p>→<i>ERROR</i>: en el caso de que se detecte un fallo de calentamiento.</p>

Tabla 17. Información del estado *ESPERA\_TEMPERATURA*.

#### 7.4.6. Estado *BAJAR\_CILINDRO*

<b>Descripción</b>	Estado auxiliar en el que se lleva a cabo la conmutación de la electroválvula y como consecuencia la bajada del cilindro.
<b>Entry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>imprimirMensajeBajarCilindro()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un mensaje indicando que se está iniciando el proceso. Se informa también que se está bajando el cilindro y se muestra la temperatura configurada y la temperatura actual del <i>thermode</i>.</li> <li>• <i>electroválvula=1</i>: la salida de control de la electroválvula se pone a 1 con el fin de conmutar la misma y que el cilindro ejerza la presión requerida.</li> </ul>
<b>Do</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>controlTemp(resistencia)</i>: función que utiliza la lectura de la temperatura actual y con ella calcula la acción de control a aplicar, sacando una señal de tipo <i>PWM</i> por la salida de control de la resistencia.</li> <li>• <i>leerPulsacion()</i>: función que se encarga de comprobar si se ha pulsado alguno de los botones existentes en ese momento en la pantalla.</li> <li>• <i>imprimirTemp()</i>: función con periodo de ejecución de 1Hz que se encarga de actualizar la temperatura actual del <i>thermode</i>.</li> </ul>
<b>Transiciones</b>	<p>→<i>CALENTAR</i>: en el momento en el que se activa el final de carrera.</p> <p>→<i>REPOSO</i>: en el caso de haber presionado el botón de <i>Salir (X)</i>.</p> <p>→<i>ERROR</i>: en el caso de que no se haya activado el final de carrera del cilindro en un tiempo adecuado.</p>

Diseño Interfaz	
-----------------	--

Tabla 18. Información del estado *BAJAR\_CILINDRO*.

#### 7.4.7. Estado *CALENTAR*

<b>Descripción</b>	Estado en el que se lleva a cabo el proceso concreto del equipo. En este estado se ejerce la presión requerida manteniendo la temperatura configurada durante el tiempo indicado por el usuario.
<b>Entry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>imprimirMensajeInformaciónProceso()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un mensaje indicando que el equipo está en proceso. Se muestran también los segundos restantes para la finalización del proceso y la temperatura configurada y actual respectivamente.</li> </ul>
<b>Do</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>controlTemp(resistencia)</i>: función que utiliza la lectura de la temperatura actual y con ella calcula la acción de control a aplicar, sacando una señal de tipo <i>PWM</i> por la salida de control de la resistencia.</li> <li>• <i>leerPulsacion()</i>: función que se encarga de comprobar si se ha pulsado alguno de los botones existentes en ese momento en la pantalla.</li> <li>• <i>imprimirTemp()</i>: función con periodo de ejecución de 1Hz que se encarga de actualizar la temperatura actual del <i>thermode</i>.</li> <li>• <i>imprimirTiempo()</i>: función con periodo de ejecución de 1Hz que se encarga de actualizar el tiempo restante del proceso.</li> </ul>
<b>Transiciones</b>	→ <i>REPOSO</i> : cuando el tiempo restante de proceso ha llegado a 0 o en el caso de haber presionado el botón de <i>Salir (X)</i> .

Tabla 19. Información del estado *CALENTAR*.

#### 7.4.8. Estado *MODO\_MANUAL*

<b>Descripción</b>	Estado en el que el sistema se encarga de mantener la temperatura configurada en el <i>thermode</i> y el usuario puede bajar el cilindro a su elección mediante el uso de un pedal.
<b>Entry</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>imprimirMensajeModoManual()</i>: función que se encarga de sacar por pantalla un mensaje indicando que el equipo está en modo manual, e informa al usuario que para bajar el cilindro se ha de pisar el pedal. Además imprime por pantalla la temperatura configurada y la actual.</li> </ul>
<b>Do</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>controlTemp(resistencia)</i>: función que utiliza la lectura de la temperatura actual y con ella calcula la acción de control a aplicar, sacando una señal de tipo <i>PWM</i> por la salida de control de la resistencia.</li> <li>• <i>gestionElectrovalvula(electrovalvula)</i>: función que se encarga de leer el estado del pedal y accionar la salida digital de control de la electroválvula en el caso de que éste se encuentre pisado. Si el pedal no está pisado, esta función pone en estado bajo la salida de control de la electroválvula.</li> <li>• <i>leerPulsacion()</i>: función que se encarga de comprobar si se ha pulsado alguno de los botones existentes en ese momento en la pantalla.</li> <li>• <i>imprimirTemp()</i>: función con periodo de ejecución de 1Hz que se encarga de actualizar la temperatura actual del <i>thermode</i>.</li> </ul>
<b>Transiciones</b>	→ <i>REPOSO</i> : en el caso de haber presionado el botón de <i>Salir (X)</i> .

<p><b>Diseño Interfaz</b></p>	
-------------------------------	--

Tabla 20. Información del estado *MODO\_MANUAL*.

**7.4.9. Estado ERROR**

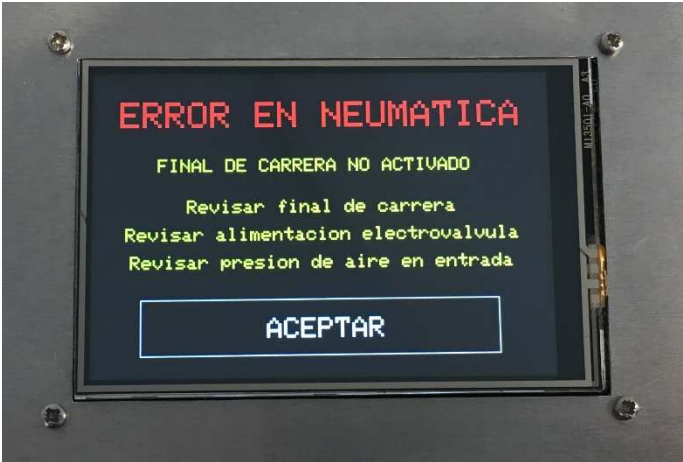
<p><b>Descripción</b></p>	<p>Estado en el que el sistema se encuentra en el caso de haber sucedido algún error. En este caso, se han contemplado dos errores, el primero se da cuando se cuándo no se activa el final de carrera y el segundo ocurre si se detecta un fallo de calentamiento.</p>
<p><b>Entry</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>electrovalvula=0</i>: si el equipo entra en el estado de error se debe de poner en estado bajo la salida digital de control de la electroválvula.</li> <li>• <i>resistencia=0</i>: si el equipo entra en el estado de error se debe de sacar una acción de control 0 por la salida <i>PWM</i> de control de la resistencia.</li> </ul>
<p><b>Do</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>errorManager()</i>: se trata de una función que comprueba el número de error codificado en una variable e imprime por pantalla un mensaje informando del error que ha sucedido y de las posibles soluciones que se pueden llevar a cabo para solucionarlo.</li> <li>• <i>leerPulsacion()</i>: función que se encarga de comprobar si se ha pulsado alguno de los botones existentes en ese momento en la pantalla.</li> </ul>
<p><b>Transiciones</b></p>	<p>→<i>REPOSO</i>: en el caso de haber presionado el botón de <i>Aceptar</i>.</p>
<p><b>Diseño Interfaz</b></p>	

Tabla 21. Información del estado *ERROR*.

## 7.5. Programación de los estados del equipo en Arduino

Tras llevar a cabo el diseño *StateChart* presentado en el apartado anterior junto con la explicación detallada de cada estado, el siguiente paso es la implementación de dicho *SateChart* en el hardware de control, que como se ha explicado y justificado en el [Apartado 7.1](#) se trata en este caso de la placa de desarrollo comercial Arduino UNO.

Existe una gran cantidad de información y metodologías para la implementación de una máquina de estados en un microcontrolador. En [5] se presenta una metodología en la que se utiliza la programación orientada a objetos para mantener las tres características de un *StateChart*, la jerarquía, la concurrencia y la comunicación.

Característica	Descripción
Jerarquía	Permite describir los estados con diferentes niveles de abstracción, permitiendo agrupar aquellos que tienen alguna relación entre sí en un estado de mayor nivel.
Concurrencia	Posibilidad de la ejecución de diferentes autómatas de forma simultánea, es decir, la ejecución de varios estados concurrentes.
Comunicación	Mecanismo de comunicación <i>broadcast</i> que permite la compartición de variables y permite disparar nuevas transiciones desde otras transiciones de la máquina de estados.

Tabla 22. Características de un *StateChart*.

En [6] se muestran varias opciones para la implementación de un *StateChart*. Una de estas opciones consiste en crear una tabla de funciones o punteros a funciones, en la que en cada iteración se ejecuta la función que corresponda dependiendo del estado activo y las condiciones que en ese momento existen. Otra alternativa es la codificación de los estados en un tipo enumerado y la gestión de los mismos usando condiciones *if* anidadas o *switch-case*.

Sea cual sea el método utilizado para implementar la máquina de estados diseñada, es necesario comprometerse con la necesidad de mantener las peculiaridades de un *StateChart*. Estas peculiaridades hacen referencia a las tres características mencionadas anteriormente y explicadas en la *Tabla22*, y algunos detalles más como la posibilidad de recordar el estado de la máquina, denominado mecanismo de historia, o la posibilidad de llevar a cabo acciones al entrar o salir de los estados.

Tras analizar la máquina de estados diseñada para este proyecto concreto, se puede comprobar que se trata de un sistema sencillo en el cual, de acuerdo al diseño desarrollado, no es necesario el mecanismo de jerarquía, ya que todos los estados se encuentran al mismo nivel de abstracción. Como consecuencia de esto, tampoco es necesario el uso de la concurrencia porque no existen estados que se deban de ejecutar de forma simultánea.

Como consecuencia de estas dos observaciones, se ha tomado la decisión de que el método de implementación de la máquina de estados sea la enumeración de los posibles estados de la máquina y la gestión de los mismos utilizando *switch-case*. A continuación se explica de forma más detallada el método implementado.

En primer lugar se ha creado un tipo enumerado con el que se han codificados los posibles estados del sistema. Creado este tipo enumerado, se han creado dos variables de este tipo, denominadas *estadolterAnterior* y *estadolterActual*, que guardan el estado en el que está la máquina en la iteración anterior y la actual respectivamente.

La gestión de las acciones y la evaluación de transiciones se llevan a cabo en un *switch* cuya variable asociada es *estadolterActual*. Dentro de este *switch* existen tantos *case* como posibles estados tiene la máquina. En todos ellos se lleva a cabo el mismo proceso que consta de los siguientes pasos.

- 1- Se comprueba si es la primera iteración en ese estado y se llevan a cabo las acciones asociadas a la entrada de dicho estado, es decir, las operaciones *ENTRY* representadas en el *StateChart* de la *Figura43* y explicadas en las *Tablas13-21*.
- 2- Se ejecutan las acciones asociadas al estado, es decir, las operaciones *DO* representadas en el *StateChart* de la *Figura43* y explicadas en las *Tablas13-21*.
- 3- Se evalúan las condiciones que dan lugar a un cambio de estado y si alguna de ellas es cierta, se llevan a cabo las acciones asociadas a la salida de ese estado y se guarda en la variable *estadolterActual* el estado al que el sistema evoluciona.

En la *Figura44* se muestra un extracto del código final implementado en Arduino con el objetivo de aclarar al lector los tres pasos explicados anteriormente sobre un estado, en este caso el estado de *Reposo*. De igual forma, existe un *case* análogo para cada uno de los posibles estados del sistema.

Utilizando esta metodología se ha implementado el *StateChart* diseñado y representado en la *Figura43*. El código completo no se ha introducido en este capítulo pero se puede consultar en el *AnexoG*.



```

case reposo:  //////////// ESTADO REPOSO
{
  //////////// ENTRY
  if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
  {
    showMainMenu();
    analogWrite(PWMTEMP, 0);
    digitalWrite (VALVE, LOW);
    estadoIterAnterior = estadoIterActual;
  }
  //////////// DO
  int mainMenuPulse = mainMenuTouch();
  //////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
  if (mainMenuPulse==1)
  {
    estadoIterActual = edicionParametros;
  }
  if (mainMenuPulse==2)
  {
    estadoIterActual = esperaTemperatura;
  }
  if (mainMenuPulse==3)
  {
    estadoIterActual=modoManual;
  }
  break;
}
}

```

Acciones asociadas a la entrada, *ENTRY*

Acciones asociadas al estado, *DO*

Evaluación de transiciones a otros estados

Figura 44. Extracto del código final que muestra los tres pasos seguidos en cada *case*.

Como consecuencia de la necesidad de una señal de 1Hz para las funciones que imprimen datos en la pantalla, tras el *switch*, se lleva a cabo una cuenta de iteraciones y como el tiempo entre ellas es conocido, se utiliza una variable auxiliar que se pone en estado alto una iteración cada segundo.

Por último y como medida de seguridad, se ha introducido una lectura de la temperatura de forma iterativa, independiente del estado que esté activo. Si la temperatura sobrepasa un valor predefinido, en este caso 180°C, se entra en una función denominada *overHeatingError()*. Esta función integra un bucle de ejecución infinito en el que se imprime en la pantalla el mensaje mostrado en la *Figura45* solicitando la desconexión del equipo de la red. Dicho mensaje parpadea con un periodo de 0.5 segundos con el objetivo de llamar la atención del usuario y desconectar el equipo cuanto antes.



Figura 45. Mensaje de error en el caso de la detección de un sobrecalentamiento del *thermode*.

En un funcionamiento normal del equipo no es posible que la temperatura supere la de seguridad. En el caso de que esto suceda se deberá a algún fallo hardware por lo que la medida a tomar es cortar lo antes posible la alimentación y revisar los circuitos, los componentes electrónicos de dichos circuitos, las alimentaciones y demás aspectos hardware. Esta es la razón por la que la función *overHeatingError()* es un bucle infinito del que no es posible salir sin la desconexión del equipo de la red.

## 7.6. Control de los actuadores

Como ya se ha mencionado varias veces, el equipo desarrollado se resume en un sistema capaz de ejercer una presión y una temperatura concreta durante un tiempo. Como consecuencia de ello, el sistema está compuesto de dos actuadores. El primero de ellos es la resistencia calefactora encargada de elevar y mantener la temperatura, y el segundo la electroválvula encargada de accionar el cilindro neumático que ejercer la presión del proceso.

### 7.6.1. Estrategia para el control de la resistencia en lazo cerrado

En primer lugar se ha optado por una solución rápida y muy sencilla. Consiste en activar la salida de control cuando la temperatura se encuentre por debajo de la de referencia y desactivarla, cuando la temperatura se encuentre por encima.

Se trata de una estrategia muy pobre que da lugar a una conexión y desconexión constante y muy rápida. Como solución, se introduce un ciclo de histéresis, es decir, un margen tanto por encima como por debajo de la temperatura de referencia a partir del cual la salida de control de la resistencia se desactiva y activa respectivamente. En las *Figuras46-47*, se representa un gráfico explicativo de la primera estrategia mencionada, y de la adición del ciclo de histéresis respectivamente.

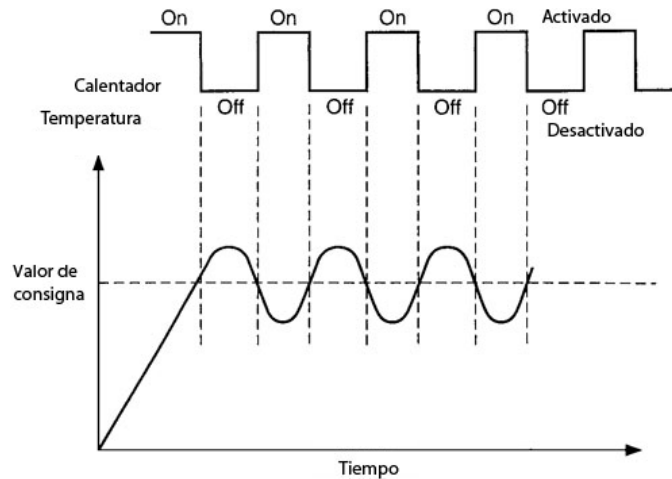


Figura 46. Primera estrategia de control estudiada, control todo o nada.

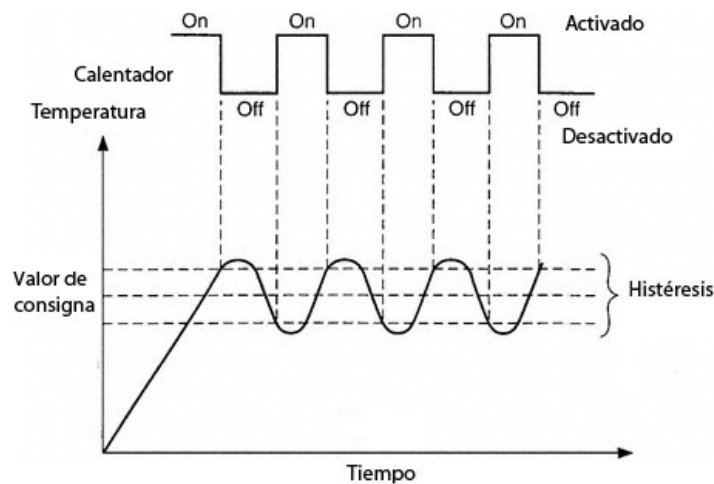


Figura 47. Segunda estrategia de control estudiada, control todo o nada con histéresis.

El ciclo de histéresis produce una mayor fluctuación de la temperatura, pero logrando ajustar los valores de las histéresis puede dar lugar a un sistema que consiga mantenerse dentro de una variación asumible para esta aplicación.

A la hora de ajustar la histéresis hay que tener en cuenta dos detalles. La primera es que a mayor histéresis mayor fluctuación de la temperatura, ya que se le permite un rango mayor. La segunda y menos trivial es que a mayor histéresis, mayor inercia. Esto sucede porque se trata de un sistema dinámicamente lento por lo que cuanto mayor sea el periodo de tiempo que está la resistencia activada, mayor tiempo necesita la misma para dejar de calentar tras desconectarla.

Tras estas consideraciones, se lleva a cabo de forma experimental un ajuste del valor de histéresis. Finalmente, se puede comprobar que no es posible ajustar esta estrategia dando el mismo valor para el margen superior y para el inferior, ya que la dinámica de calentamiento y de enfriamiento del sistema obviamente no es igual.

Para solucionar este problema, es necesario dar un valor diferente para el margen superior que para el margen inferior, y debido a lo explicado antes, el margen superior debe de ser menor que el inferior.

Tras haber reajustado la histéresis del equipo tras varias pruebas, se han observado grandes mejoras, ya que el control es capaz de mantener la temperatura en una banda máxima de  $\pm 4$  grados alrededor de la temperatura de referencia. No se trata de un ajuste sin error, pero es un error admisible para la aplicación tratada en este proyecto.

### 7.6.2. Control de la electroválvula

El control de la electroválvula es mucho más sencillo que el control de la resistencia, ya que en este caso se trata de una señal *todo-nada* que no pertenece a ningún lazo de control. Dado a que no es posible alimentar la electroválvula directamente desde el pin de la placa de desarrollo utilizada, la señal de control debe de conectarse a un transistor, encargado de conmutar la alimentación de la electroválvula. Esta conexión se explica en el siguiente capítulo.

## 8. DISEÑO DEL CIRCUITO Y DE LA PCB DE CONTROL

El hardware de control empleado es un Arduino UNO por lo que la PCB final se ha diseñado con la idea de ser montada sobre el mismo, es decir, como un segundo piso sobre el Arduino. Para ello se han de emplear conectores que permitan trasladar los pines del Arduino hacia la placa diseñada.

### 8.1. Esquemas y diseño del circuito

En este apartado se explican los detalles relevantes para comprender el funcionamiento hardware del circuito y se muestran capturas de pantalla de cada una de las partes del circuito de control. El esquema completo se puede consultar en el *AnexoH*. Se recuerda que el programa utilizado para el diseño del circuito es el *Altium Designer*.

Antes de comenzar a detallar cada parte, se presenta una captura donde se muestran los conectores que se utilizan para comunicar la señal entre los pines del Arduino y de la PCB.

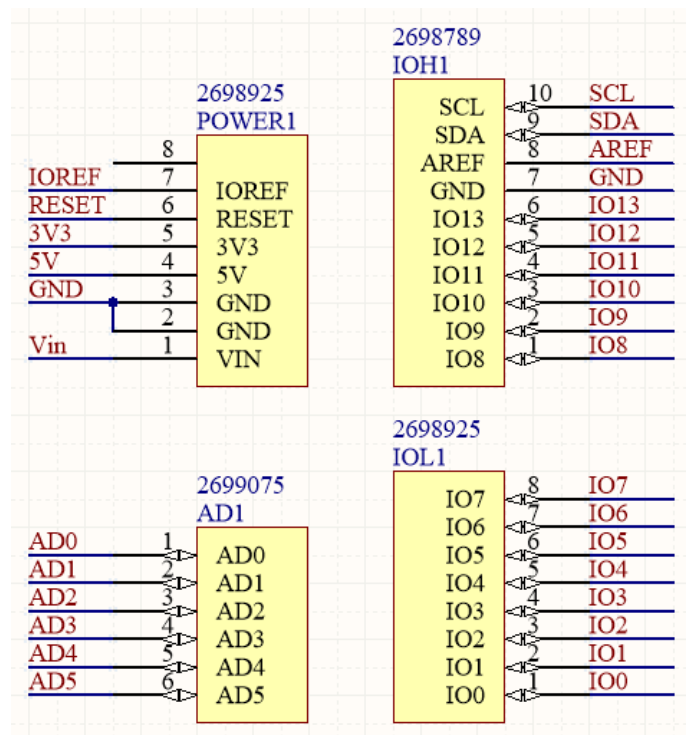


Figura 48. Conectores utilizados para trasladar la salida de los pines desde el Arduino a la PCB.

Como se puede ver, en el esquema se ha creado una *Net* asociada a cada pin del conector cuyo nombre coincide con el nombre de dicho pin en el Arduino. Esto facilitará las conexiones que se realizarán a continuación.

### 8.1.1. Uso de un *MOSFET* para las señales de control

En el [Apartado 7.6](#) se ha hecho referencia varias veces al uso de un transistor como método para conectar y desconectar de la alimentación a los dos actuadores del sistema. A continuación se explica el circuito necesario para hacer estas conmutaciones.

Un *MOSFET* es un transistor cuya principal función es amplificar o conmutar señales electrónicas. Se trata del transistor más utilizado en la industria de la microelectrónica, tanto para señales analógicas como digitales. El funcionamiento se puede resumir en la interconexión eléctrica de dos de sus pines, fuente (*S*, *Source*) y drenador (*D*, *Drain*), cuando actúa una señal de control sobre el tercer pin restante, puerta (*G*, *Gate*).

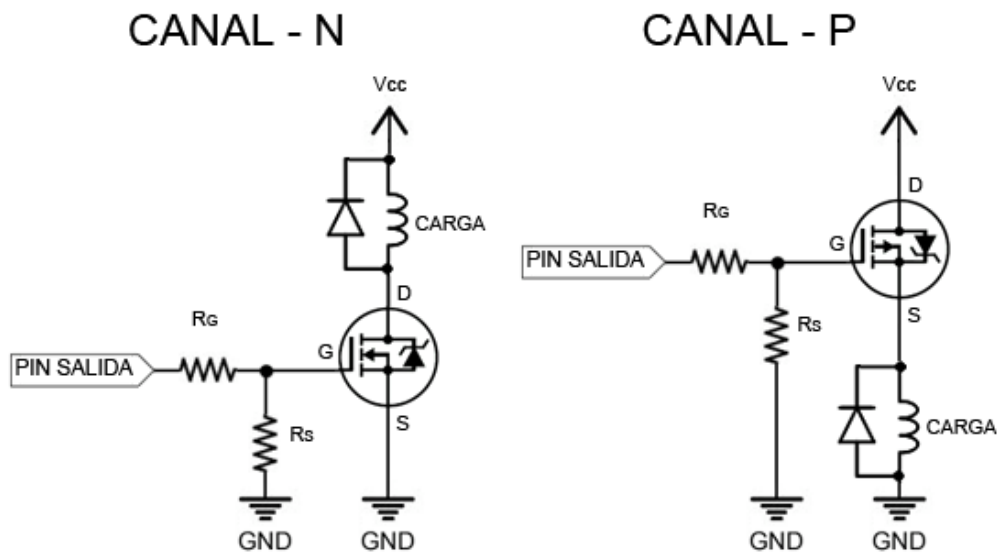


Figura 49. Esquema de conexión de una carga utilizando un *MOSFET* para su control.

En la [Figura 49](#) se muestra el esquema de conexión común que permite el control de alimentación de una carga empleando un *MOSFET* de canal *N* y uno de canal *P*. Como se puede ver, este componente debe de ir conectado al pin que ofrece la señal de control y a la alimentación del actuador. Por este motivo, se han analizado las especificaciones eléctricas de la resistencia por ser el actuador de mayor potencia, y de la señal de control, con el objetivo de seleccionar un *MOSFET* adecuado para esta aplicación.

Tras una búsqueda en la web del distribuidor *Farnell* ya conocido, el *MOSFET* seleccionado es de canal *N*, del fabricante *VISHAY*. Se trata del [S12338DS](#), con una tensión drenador-fuente máxima de 30 voltios y una intensidad de 6 amperios, que cumple ampliamente las especificaciones eléctricas de la resistencia calefactora y de la electroválvula. Además la tensión mínima de puerta para conmutar el *MOSFET* es de 2.5 voltios, por debajo de la tensión de la señal de control utilizada en este caso, de 5 voltios.

A continuación se presenta el esquema que hace referencia a la parte de control de los dos actuadores. Como se puede ver, respecto al esquema de la [Figura 49](#), se han añadido dos diodos LED con sus respectivas resistencias con el objetivo de poder ver cuando el *MOSFET* está

en conducción. Los pines *IO3* e *IO4* son los utilizados por el programa para sacar la señal de control de la resistencia calefactora y la electroválvula respectivamente.

Como se puede ver, la carga no está representada en el esquema. Esto se debe a que el borne positivo de cada actuador se conecta a la tensión de la fuente de alimentación correspondiente y el borne negativo a los pines *LOAD\_12V* y *LOAD\_24V* respectivamente del conector etiquetado como *ALIMENTACIONES1*.

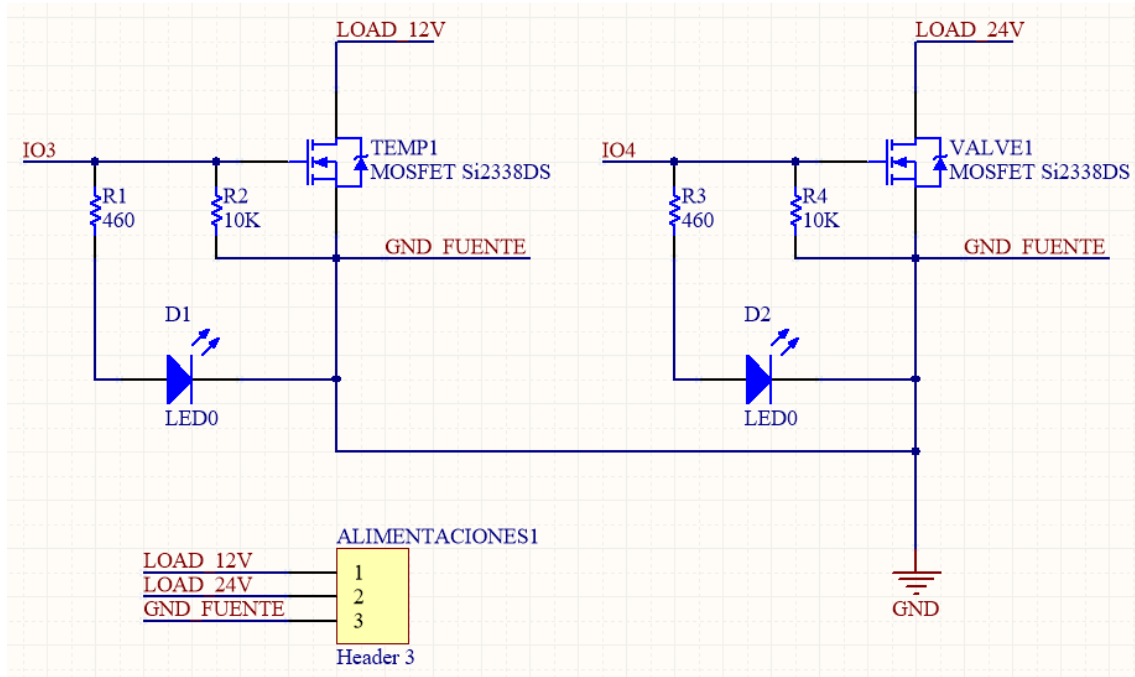


Figura 50. Esquema de control de los dos actuadores.

En la *Tabla23* se muestran todos los componentes empleados en el circuito anterior junto con sus parámetros y la referencia del distribuidor *Farnell*, al que han sido adquiridos.

Ref.	Componente	Ref. Farnell	Parámetros
R1, R3	Resistencia	2129618	460Ω
R2, R4	Resistencia	9335765	10KΩ
D1, D2	Diodo LED Rojo	1716768	20 mA, 2.1V
TEMP	Mosfet Si2338DS	2679676	30V, 6A
VALVE	Mosfet Si2338DS	2679676	30V, 6A
ALIMEN.	Bloque de terminales	2008020	3 vías

Tabla 23. Componentes utilizados para el circuito de control de los actuadores.

### 8.1.2. Entrada analógica para el sensor de temperatura

Para medir la temperatura que tiene la herramienta en todo momento, se ha utilizado el mismo sensor de temperatura que se ha utilizado en la primera versión del equipo. Se recuerda que era una resistencia *NTC* con un valor nominal de  $100\text{K}\Omega$ . Este tipo de sensores de temperatura se usan mediante un divisor resistivo, leyendo la tensión en el punto medio del divisor mediante un conversor *AD*, en este caso ya integrado en el Arduino a través del pin *AD0*. Dado a que se trata de una señal analógica, se ha integrado en el circuito un condensador y una resistencia formando un filtro *RC*, con el objetivo de filtrar la señal.

En la *Figura51* se muestra el circuito diseñado con los detalles explicados en el párrafo anterior junto con el conector instalado para conectar los dos terminales del sensor.

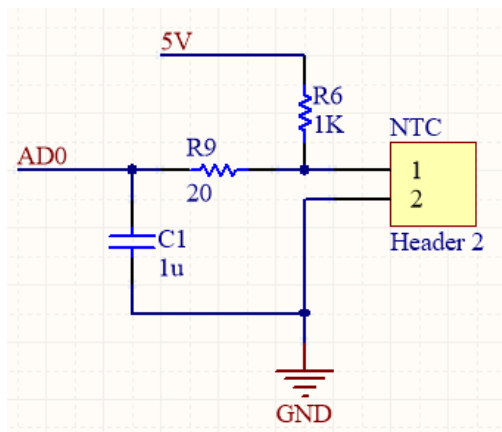


Figura 51. Esquema de la entrada analógica del el sensor *NTC*.

En la *Tabla24* se muestran todos los componentes empleados en el circuito anterior junto con sus parámetros y la referencia del distribuidor *Farnell*, al que han sido adquiridos.

Ref.	Componente	Ref. Farnell	Parámetros
R6	Resistencia	1576629	$1\text{K}\Omega$
R9	Resistencia	2447484	$20\Omega$
C1	Condensador	2370231	$1\mu\text{F}$
NTC	Bloque de terminales	2008015	2 vías

Tabla 24. Componentes utilizados para la entrada analógica del sensor *NTC*.

### 8.1.3. Entradas digitales para el final de carrera y el pedal

Como ya se ha mencionado, existen dos entradas digitales correspondientes con el final de carrera del cilindro y con el pedal que acciona el sistema en el modo de operación manual. Dado a que se tratan de contactos normalmente abiertos y la programación se ha desarrollado de acuerdo a que su activación genere en el pin correspondiente una señal en estado alto, se utilizan dos circuitos de tipo *pull-down*. Los pines seleccionados son *IO2* e *IO5*.

En la *Figura52* se muestra el circuito correspondiente a las dos entradas digitales.



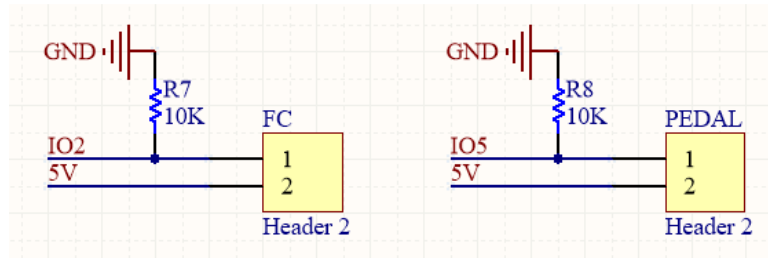


Figura 52. Esquema de las dos entradas digitales.

En la *Tabla25* se muestran todos los componentes empleados en el circuito anterior junto con sus parámetros y la referencia del distribuidor *Farnell*, al que han sido adquiridos.

Ref.	Componente	Ref. Farnell	Parámetros
R7, R8	Resistencia	9335765	10KΩ
FC	Bloque de terminales	2008015	2 vías
PEDAL	Bloque de terminales	2008015	2 vías

Tabla 25. Componentes utilizados para las dos entradas digitales.

### 8.1.4. Salidas de control de la pantalla táctil

La última parte del circuito de control es la conexión de la pantalla táctil. Para esta conexión no es necesario ningún componente electrónico, ya que el circuito necesario únicamente consiste en llevar las 9 líneas de datos y las 2 de alimentación desde los pines de la pantalla a los correspondientes pines del Arduino.

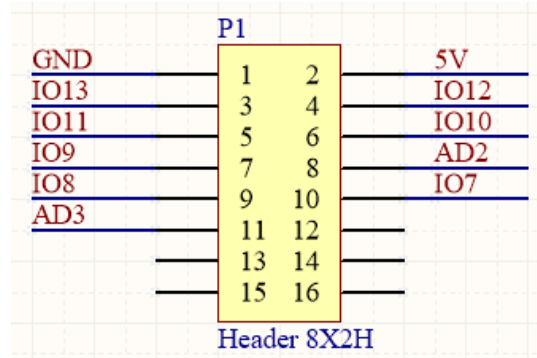


Figura 53. Esquema de las conexiones del control y alimentación de la pantalla.

En la *Tabla26* se muestran todos los conectores necesarios para conectar la pantalla y el Arduino y la referencia del distribuidor *Farnell*, al que han sido adquiridos.

Ref.	Componente	Ref. Farnell	Parámetros
P1	Conector macho	2215308	16 contactos
-	Conector hembra	2215235	16 contactos
-	Cable plano	1207439	16 hilos

Tabla 26. Conector y cable necesario para conectar la pantalla con el Arduino.

A continuación se muestra una imagen del tipo de conector utilizado. El método de conexión será el siguiente. Por un lado, el conector macho va instalado en la PCB diseñada. Por otro lado, se sueldan los hilos necesarios del cable plano en los pines adecuados de la pantalla táctil poniendo gran atención en el orden en que deben de ir de las señales. Al otro extremo del cable plano, se instala el conector hembra. De esta forma, es posible separar la pantalla y la placa de control de forma rápida y sencilla para el mantenimiento o revisión del equipo.

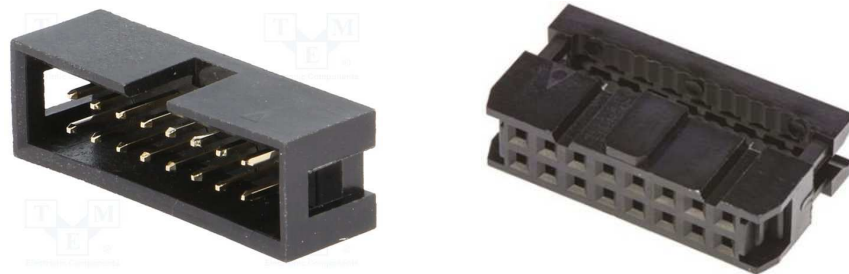


Figura 54. Conector macho (izquierda) y hembra (derecha) utilizados para la conexión de la pantalla.

## 8.2. Diseño de la PCB

Una vez se ha diseñado el circuito completo de control, el siguiente paso es el diseño de la PCB. Para ello se emplea el mismo programa que se ha usado para el paso anterior y también para el diseño de la PCB del *Boost*, el *Altium Designer*. Esta PCB se ha desarrollado como una placa de doble cara y a continuación se presentan un par de capturas donde se muestra el diseño final de la misma por cada una de las caras.

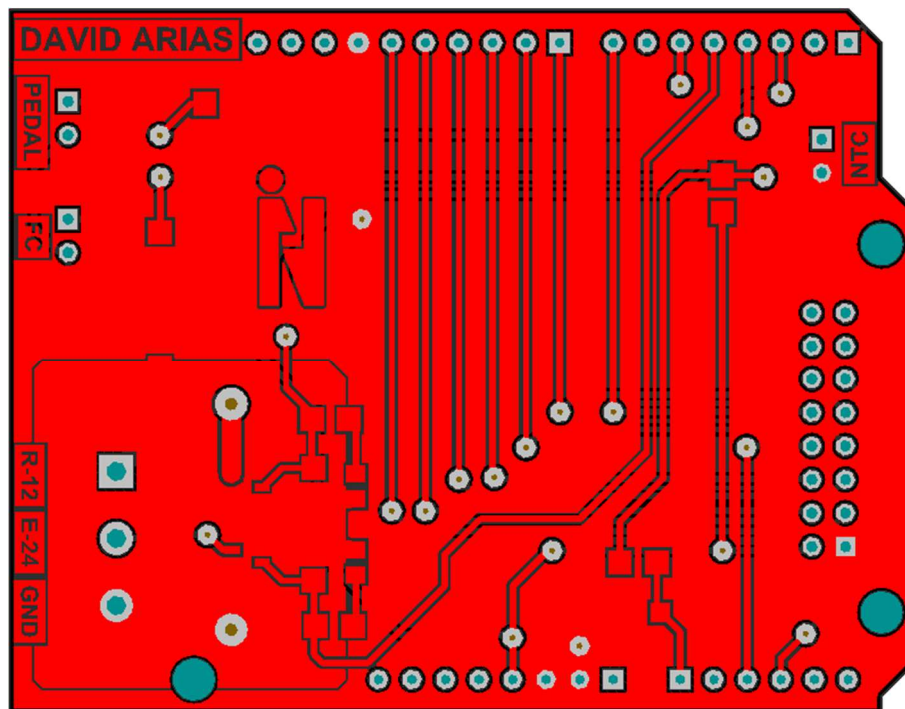


Figura 55. Diseño de la cara superior (*TopLayer*) de la PCB de control

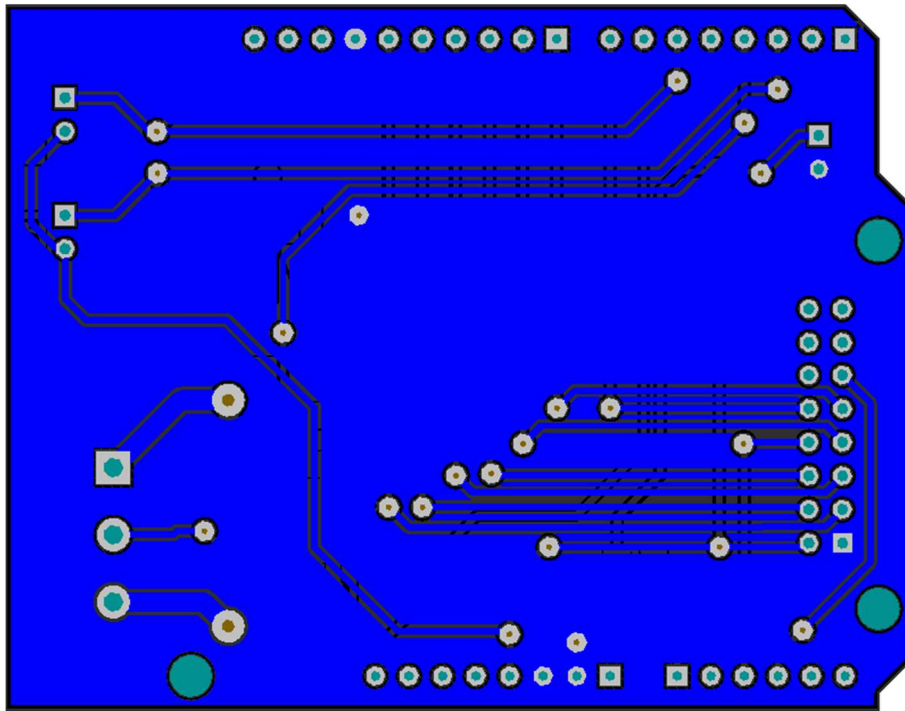


Figura 56. Diseño de la cara inferior (*BottomLayer*) de la PCB de control

## 9. FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL EQUIPO

En el Capítulo 4 se han especificado las cinco piezas que se han adquirido a fabricantes o distribuidores externos y que forman parte del diseño mecánico. Estas piezas son el cilindro neumático, la guía lineal, el patín, el muelle y las cabezas *thermodes*.

Exceptuando estas cinco piezas, el resto de piezas del diseño se han mecanizado en fundación PRODINTEC empleando una fresadora CNC, concretamente la KERN EVO.



Figura 57. Fresadora CNC empleada para el mecanizado de las piezas del equipo, modelo KERN EVO.

En cuanto al material seleccionado para las piezas mecanizadas, se han empleado tres diferentes. Dos de ellos se han seleccionado y presentado en el apartado de diseño, ya que por características específicas de la pieza requieren un material concreto. Se tratan de dos piezas que se han mecanizado empleando PEEK y acero inoxidable AISI 304 respectivamente. Para el resto de piezas del equipo mecanizadas se ha empleado aluminio.

En la Figura 58 se muestran varias de las piezas mecanizadas antes de comenzar el montaje. Entre ellas se encuentran también algunas de las adquiridas a fabricantes externos.

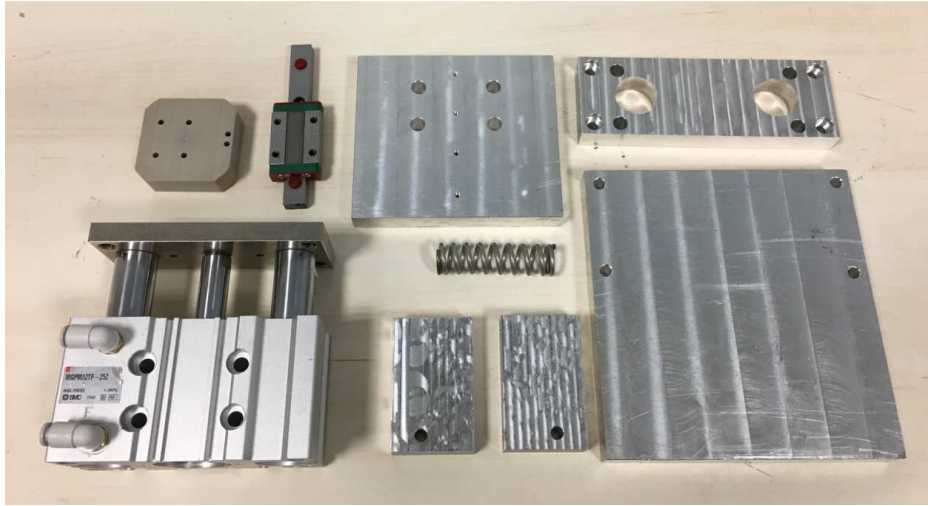


Figura 58. Foto de algunas de las piezas antes de comenzar el montaje del equipo.



Figura 59. Foto tomada tras el montaje del chasis del equipo.

En la figura anterior se presenta una foto tomada tras el montaje del chasis del equipo, en el que se puede ver integrado el cilindro neumático seleccionado encargado de ejercer la fuerza durante el proceso. El montaje hasta este momento se corresponde con el diseño recogido en al [Apartado4.2](#).

La [Figura60](#) muestra una foto tomada tras fijar la guía lineal al chasis del equipo empleando cuatro tornillos y colocar la pieza de *PEEK* que permite anclar los *thermodes* sobre el patín. De esta forma, el conjunto de la pieza *PEEK* junto con el *thermode* sube y baja de forma totalmente vertical como se ha comentado anteriormente. En este momento, el estado de montaje del equipo se corresponde con el diseño recogido hasta el [Apartado4.3](#).

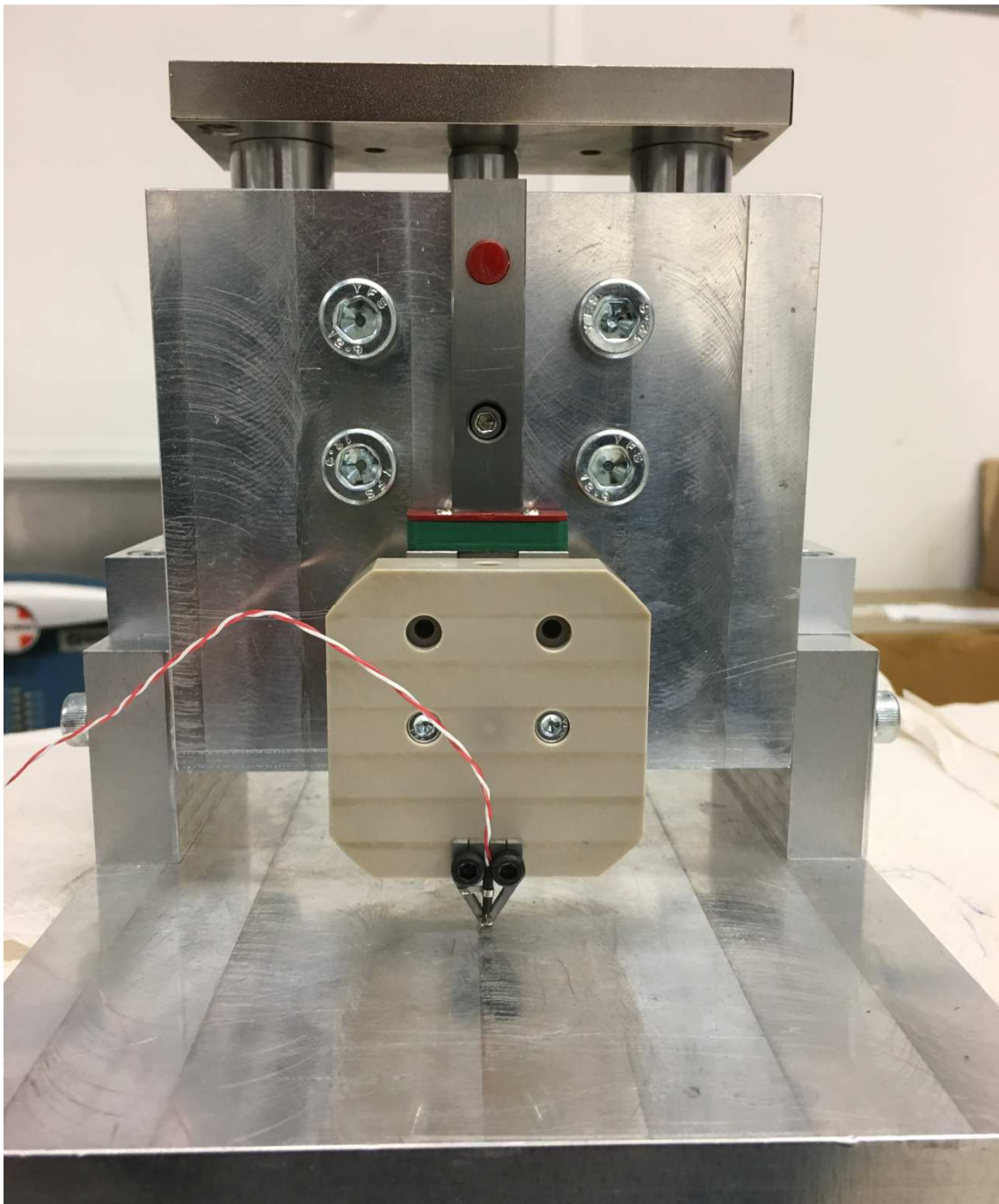


Figura 60. Foto tomada tras la fijación de la guía y la colocación de la pieza de *PEEK* sobre el patín.

El siguiente paso de montaje es la instalación del muelle que permite transmitir la fuerza desde el cilindro al *thermode*, sistema diseñado y explicado en el [Apartado 4.4](#). Para ello, en primer lugar es necesario fijar un tornillo largo en la tapa superior del cilindro neumático, permitiendo un amplio recorrido de ajuste del muelle, siempre y cuando el tornillo de la tapa no llegue al tornillo fijado en la pieza de PEEK. En el caso en que ambos tornillos se toquen cuando el cilindro se encuentre comprimido, el muelle no sería el sistema controlado de transmisión de la fuerza, sino que se trataría de un sistema fijo y no es lo deseable.

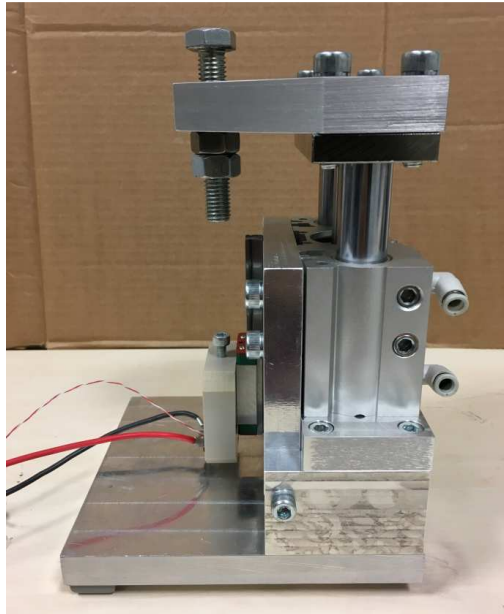


Figura 61. Foto tomada durante la instalación del tornillo que permite ajustar la carrera del muelle.

En la *Figura 62* se muestran un par de fotos donde se puede ver el sistema de transmisión de fuerza compuesto por el muelle y el tornillo, con el cilindro en su posición de reposo y con el cilindro comprimido ejerciendo la fuerza respectivamente.

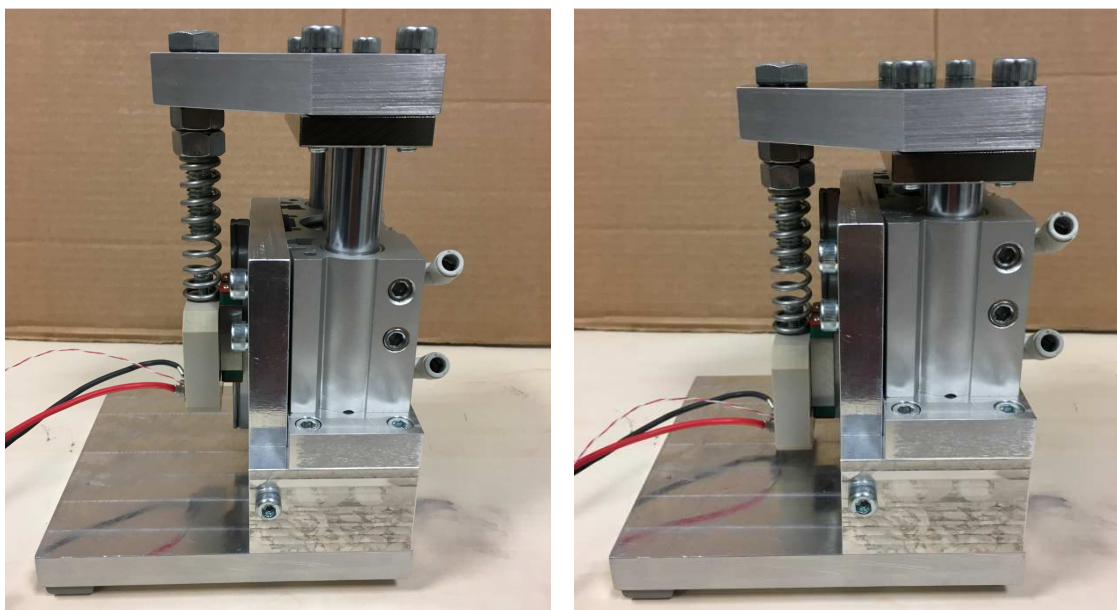


Figura 62. Fotos tomadas tras la instalación del muelle con el cilindro en las dos posiciones extremas.

A continuación se muestra una foto final del equipo. En este punto el equipo está listo para funcionar si los *thermodes* se calientan empleando el paso de corriente a través de ellos. Como se puede ver en la imagen, en el anclaje del *thermode* se han instalado dos cables para permitir la alimentación del mismo. Además ya se han instalado los tubos correspondientes al módulo neumático que entran en el cilindro junto con estranguladores que permiten ajustar la velocidad de movimiento del cilindro, tanto en la salida como en la entrada.

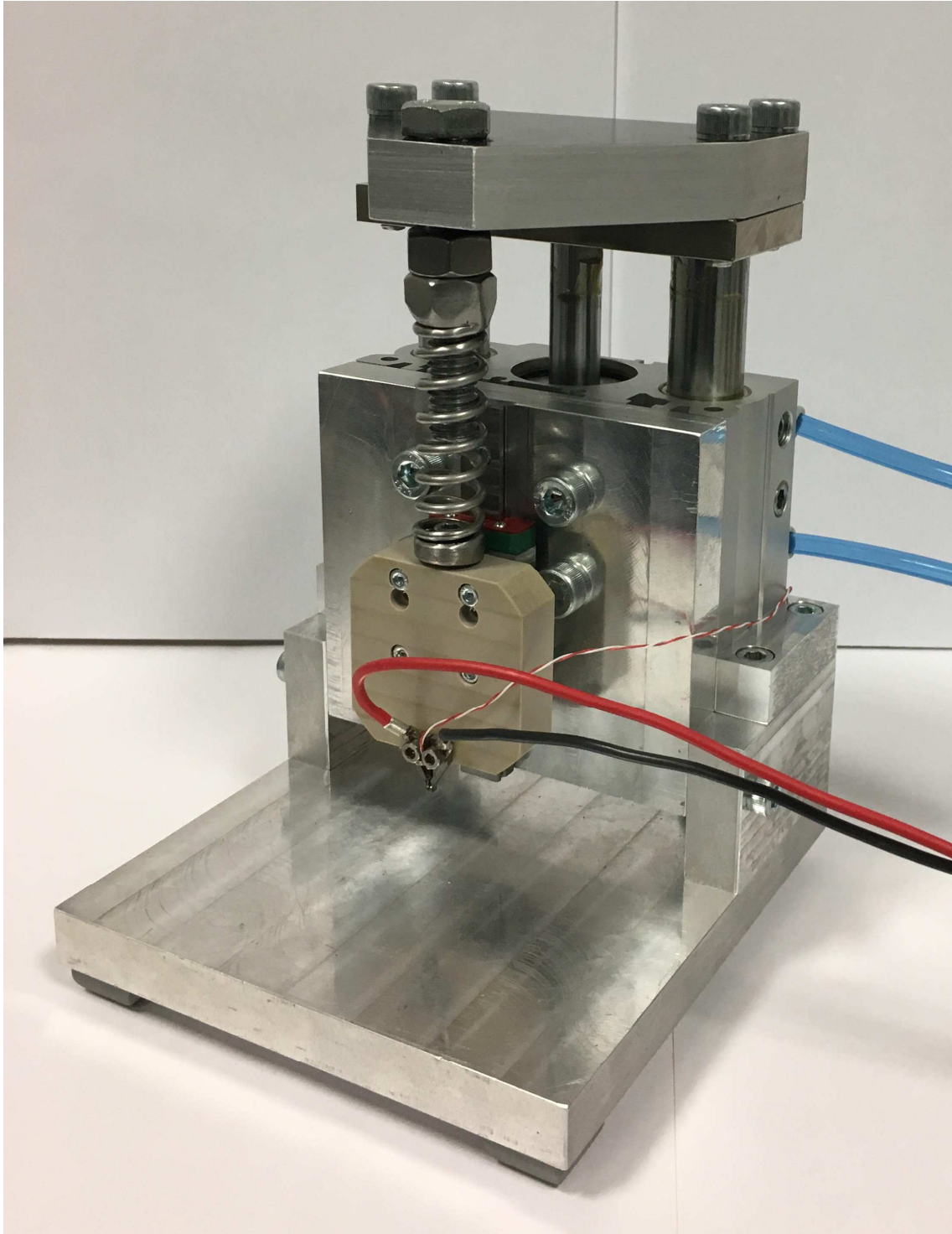


Figura 63. Equipo preparado para utilizar el paso de corriente como método de calentamiento.



Como se ha explicado en el [Apartado6.2](#), se ha propuesto una alternativa al uso de corriente como método de calentamiento del *thermode*. Esta alternativa necesita una pieza que permita fijar una resistencia calefactora al *thermode* instalado en el equipo. A continuación se muestra una foto de la pieza mecanizada de acuerdo al diseño realizado en el [Apartado4.5](#).



Figura 64. Foto de la pieza mecanizada para fijar la resistencia calefactora al *thermode*.

En la [Figura65](#) se muestra una foto detalle de la pieza colocada en su emplazamiento, tras haber introducido la resistencia calefactora en el orificio para tal efecto. Como se ha mencionado, se trata de una pieza que se coloca entre la pieza de PEEK y el *thermode*. Por el momento, no se ha instalado ningún sensor externo en la pieza ya que el *thermode* dispone de un termopar propio ya calibrado.

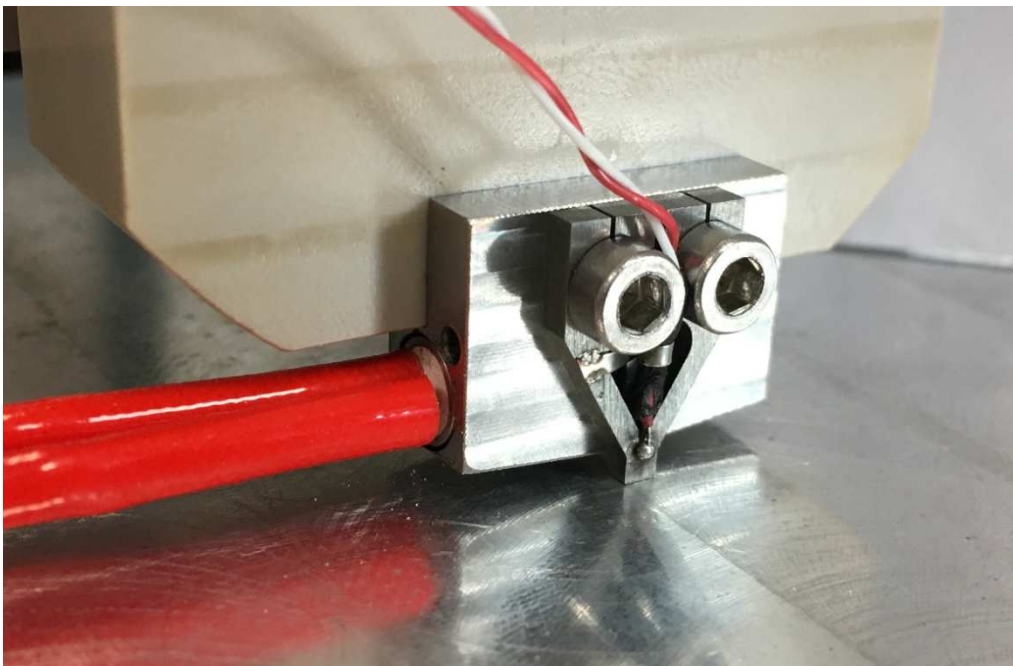


Figura 65. Foto detalle de la pieza diseñada para fijar la resistencia al *thermode*, ya en su posición.

A continuación se presenta una foto final del equipo con la pieza instalada. Como se puede ver, en esta foto ya se ha instalado un sensor externo de temperatura de tipo NTC.

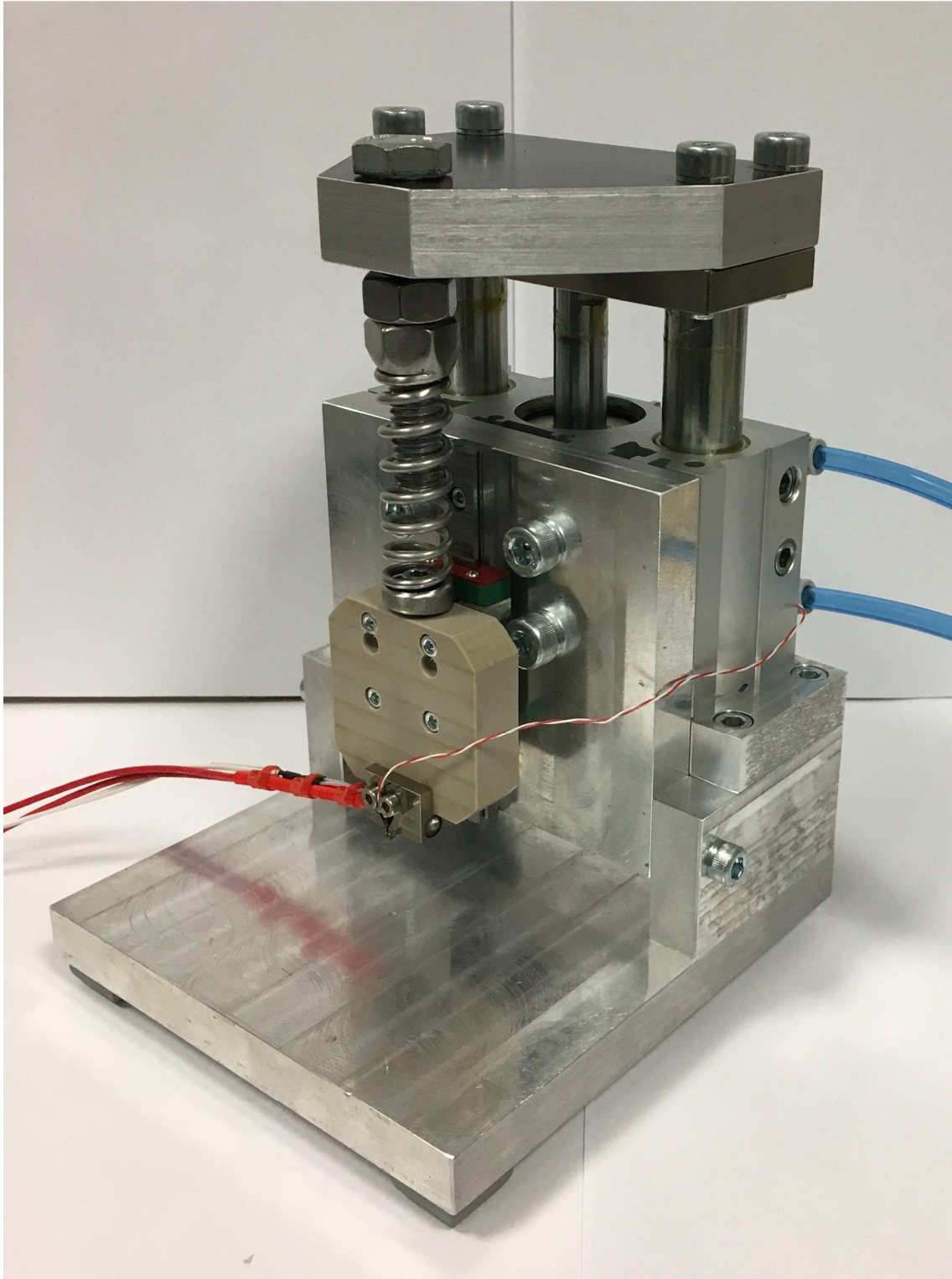


Figura 66. Equipo preparado para utilizar la resistencia como método de calentamiento.

## 10. FABRICACIÓN Y MONTAJE DE LA PARTE DE CONTROL

### 10.1. Fabricación de la PCB de control

Una vez diseñada la PCB, se fabrica utilizando la fresadora *LPKF* ya empleada para la PCB del *Boost*. A continuación se muestran un par de fotos del resultado obtenido.

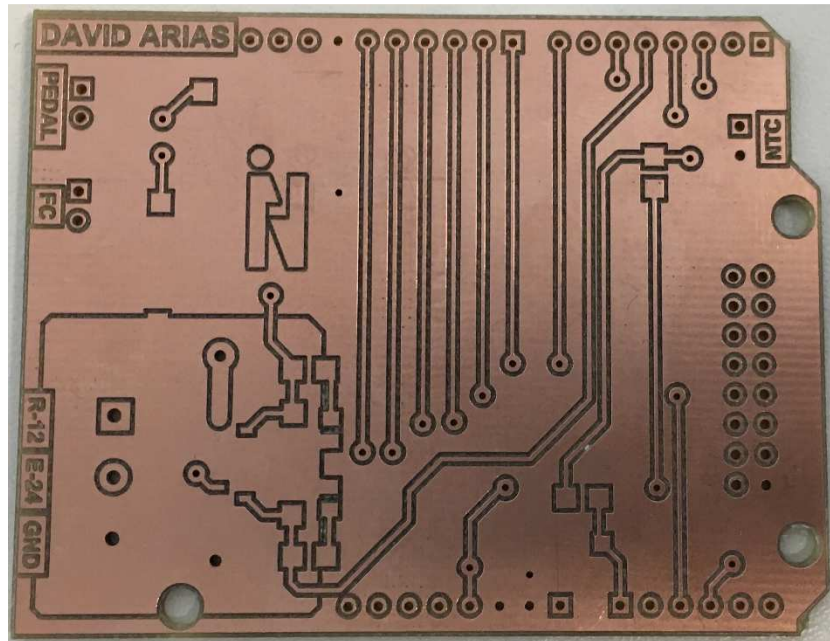


Figura 67. Foto de la cara superior (*TopLayer*) de la PCB de control.

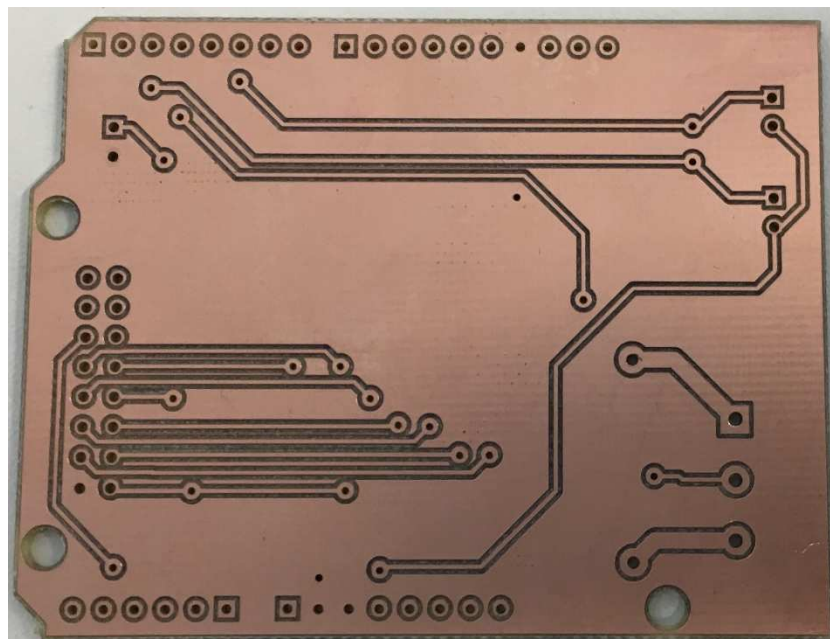


Figura 68. Foto de la cara inferior (*BottomLayer*) de la PCB de control.

## 10.2. Instalación y soldado de componentes en las PCB

Tras tener la PCB fabricada, el siguiente paso es soldar los componentes en su lugar y comprobar su funcionamiento. En la *Figura69* se muestra una foto de la placa de control una vez se han soldado todos los componentes del circuito.

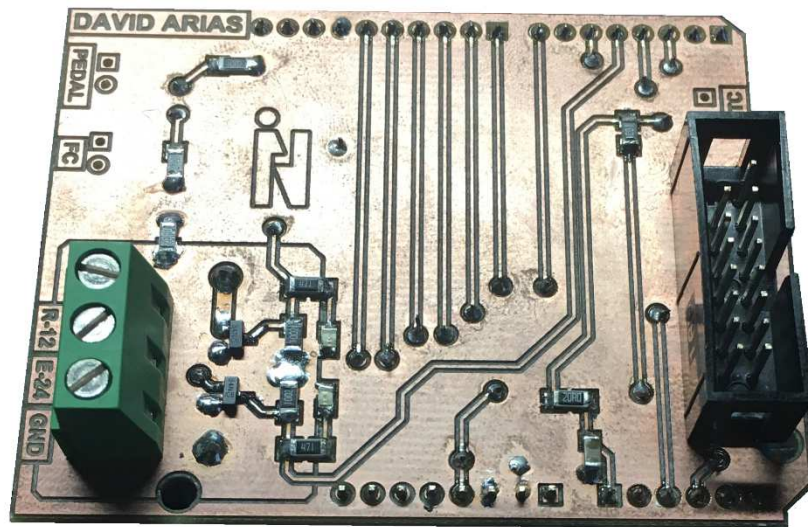


Figura 69. Foto de la placa de control tras soldar todos los componentes.

En el *Apartado6.4* se ha explicado el diseño de un circuito que integra un *Boost* para obtener una tensión de 24 voltios a partir de los 12 de la fuente. En dicho apartado se ha mostrado también el diseño de la PCB pero no se han incluido fotos de la misma. A continuación se presenta una foto de dicha PCB tras haber soldado todos los componentes.

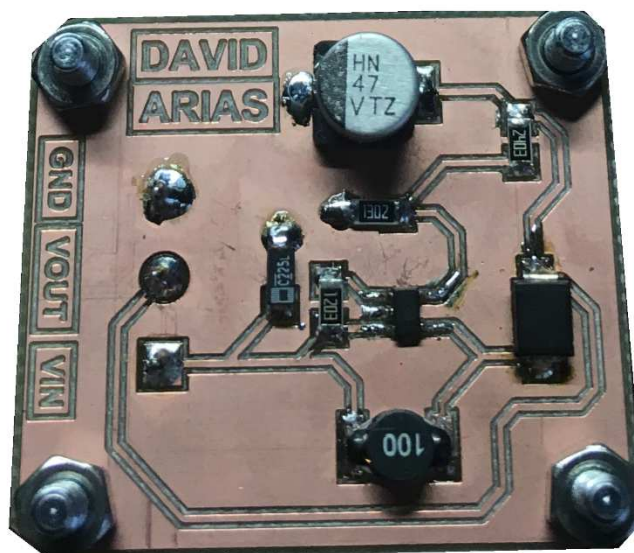


Figura 70. Foto de la placa que integra el Boost tras soldar todos los componentes.

### 10.3. Montaje de la electrónica

Con el fin de que la parte electrónica se encuentre protegida y oculta al usuario, se ha seleccionado una envoltura como la que se muestra en la *Figura 71* en la que se instalarán las placas de control y de potencia.



Figura 71. Envoltura seleccionada para montar la parte electrónica del equipo.

Para fijar las PCB al fondo de la envoltura se emplean 4 soportes para cada una. El resultado se puede ver en la *Figura 72*. Recordar que la placa de control que se ha diseñado va conectada a los pines del Arduino por lo que no va fijada a la envoltura. En dicha figura, se pueden ver también los dos pasamuros instalados para las entradas y salidas de control y potencia. La razón de que existan dos es por la recomendación de separar señales de control y señales de potencia, con el propósito de evitar ruidos durante el funcionamiento.

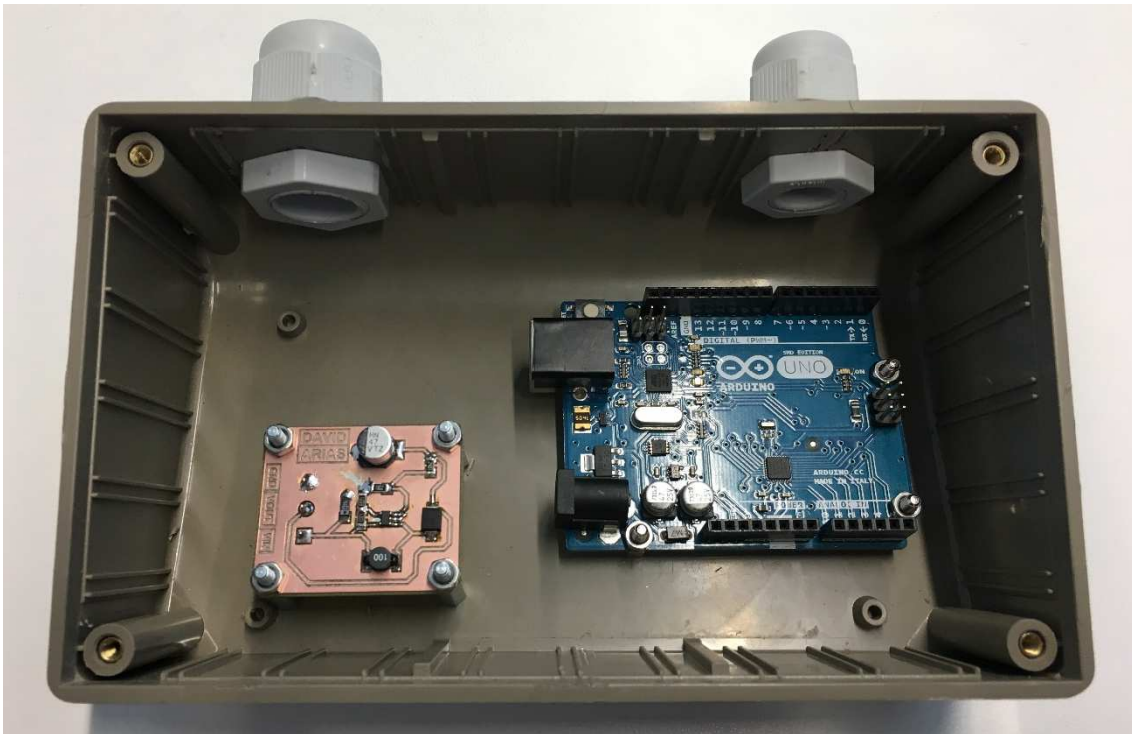


Figura 72. Envoltura tras fijar el Arduino y la PCB de potencia e instalar los dos pasamuros.

El siguiente paso consiste en cablear todo el sistema, desde las señales de control hasta las líneas de alimentación de llegan desde la fuente y salen hacia los actuadores. En la *Figura73* se muestra una foto tomada tras haber realizado todo el cableado.

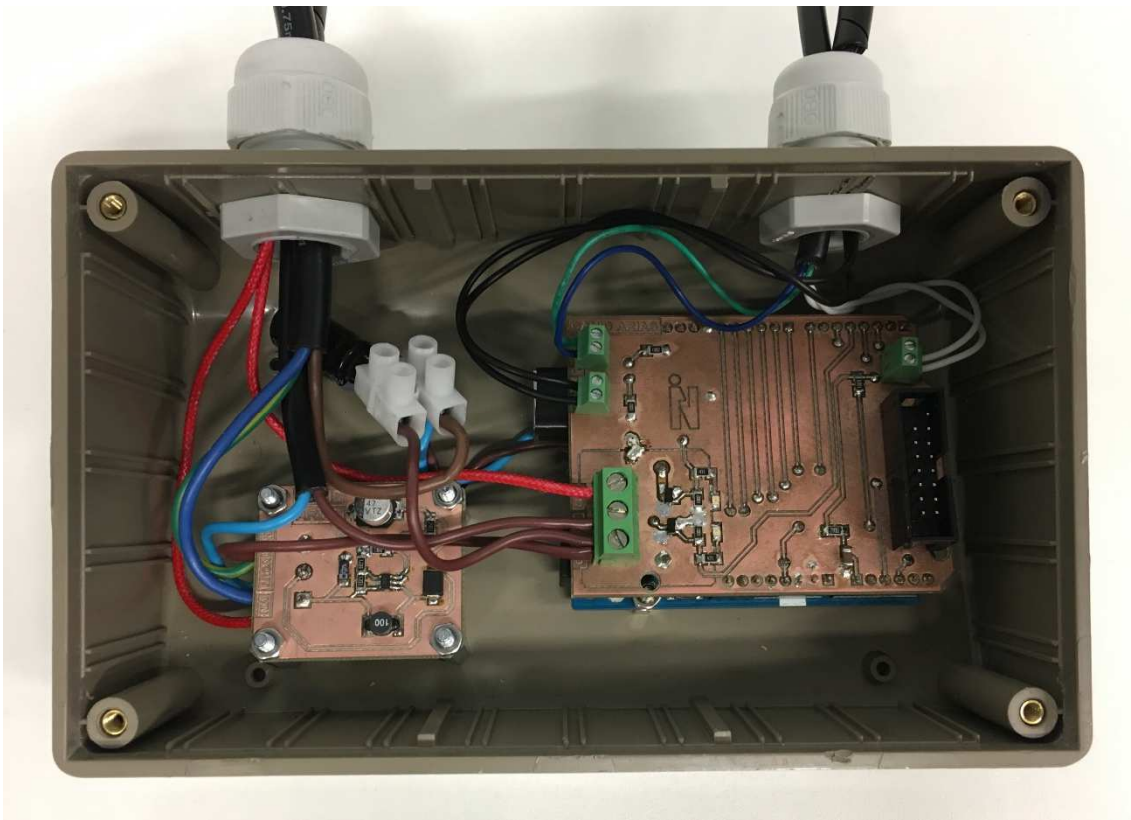


Figura 73. Envoltente tras haber cableado todo el sistema y haber instalado la PCB sobre el Arduino.

Nótese que se ha instalado un condensador electrolítico entre los terminales de alimentación del Arduino empleando la regleta blanca que se puede ver en la imagen anterior. Se trata de un condensador de 1000uF (Ref.Farnell: 1800622) cuya finalidad es estabilizar y eliminar ruidos en la tensión de alimentación del circuito de control.

Finalmente falta por instalar la pantalla táctil. Dicha pantalla se debe de instalar en la tapa de la envoltente, de forma que se ancle utilizando 4 tornillos y quede visible y accesible al usuario. Para ello, se ha medido el perímetro de la misma y se ha fresado un rectángulo del tamaño adecuado. Una vez hecho el orificio, se ha instalado la pantalla por el lado interior de la tapa fijándola con 4 tornillos desde el exterior.

Como se puede ver en la *Figura74* y de acuerdo a lo explica en el *Apartado8.1.4*, se ha soldado el cable plano en los pines de la pantalla y en el otro extremo del cable se ha instalado el conector hembra correspondiente al macho instalado en la PCB. De esta forma, se lleva a cabo una conexión correcta y robusta entre la pantalla y la placa de control y permite la conexión y desconexión rápida para labores de revisión o mantenimiento.

Finalizado todo el montaje, se cierra la tapa y se fija la misma con 4 tornillos.

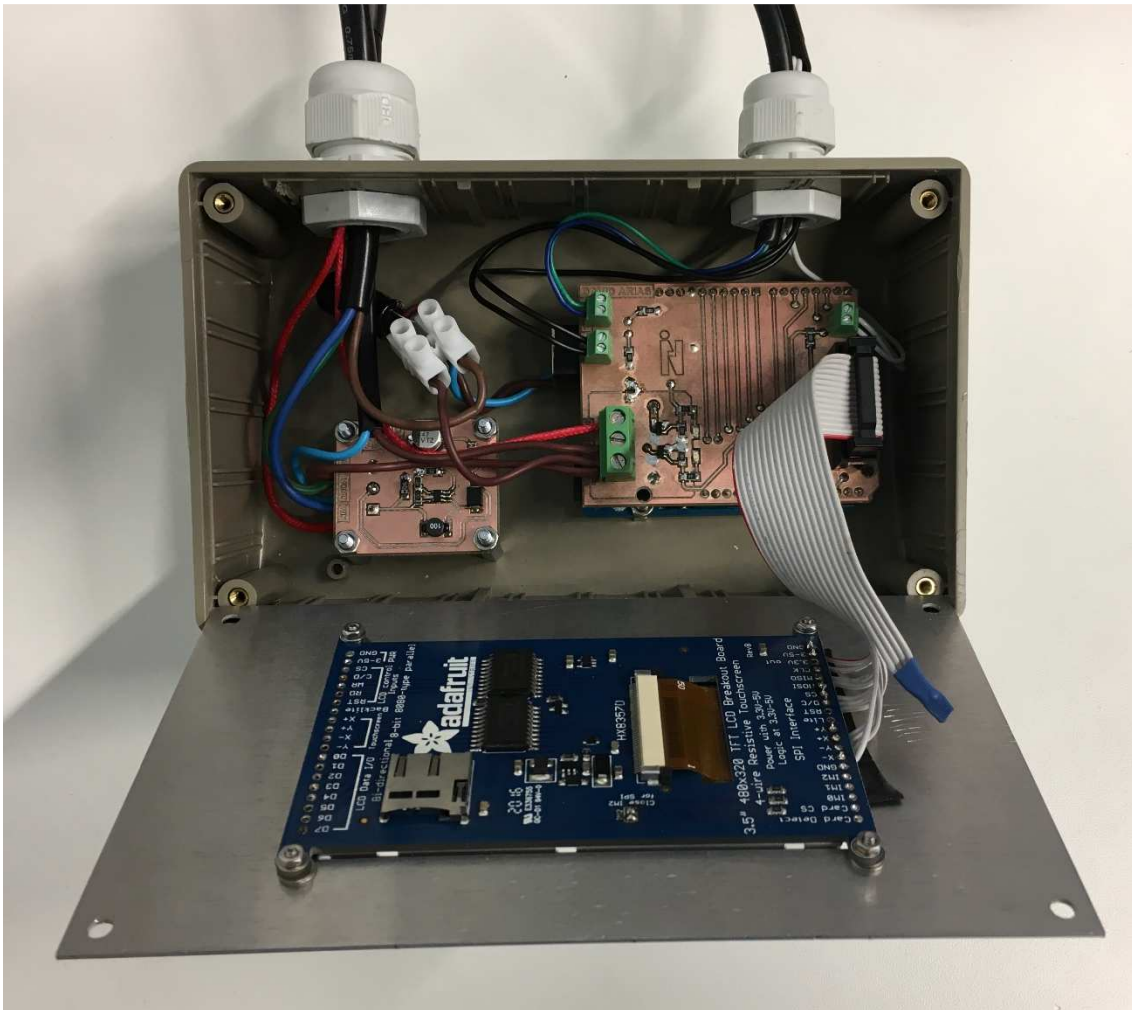


Figura 74. Envoltorio tras fijar la pantalla en la tapa y haberla conectado con la PCB de control.

## 11. PRESENTACIÓN FINAL DEL EQUIPO

Finalizado todo el montaje, en este capítulo se presenta una foto en la que se muestra el sistema completo, formado por la equipo *thermode*, la envolvente con la electrónica, el pedal de accionamiento y las entradas de alimentación (izquierda) y presión (derecha).



Figura 75. Foto del sistema completo.

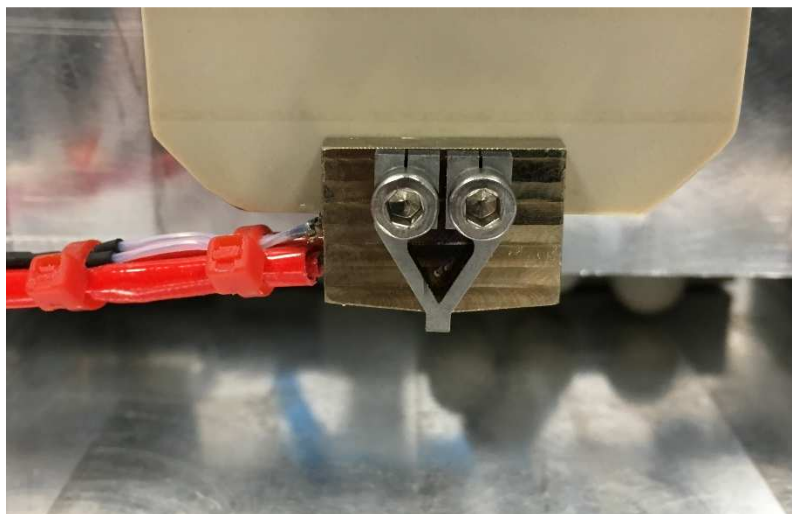


Figura 76. Imagen detalle del conjunto *thermode*, resistencia calefactora y sensor *NTC*.



## 12. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL EQUIPO

Una vez presentado el equipo, el siguiente paso es llevar a cabo las pruebas que validan o no dicho equipo. Recordar que este proyecto tiene como objetivo dar una solución al problema presentado en el *Apartado 1.1*. Dicho problema surge como consecuencia de la necesidad que Fundación PRODINTEC tiene de colocar unos diodos LEDs de tamaño muy reducido ya presentados, cuyas dimensiones se muestran en la *Figura 77*.

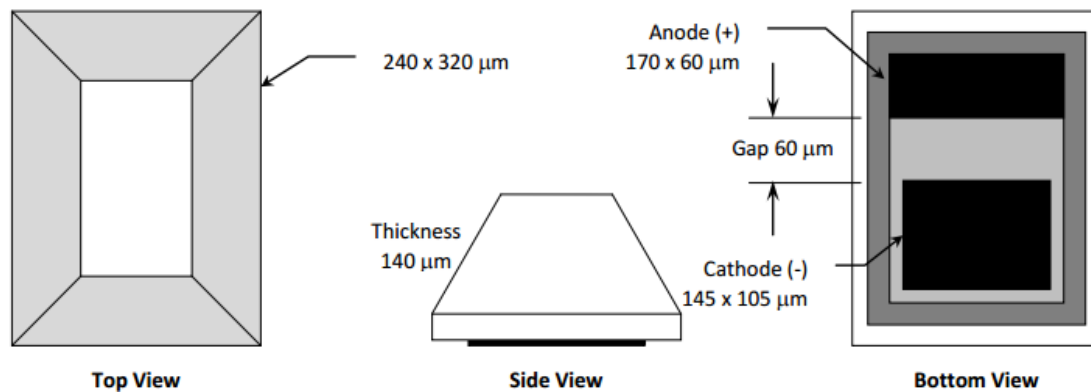


Figura 77. Dimensiones del LED CREE DA2432.

Para validar el equipo, se configura con una temperatura de referencia de  $150^{\circ}\text{C}$  y un tiempo de proceso de 5 segundos y se llevan a cabo varias pruebas de conexión de estos LED. Tras estas pruebas se comprueba que los LEDs quedan mecánicamente fijados y que si se alimentan con la tensión adecuada, todos ellos iluminan de forma correcta. En la *Figura 78* se muestran varios LEDs iluminando y se pueden algunos más colocados correctamente.

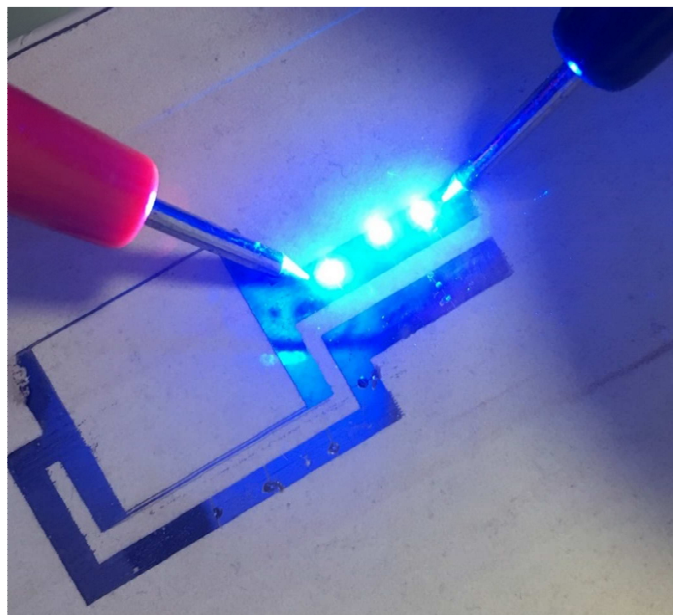


Figura 78. LED iluminando correctamente tras ser conectado con el equipo desarrollado.

Una vez comprobado que el equipo funciona correctamente, se comienzan a colocar LEDs de acuerdo a los circuitos especificados por el cliente.

En primer lugar, se comienza con un circuito que integra dos LED en paralelo. En la *Figura79* se muestra una unidad terminada de este modelo de circuito.

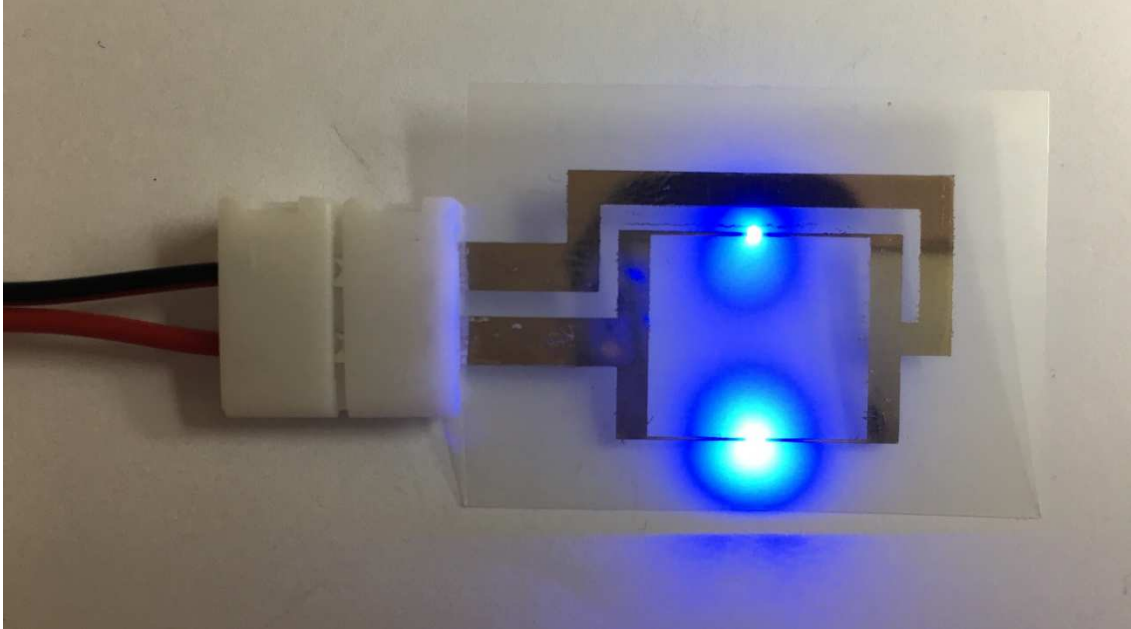


Figura 79. Unidad terminada compuesta por dos LEDs en paralelo.

Posteriormente, se pasa al segundo modelo de circuito solicitado por el cliente. En este caso se trata de matrices de 4x3, con 4 ramas paralelas de 3 LEDs en cada una. En la *Figura80* se muestra una unidad terminada de este modelo de circuito.

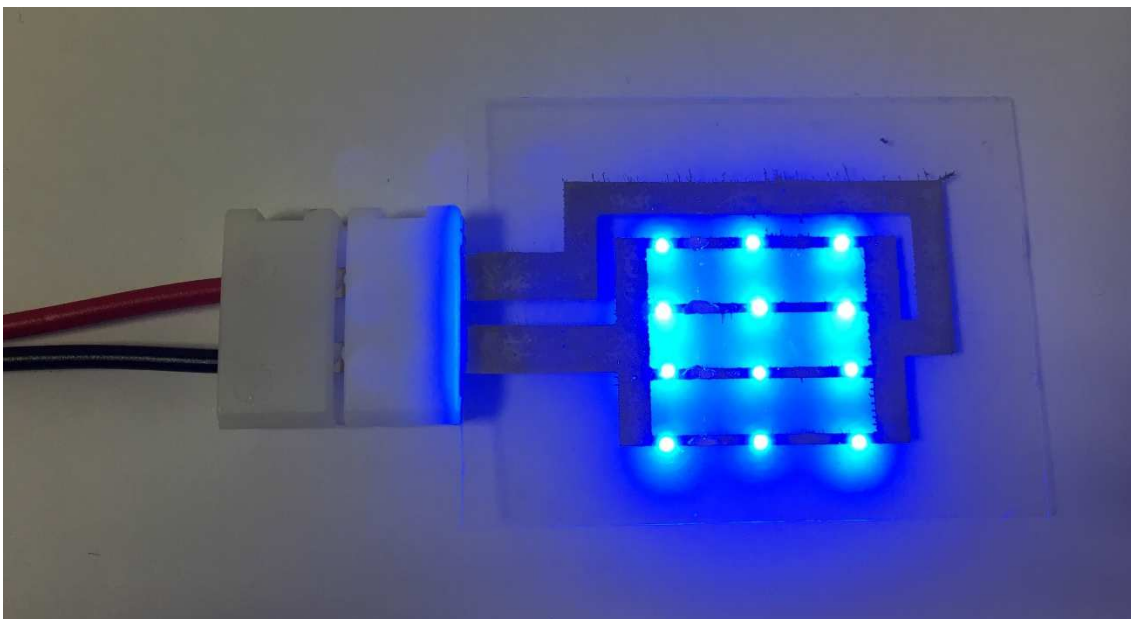


Figura 80. Unidad terminada compuesta por 12 LEDs, 4 ramas paralelas de 3 LEDs cada una.

Además de las unidades solicitadas por el cliente, se llevan a cabo varias unidades con diferentes disposiciones a modo de demostradores con los que Fundación PRODINTEC se quedará con el objetivo de enseñárselas a nuevos clientes. En la *Figura 81* se presenta un demostrador con una configuración diferente a las solicitadas por el cliente, en este caso concreto, son 9 LEDs, 3 ramas de 3 LEDs en cada una.

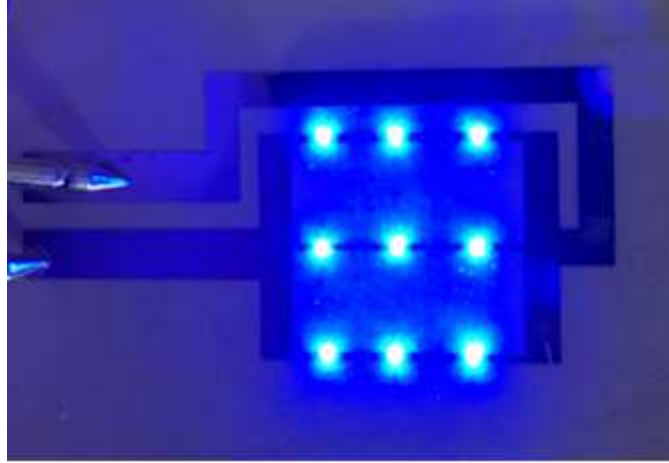


Figura 81. Uno de los demostradores realizados para Fundación PRODINTEC.

Para todas las unidades enviadas al cliente, y los demostradores realizados para Fundación PRODINTEC, el adhesivo anisotrópico empleado ha sido el DELO-MONOPOX AC365 presentado ya anteriormente. La decisión de haber usado la versión fluida y no la versión de cinta doble cara ha sido tomada de acuerdo a los resultados obtenidos tras hacer las pruebas con ambos utilizando la primera versión manual del equipo. Se recuerda que con la versión de cinta no se había logrado conectar ningún LED de forma correcta pero con la versión fluida 3 LEDs habían iluminado correctamente. A esto hay que sumarle y recordar, que según la hoja de características del adhesivo anisotrópico en versión de cinta doble cara utilizado, 3M Anisotropic Conductive Film 7379, el área mínima de pad exigida es superior al área de los pad del LED que requería el cliente.

Antes de finalizar el capítulo de pruebas y resultados del equipo, se ha querido introducir el siguiente apartado en el que se presenta un problema observado durante el funcionamiento del equipo como consecuencia de la existencia de ruido eléctrico en la señal analógica que se emplea para calcular la temperatura.

## 12.1. Consideraciones sobre el ruido eléctrico en el equipo

Se denomina ruido eléctrico a todas aquellas señales de interferencia no deseadas, de origen eléctrico, que se unen a la señal principal alterándola y produciendo efectos más o menos perjudiciales.

En este caso, el ruido eléctrico se ha identificado como consecuencia de observar que la temperatura leída por el control a través del sensor de temperatura *NTC*, tenía una oscilación anómala constate. En un primer momento, se pensó que podría deberse a un problema derivado

del control de temperatura, pero tras comprobar con un osciloscopio la señal que ofrece el sensor y que entra a la placa de control, se ha comprobado que el problema era hardware y que se trataba de ruido eléctrico en la señal analógica. Este ruido, puede deberse a varios factores, pero cabe pensar que los dos problemas principales son el propio ruido que mete en el sistema la fuente de alimentación externa y en segundo lugar a la conmutación de los *MOSFET*, especialmente el que controla la resistencia calefactora por tratarse de una carga de relativa potencia. Se ha tomado una captura empleando el osciloscopio y se muestra en la imagen de la izquierda de la *Figura82*.

Se recuerda que se había empleado un condensador y una resistencia formando un filtro *RC* en la entrada de la señal del sensor hacia la placa de control. Con el objetivo de filtrar más aún la señal se han modificado los valores de ambos componentes de acuerdo a la *Tabla27*, obteniendo una señal un poco más limpia mostrada a la derecha en la *Figura83*.

Filtro antes	Filtro después
R9 = 20Ω (Ref.Farnell: 2447484)	R9 = 200 Ω (Ref.Farnell: 2074591)
C1 = 1uF (Ref.Farnell: 2370231)	C1 = 100uF (Ref.Farnell: 1135048)

Tabla 27. Modificación de los valores de condensador y resistencia del filtro *RC*.

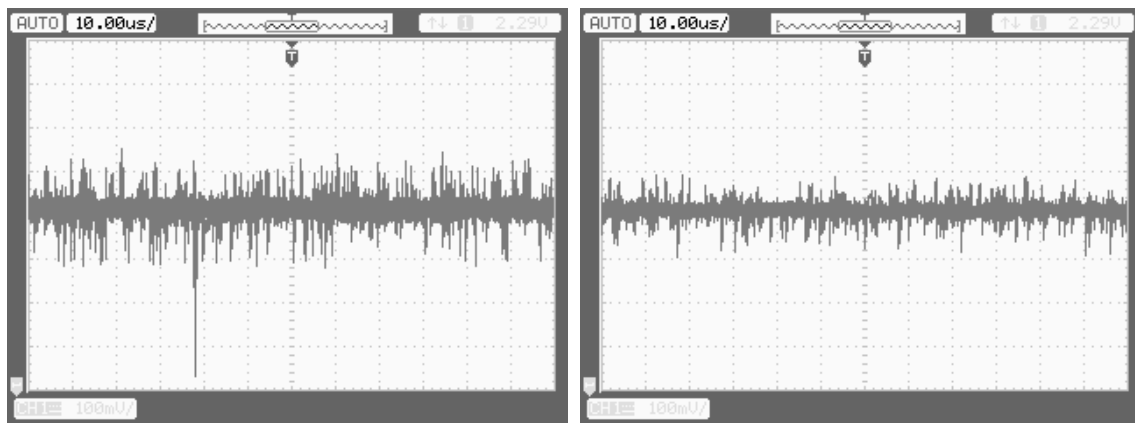


Figura 82. Capturas tomadas con osciloscopio de la señal analógica correspondiente al sensor *NTC*.

Con el objetivo de disminuir el ruido aún más, se ha trenzado el par de cables del sensor de temperatura desde el extremo del mismo hasta la envoltura que protege la electrónica. Finalmente se ha adquirido una envoltura en espiral de polietileno (Ref.Farnell: 1674207) con el objetivo de enfundar los cables de alimentación y las líneas de control de forma independiente, como se ha podido observar en las imágenes del equipo anteriores.

Añadir que a pesar de todas estas medidas hardware adoptadas para bajar el ruido eléctrico presente en la señal de lectura de la temperatura, no ha sido posible eliminarlo completamente por lo que a todas esas medidas hardware anteriores se ha sumado el empleo de un filtro digital sencillo, implementado como una media de 20 valores cada vez que se lee la temperatura.

## 13. CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Si se consulta el último párrafo del Apartado1.2 de esta memoria, denominado *Objetivos*, se puede leer lo siguiente:

*“Como consecuencia de la necesidad planteada en el apartado anterior y el análisis de las ventajas del desarrollo de una solución a medida frente a la adquisición de un equipo comercial, este TFM tiene como objetivo desarrollar un equipo a medida que permita la fijación de componentes electrónicos utilizando adhesivos anisotrópicos, teniendo en cuenta los rangos de temperatura y presión requeridos para las aplicaciones en las que Fundación PRODINTEC trabaja.”*

Tras analizar los resultados obtenidos y mostrados en el capítulo anterior, se puede confirmar que el objetivo de este TFM ha sido cumplido, desarrollando un equipo a medida capaz de emular las condiciones de fuerza y presión necesarias para el uso de adhesivos anisotrópicos dentro de los rangos de trabajo en los que Fundación PRODINTEC tiene interés.

### 13.1. Discusión acerca del muelle de compresión y alternativas

El equipo desarrollado ofrece una flexibilidad respecto a la configuración de los tres parámetros del proceso; tiempo, temperatura y presión. En cuanto a los dos primeros, se trata de un ajuste a través de una interfaz implementada sobre una pantalla gráfica táctil, lo cual da un valor importante al equipo. Por el contrario, el ajuste de la presión no es posible llevarlo a cabo a través de la interfaz, ya que el actuador que se encarga de la fuerza es una electroválvula de tipo *todo-nada*. Como alternativa se ha empleado un muelle de compresión unido a una tuerca y un tornillo, que permite conocer la fuerza aplicada sobre el componente de acuerdo a la constante de elasticidad del muelle y la elongación producida en el mismo. Se trata de una solución que permite la conexión con éxito de componentes electrónicos pero que puede sustituirse por alternativas más elaboradas.

En primer lugar, podría utilizarse un sensor de presión para calibrar la fuerza ejercida antes de comenzar el proceso. Para ello sería necesario colocar el sensor bajo el *thermode*, activar la electroválvula y ajustar el muelle de compresión con la tuerca a lo largo del tornillo hasta alcanzar la presión requerida. Hecho esto, se retiraría el sensor, se apretaría la contratuerca para evitar que variase el ajuste realizado y el proceso se llevaría a cabo con una presión conocida y medida. Se trata de una alternativa relativamente barata que aporta un conocimiento más concreto de la fuerza aplicada por el cilindro.

Como segunda alternativa, en el Apartado5.2 se ha seleccionado un regulador proporcional de presión que permitiría el control de la fuerza ejercida por el cilindro neumático durante todo el proceso utilizando una señal de control analógica. De esta forma, sería posible integrar la fuerza como un parámetro más a configurar mediante la interfaz antes de comenzar el proceso, como lo es la temperatura o el tiempo.

## 13.2. Discusión acerca del control de temperatura y alternativas

En cuanto al control de temperatura, se ha llegado a una estrategia que mantiene la temperatura en una banda de  $\pm 4$  grados alrededor de la temperatura de referencia. Se trata de una oscilación admisible, aunque no debería de aumentar mucho más para garantizar el éxito del proceso.

A pesar de que el control utilizado cumple con los requerimientos ya que el equipo es capaz de conectar componentes de forma correcta, sería interesante abordar una línea de trabajo con el objetivo de desarrollar un control más completo que sea capaz de mantener la temperatura de referencia sin errores. Existen alternativas más elaboradas como un regulador proporcional-integral, o incluso un regulador proporcional-integral-diferencial.

## 13.3. Trabajo futuro

Al inicio de este TFM se ha justificado el desarrollo de un equipo a medida por dos motivos. En primer lugar Fundación PRODINTEC no tiene interés de un equipo que abarque un rango de temperaturas tan elevado como los comerciales. En segundo lugar se quería desarrollar un prototipo que fuese el paso previo y el análisis de viabilidad de una metodología que interesa integrar a corto y medio plazo en la línea *roll-to-roll (R2R)* que Fundación PRODINTEC tiene para la fabricación continua de circuitos flexibles.

Como consecuencia, el trabajo futuro se encamina a enriquecer las metodologías empleadas en el equipo aquí desarrollado y adaptarlas para permitir llevar el uso de los adhesivos anisotrópicos a la producción de circuitos flexibles con líneas *roll-to-roll (R2R)*.

## 13.4. Conclusión final

A pesar de existir un gran número de mejoras que se pueden aplicar al equipo desarrollado, con este TFM se ha logrado abordar el mundo de los adhesivos anisotrópicos, una tecnología de conexión en pleno desarrollo teniendo en cuenta que los productos electrónicos cada vez son más pequeños y muchos de ellos buscan tener una flexibilidad.

Con el equipo desarrollado se han logrado conectar componentes electrónicos cuya distancia entre pads es de 60 micras. Se tratan de componentes con unas distancias que anteriormente no habían sido posibles conectar empleando tecnologías estándar como adhesivos isotrópicos o estaño, y que gracias al uso de los adhesivos anisotrópicos han podido ser conectados correctamente.

## 14. REFERENCIAS

- [1] Amada Miyachi. "Achieving Interconnection with Pulse-Heated Bonding".  
[Online] Available:  
[http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources\\_articles&file=01580000001K0Df](http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_articles&file=01580000001K0Df)
- [2] Amada Miyachi. "Pulse Heated Thermode Selection Guide".  
[Online] Available:  
<http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Fproduct%3Fcategoryid%3Dhot-bar%26groupid%3Dhot-bar-power-supplies%26productid%3Duniflow&file=01530000000JcQmAAK>
- [3] AdaFruit. "Adafruit 3.5" 320x480 Color TFT Touchscreen Breakout".  
[Online] Available:  
<https://learn.adafruit.com/adafruit-3-5-color-320x480-tft-touchscreen-breakout?view=all>
- [4] Harel, David. "Statecharts: A visual formalism for complex systems". *Science of computer programming* 8.3, pp. 231-274, 1987.
- [5] Yacoub, Sherif M., and Hany H. Ammar. "A pattern language of statecharts". *Proc. Fifth Annual Conf. on the Pattern Languages of Program*, 1998.
- [6] Adamczyk, Paul. "Selected patterns for implementing finite state machines." *The 11th Conference on Pattern Languages of Programs*, 2004.
- [7] Tresdland. "Tutorial Arduino Sensor de Temperatura NTC".  
[Online] Available:  
<https://www.tr3sdland.com/2011/12/tutorial-arduino-0005-sensor-de-temperatura-ntc/>

## 15. PLANIFICACIÓN

Para la realización de este proyecto se ha seguido la planificación mostrada en el diagrama de Gantt que se muestra en este capítulo. El proyecto ha tenido como fecha de inicio el lunes 3 de octubre de 2016 y como fecha de fin el martes 31 de enero de 2017.

Fecha de inicio	Lunes, 3 de octubre de 2016
Fecha de fin	Martes, 31 de enero de 2017

Tabla 28. Fechas de inicio y fin del TFM.

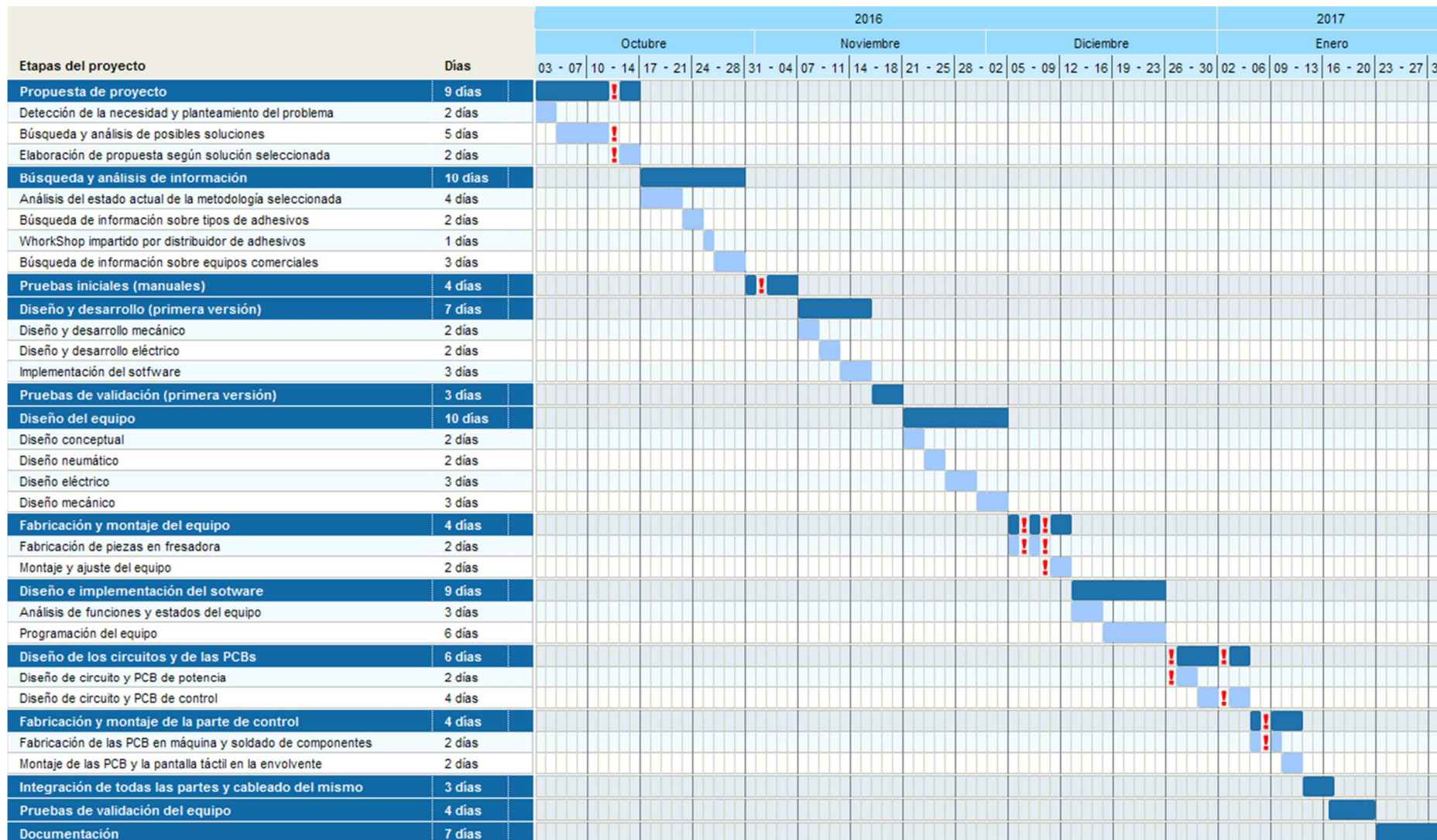
De acuerdo a estas fechas de inicio y fin, se calculan 87 días de lunes a viernes de los cuales hay que descontar 7 festivos que no han sido laborables en Asturias. Estos días están marcados en el Diagrama de Gantt y se tratan de los días recogidos en la *Tabla 29*. Descontados estos 7 festivos, la duración total de este proyecto ha sido de 80 días.

Miércoles, 12 de octubre de 2016	Fiesta Nacional de España
Martes, 1 de noviembre de 2016	Día de Todos los Santos
Martes, 6 de diciembre de 2016	Día de la Constitución Española
Jueves, 8 de diciembre de 2016	Día de la Inmaculada Concepción
Lunes, 26 de diciembre de 2016	Día de Navidad
Lunes, 2 de enero de 2017	Día de Año Nuevo
Viernes, 6 de enero de 2017	Día de Reyes

Tabla 29. Festivos en Asturias dentro del periodo de ejecución del TFM.

A continuación se presenta un Diagrama de Gantt donde se recogen las etapas desglosadas que se han seguido para desarrollar el proyecto, indicando en cada una la duración en días laborables que ha tenido e indicando los días en los que dicha tarea se ha llevado a cabo.





## 16. PRESUPUESTO

En este capítulo se presentan los gastos y el presupuesto del desarrollo de este TFM. Dicho presupuesto se ha dividido en gasto de materiales y gasto de personal.

### 16.1. Importe de materiales

En este apartado se muestran los importes de todos los materiales y piezas que se han requerido para el desarrollo del equipo, agrupados en diferentes conceptos.

CONCEPTO: MÓDULO NEUMÁTICO			
Descripción	Uds.	Precio/ud	Importe
Electroválvula	1	51,45 €	51,45 €
Cilindro neumático	1	216,46 €	216,46 €
Regulador de presión manual	1	30,05 €	30,05 €
Tubo neumático de 6mm (1metro)	1	1,61 €	1,61 €
Regulador de caudal y reestrictor	2	7,40 €	14,79 €

SUBTOTAL: 314,37 €

CONCEPTO: MODULO ELÉCTRICO Y CONTROL			
Descripción	Uds.	Precio/ud	Importe
Arduino UNO	1	20,07 €	20,07 €
Pantalla táctil	1	30,84 €	30,84 €
Envolvente para organizar PCBs	1	15,93 €	15,93 €
Fabricación y montaje de PCB Boost	1	17,50 €	17,50 €
Fabricación y montaje de PCB Control	1	47,41 €	47,41 €
Final de carrera de cilindro	2	0,82 €	1,64 €
Pulsador/Pedal	1	14,16 €	14,16 €
Sensor de temperatura NTC	2	1,56 €	3,12 €
Resistencia calefactora	2	1,64 €	3,29 €
Fuente de alimentación	1	50,50 €	50,50 €
Cable de alimentación de 3 hilos (metro)	2	2,61 €	5,22 €
Cable de señal de 1 hilo (metro)	2	0,70 €	1,40 €
Conector red electrica + cable 3 hilos (metro)	1	6,75 €	6,75 €
Herramientas de fijación/conexión de cables	1	12,40 €	12,40 €
Envoltura de PVC para organizar cables	1	5,00 €	5,00 €
Pasamuros para la envolvente	2	1,21 €	2,43 €

SUBTOTAL: 237,67 €

CONCEPTO: FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL EQUIPO			
Descripción	Uds.	Precio/ud	Importe
Thermodes comerciales	9	12,61 €	113,50 €
Guía lineal + patín	1	21,48 €	21,48 €
Muelle de compresión a medida	1	11,22 €	11,22 €
Mecanizado de piezas del equipo	1	266,12 €	266,12 €
Tornillos de montaje	20	0,66 €	13,22 €

SUBTOTAL: 425,55 €

Detallar que el importe del ítem cuyo concepto es *Mecanizado de piezas del equipo*, hace referencia al precio final que ha supuesto la fabricación de las piezas, incluyendo el gasto en materiales (100€) y el gasto por hora de operario y máquina (37€/hora por 6 horas).

CONCEPTO: OTROS GASTOS			
Descripción	Uds.	Precio/ud	Importe
Material de oficina	1	16,53 €	16,53 €
EPIs y prevención de riesgos	1	99,17 €	99,17 €

SUBTOTAL: 115,70 €

Sumando las 4 tablas anteriores, se obtiene el total neto en materiales.

TOTAL MATERIALES	
Concepto	Importe
Módulo neumático	314,37 €
Fabricación y montaje del equipo	425,55 €
Módulo eléctrico y control	237,67 €
Otros gastos	115,70 €

TOTAL MATERIALES: 1.093,29 €

## 16.2. Importe en personal

En este apartado se muestra el gasto de personal necesario para la realización de este TFM. El total de horas entre ingeniería, ejecución técnica y documentación es de 640 horas.

CONCEPTO: PERSONAL			
Descripción	Uds.	Precio/ud	Importe
Hora de mano de obra ingeniería	432	30,00 €	12.960,00 €
Hora de mano de obra técnico	152	20,00 €	3.040,00 €
Hora de mano de obra de documentación	56	25,00 €	1.400,00 €

SUBTOTAL: 17.400,00 €

## 16.3. Importe total

Sumando el gasto en materiales y en personal, y tras aplicar el IVA se obtiene un total de 22.376,88 € como se recoge en la siguiente tabla.

Total Materiales:	1.093,29 €
Total Personal:	17.400,00 €
BASE IMPONIBLE:	18.493,29 €
IVA %21:	3.883,59 €
TOTAL:	22.376,88 €

El coste total del proyecto asciende a VEINTIDÓS MIL TRESCIENTOS SETENTA Y SEIS EUROS CON OCHENTA Y OCHO CÉNTIMOS (22.376,88 €).

Gijón, a 31 de enero de 2017

## 17. ANEXO A: PRUEBAS INICIALES

Antes de comenzar con el desarrollo del equipo planteado para este TFM, orientado al uso de los adhesivos anisotrópicos, parece interesante comenzar a hacer pruebas relacionadas con la colocación de componentes de proyectos en curso. Estas pruebas iniciales pueden ser un paso importante para el desarrollo del equipo final, observando aspectos importantes del proceso que puedan condicionar el correcto funcionamiento del componente fijado.

Fundación PRODINTEC dispone de dos adhesivos anisotrópicos como se ha mencionado en el primer capítulo. Se trata de una cinta anisotrópica del fabricante *3M* y de un adhesivo de tipo fluido del fabricante *DELO*. Con el fin de poder simular el proceso que lleva a cabo un *thermode* de forma sencilla, se han estudiado las hojas de características de ambos adhesivos. Añadir que se tratan de adhesivos con una composición química muy concreta lo que condiciona la necesidad de establecer condiciones muy específicas para su uso y almacenaje. No obstante, para estas pruebas iniciales, todo el análisis se centra en las condiciones de uso, especialmente en el tiempo, temperatura y presión necesaria.

### 17.1. Uso de la cinta de para fijar 2 LEDs de tamaños 0805 y 0603

En primer lugar se estudia el uso de la cinta anisotrópica del fabricante *3M*, concretamente del producto *3M Anisotropic Conductive Film 7379*. Analizando su hoja de características se comprueba que el uso de esta cinta conlleva dos etapas diferentes. La primera ellos se trata de la fijación de la cinta al sustrato flexible, colocándola sobre los pads del circuito donde se ha de situar el componente. Posteriormente se ha de retirar el film que recubre la cinta y se lleva a cabo la segunda de las etapas, que consiste en la colocación del componente sobre la cinta previamente fijada. El fabricante denomina *Tacking Conditions* y *Bonding Conditions* respectivamente a las dos etapas necesarias en el proceso. En la *Figura83* se recoge la temperatura, la presión y el tiempo de ambas etapas.

Procedure	Conditions
<b>Tacking Conditions</b> Temperature <sup>(10)</sup> Pressure Time	60 - 90°C 1 - 15 kg/cm <sup>2</sup> ~1 sec
<b>Bonding Conditions</b> Temperature <sup>(11)</sup> Pressure Time <sup>(11)</sup>	160 - 190°C 20 - 30 kg/cm <sup>2</sup> 10 - 20 sec

Figura 83. Condiciones del proceso utilizando la cinta adhesiva *3M Anisotropic Conductive Film 7379*.

Parece que son unas condiciones que se pueden alcanzar de forma relativamente sencilla con instrumentos y herramientas existentes en el laboratorio por lo tanto se hace la primera prueba. Para ello se imprime un circuito sencillo compuesto de dos líneas rectas sobre sustrato *PET* utilizando serigrafía plana. Tras el proceso de curado de la tinta, se hace un

*Desarrollo de un equipo a medida para la conexión de microcomponentes electrónicos sobre sustratos flexibles mediante adhesivos anisotrópicos*

pequeño corte en la parte central de la línea impresa con el objetivo de poner dos LEDs de tamaños 0805 y 0603 respectivamente.



Figura 84. Circuito eléctrico diseñado para colocar dos LEDs de tamaños 0805 y 0603 respectivamente.

Diseñado el circuito y de acuerdo al proceso descrito por el fabricante 3M mostrado en la *Figura85*, la primera fase consiste en la adhesión de la cinta sobre los pads del circuito. Para ello se ha cortado un trozo de cinta que comprenda ambos pads del LED y se ha colocado sobre el sustrato. Posteriormente el sustrato se ha situado sobre una mesa calefactora como las que se emplean las impresoras 3D con el fin de alcanzar una temperatura dentro del rango necesario. La mesa utilizada no es regulable pero según sus especificaciones se mantiene en una temperatura de unos 90°C por lo que sirve para esta tarea.

Para ejercer la presión requerida sobre la cinta y fijarla sobre el sustrato, se emplea la parte superior de una pinza metálica de soldar, ejerciendo una fuerza leve durante unos 2-3 segundos como se muestra en la *Figura85*.

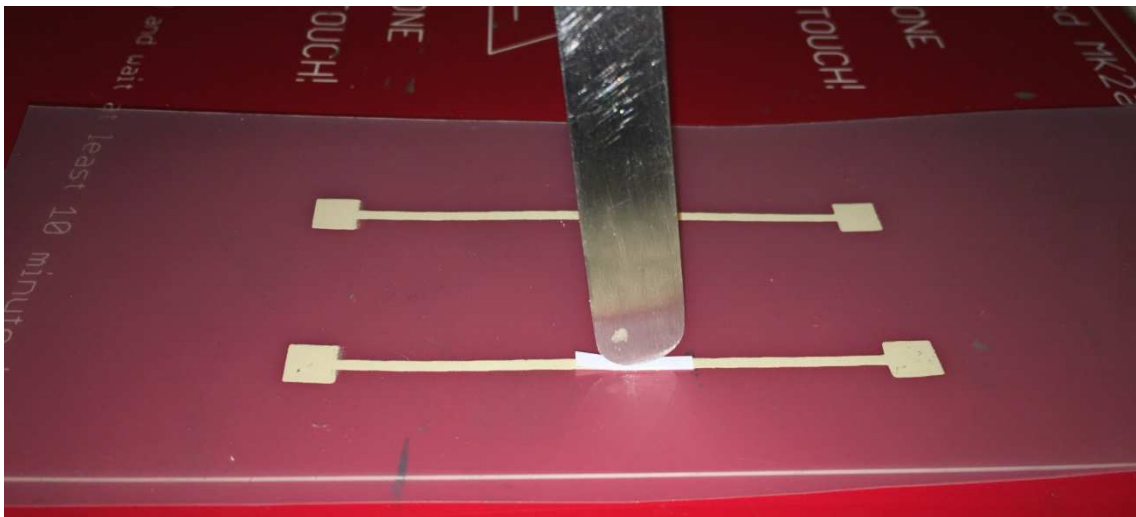


Figura 85. Proceso manual para adherir la cinta anisotrópica al sustrato utilizando una pinza de soldar.

Una vez se ha adherido la cinta al sustrato, se retira el film protector de la cara superior de la misma y se comienza la segunda tarea del proceso. Para ello se coloca el LED sobre la cinta, asegurándose de que los pads del LED se encuentran exactamente sobre los pads impresos en

el circuito. Posteriormente se coloca el sustrato con en LED sobre una mesa calefactora regulable cuya consigna se establece en 170°C. Finalmente y con ayuda de una barra de sección cuadrada de 5x5mm, se ejerce una fuerza media durante unos 15 segundos como se muestra en la *Figura86*.



Figura 86. Proceso manual para fijar el LED sobre el circuito utilizando la barra de sección cuadrada.

A continuación se repiten las dos tareas del proceso de forma análoga con el otro LED obteniendo un circuito compuesto de dos LED 0805 y 0603 respectivamente, como el que se presenta en la *Figura87*.



Figura 87. Resultado tras el proceso de conexión de dos LEDs de tamaños 0805 y 0603.

Tras alimentar ambos circuitos, se confirma que el proceso se ha llevado a cabo con éxito, ya que no existe cortocircuito entre los dos pads de los LEDs y además la conexión eléctrica entre ellos y el circuito impreso es correcta ya que ambos iluminan.

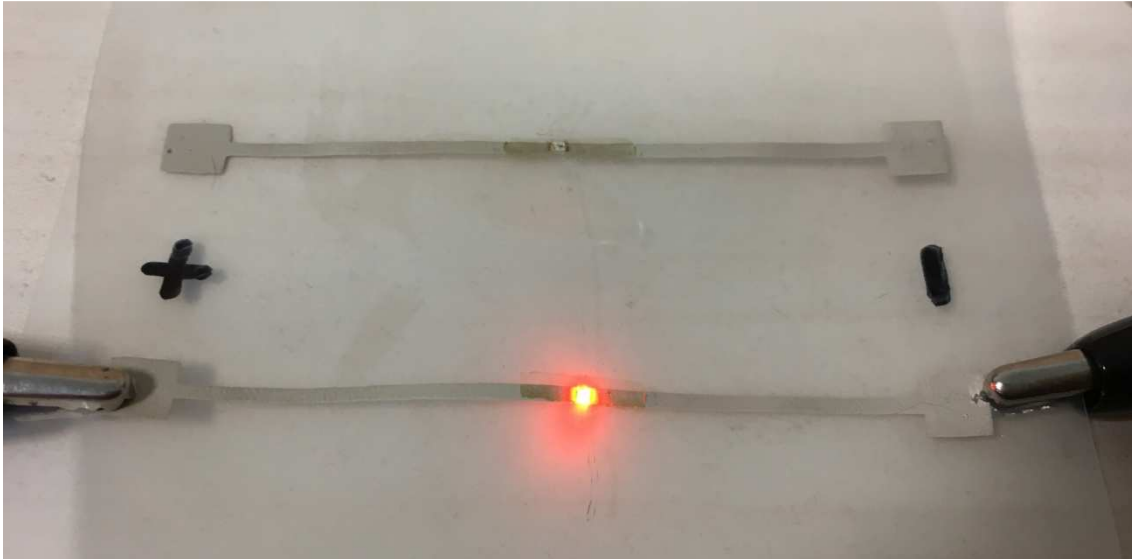


Figura 88. Captura tomada del momento de prueba del LED 0603 tras el proceso de conexión.

Aprovechando que en el laboratorio de Fundación PRODINTEC existe un microscopio cuya imagen se puede ver en el ordenador, se ha tomado una imagen del resultado obtenido tras el proceso llevado a cabo con el LED más pequeño, de tamaño 0603.



Figura 89. Imagen tomada con un cámara microscopio tras fijar un LED 0603 con la cinta anisotrópica.

## 17.2. Uso de la cinta para fijar un integrado con encapsulado WSON-14

Fundación PRODINTEC se encuentra actualmente desarrollando un sensor biomédico cuyo diseño electrónico ha exigido utilizar un integrado de dimensiones muy pequeñas. Se trata del integrado LMP91000SDE del fabricante *Texas Instruments* que tiene un encapsulado *14-Pin WSON* y cuyas cotas se muestran en la *Figura90*. La explicación del funcionamiento del sensor es prescindible para el desarrollo de este TFM y por motivos de confidencialidad exigida por el cliente no se detalla.



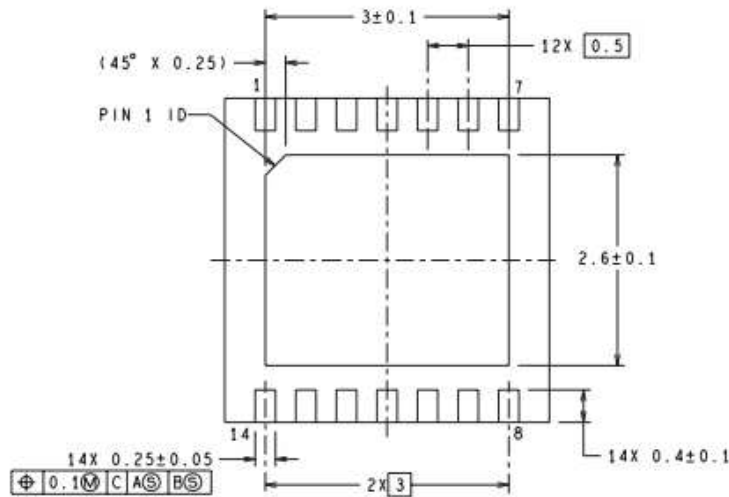


Figura 90. Cotas del integrado *PMP9100SDE* de *Texas Instruments*.

Como se puede ver en la imagen anterior, el integrado tiene 14 pines repartidos a lo largo de dos de sus lados. La distancia entre el centro de dos pines contiguos es de 0.5mm y el ancho de cada pin es de 0.25mm, lo que deja un espacio entre pines de 0.25mm. Se tratan de unas medidas aceptables para la soldadura con estaño sobre una PCB tradicional pero estas dimensiones complican su fijación sobre un circuito flexible utilizando adhesivo isotrópico. Debido a esto, la fijación de este integrado puede ser interesante como prueba experimental del uso de adhesivo anisotrópico.

De forma análoga a lo explicado en la prueba del LED la primera fase consiste en la adhesión de la cinta anisotrópica sobre los pads impresos en el sustrato flexible. Para esta primera parte se ha utilizado la misma técnica que la utilizada anteriormente, empleando la parte superior de las pinzas de soldar y la mesa calefactora no regulable. Tras retirar el film protector, se sitúa el integrado sobre los pads correspondientes y se lleva a cabo la segunda parte del proceso de forma análoga a como se hizo previamente con el LED, utilizando la barra de sección cuadrada para ejercer de forma manual una fuerza media.

Llegados a este punto y tras realizar varias pruebas, se observa el siguiente detalle. A la hora de hacer la fuerza sobre el componente de forma manual, ésta no se lleva a cabo de forma totalmente perpendicular al sustrato. Debido a esto, cuando la cinta anisotrópica embebe el componente, no lo hace verticalmente, dando lugar a ligeros desplazamientos en el plano del sustrato. Estos desplazamientos pueden ser suficientes para que las conexiones entre circuito y componente no se lleven a cabo de forma correcta, dando lugar a un futuro funcionamiento erróneo del integrado o incluso a su deterioro como consecuencia de las pequeñas dimensiones del integrado. En la *Figura91* se presenta una captura obtenida con el microscopio de laboratorio en la que se ha marcado una zona donde se presenta este problema mencionado.

Analizando este resultado, se puede comprobar que la fuerza ejercida sobre el componente durante el proceso ha de ser lo más vertical posible, con el objetivo de que dicho componente se embeba de forma totalmente vertical y de este modo los pads del integrado y del circuito queden coincidente al finalizar el proceso.

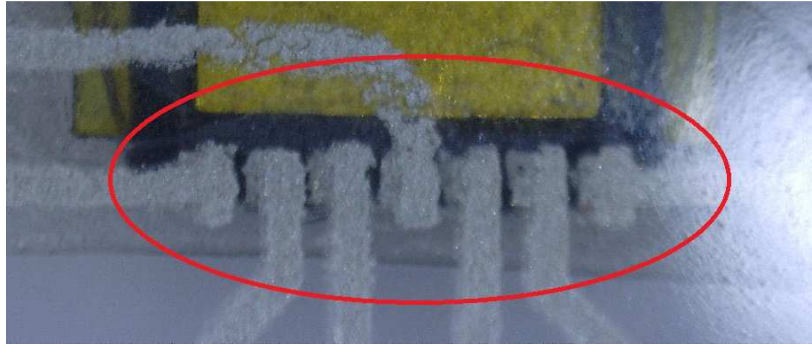


Figura 91. Captura obtenida con el microscopio que muestra la necesidad de una fuerza vertical.

Como consecuencia de esta necesidad de verticalidad en la fuerza a aplicar, se busca un sistema que permita mejorar este detalle. La idea que surge es usar un taladro de columna pequeño que hay en el laboratorio de electrónica, colocándole en el mandril una pieza cilíndrica. La pieza utilizada consiste en una broca de precisión a la que se le ha cortado la parte mecanizada con el objetivo de obtener un cilindro de 3mm de diámetro. A continuación se muestra una imagen de detalle del taladro con la pieza instalada en el mandril.

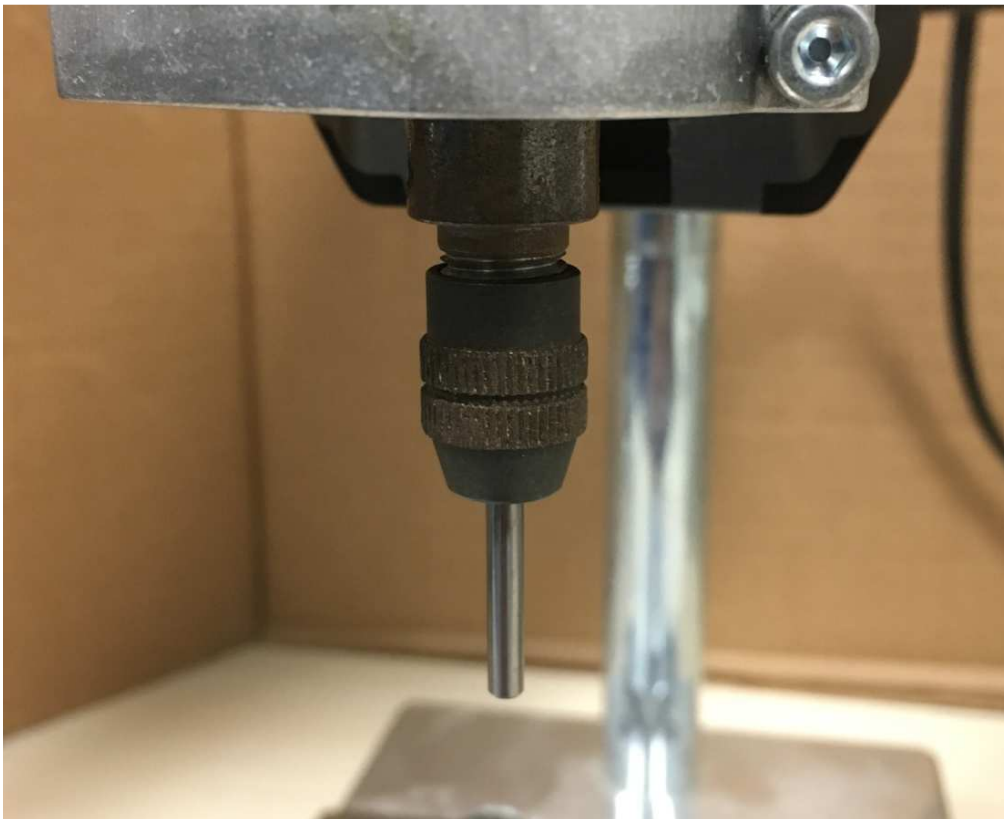


Figura 92. Imagen detalle de la pieza cilíndrica instalada en el mandril del taladro.

Bajo el taladro de columna propuesto para solucionar la necesidad de verticalidad en la fuerza, se sitúa la mesa calefactora regulable utilizada anteriormente, llegando a una configuración como se muestra en la *Figura93*.



Figura 93. Configuración utilizada para fijar el integrado del sensor utilizando cinta anisotrópica.

Esta configuración, parece que puede solucionar el problema de la falta de verticalidad a la hora de ejercer la fuerza requerida. Debido a esto, se vuelve a hacer la prueba de fijar el integrado de *Texas Instruments* pero en lugar de ejercer la fuerza a mano con la barra, se ejerce con la configuración mostrada. En la *Figura94* se presenta una foto tomada durante el proceso, en la que se muestra con detalle la pieza cilíndrica anclada al mandril del taladro ejerciendo la presión requerida sobre el componente.

Tras el proceso descrito, se puede comprobar sin falta de ningún instrumento que los pads del integrado y del circuito impreso se encuentran correctamente superpuestos. Aun así, se ha utilizado el microscopio para tomar una captura de la parte inferior del sustrato en la que se puede ver ampliada la correcta colocación del integrado respecto al circuito flexible.

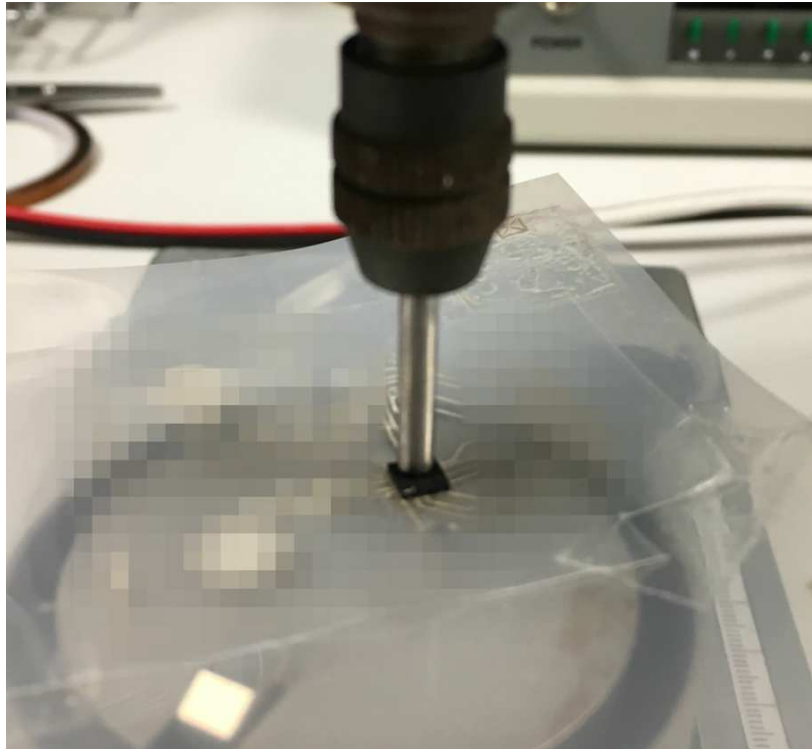


Figura 94. Imagen detalle obtenida durante el proceso utilizando el taladro de columna.  
(El circuito se ha pixelado por motivos de confidencialidad exigidos por el cliente)

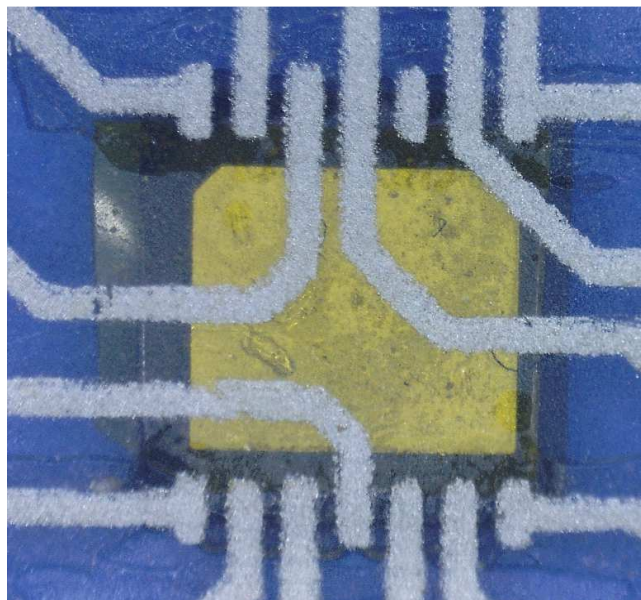


Figura 95. Captura del integrado correctamente colocado obtenida con el microscopio.

### 17.3. Uso de la cinta para fijar un LED de tamaño 240x320µm

Una vez que parece que se ha establecido una configuración y una metodología correcta para utilizar la cinta anisotrópica de forma temporal hasta que se desarrolle el equipo final, se ha querido estudiar el comportamiento de la cinta en condiciones más críticas. Para ello, parece razonable hacer la primera prueba con los LEDs de tamaño 240x320µm, cuya fijación es la que ha dado lugar al desarrollo de este TFM.

A continuación se recuerdan en una imagen las dimensiones del componente propuesto por el cliente del proyecto, los LEDs con referencia *CREE DA2432*.

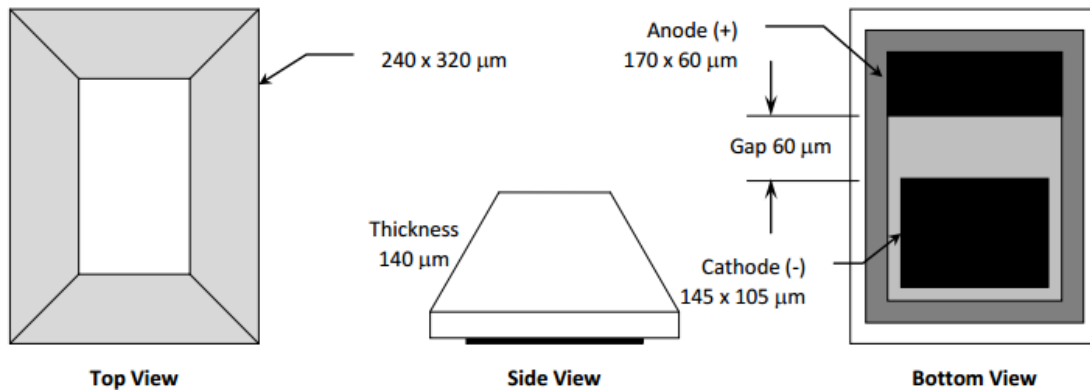


Figura 96. Dimensiones del LED *CREE DA2432*.

Como consecuencia de estas pequeñas dimensiones, antes de comenzar la prueba es necesario analizar de nuevo la hoja de características de la cinta para comprobar las medidas mínimas que ha de tener el diseño del circuito, garantizando así la correcta conexión eléctrica entre el mismo y el LED. Como se puede comprobar en la *Figura97* existen tres parámetros. El primero de ellos hace referencia a la mínima distancia entre dos pads consecutivos. El segundo hace referencia a la mínima distancia entre centros de pads. Por último, el tercer parámetro se trata del área mínima de pad necesario para garantizar la conexión eléctrica.

#### Design Requirements

Property	Value	Units
Minimum Space Between Conductors	50 (2)	micron (mil)
Minimum Pitch	100 (4)	micron (mil)
Minimum Pad Area	0.05 (80)	sq. mm (sq. mil)

Figura 97. Especificaciones mínimas de diseño para el uso de la cinta anisotrópica *3M*.

En la siguiente tabla se lleva a cabo una comparación entre estos tres parámetros requeridos para el uso de la cinta y los parámetros de los LEDs con lo que se trabaja.

Parámetro	Cinta	LED	¿Cumple?
Distancia entre pads	50µm	60µm	Si
Distancia entre centros de pads	100µm	145µm	Si
Área de pad	0.05mm <sup>2</sup>	0.01 mm <sup>2</sup>	No

Tabla 30. Comparación entre medidas requeridas por la cinta 3M y las del LED DA2432.

Como se puede ver en la tabla, el área mínima de pad con la que el fabricante garantiza la correcta conexión eléctrica es de 0.05mm<sup>2</sup> y las áreas del ánodo y el cátodo del LED son de 0.010 y 0.015mm<sup>2</sup>, respectivamente. A pesar de no cumplir el área mínima requerida, se han llevado a cabo varias pruebas utilizando la misma configuración con la que se ha logrado fijar el integrado de *Texas Instruments*, es decir, con la mesa calefactora no regulable y las pinzas en la fase de adherir la cinta al sustrato, y utilizando el taladro de columna y la mesa calefactora regulable para la segunda fase.

Tras el proceso, el componente queda fijado físicamente al sustrato de forma correcta como se muestra en la *Figura98* pero a la hora de alimentar el LED se comprueba que la conexión eléctrica no es correcta en ninguna de las cinco pruebas llevadas a cabo, ya que ninguno de ellos ilumina.

Tras analizar la zona de unión de las cinco pruebas en el microscopio, se observa algo común. La tinta de la zona donde se ha adherido la cinta anisotrópica se ha deteriorado mucho, dando lugar a un gran número de poros. En algunas zonas como la superior izquierda, incluso la cinta ha levantado la tinta impresa.

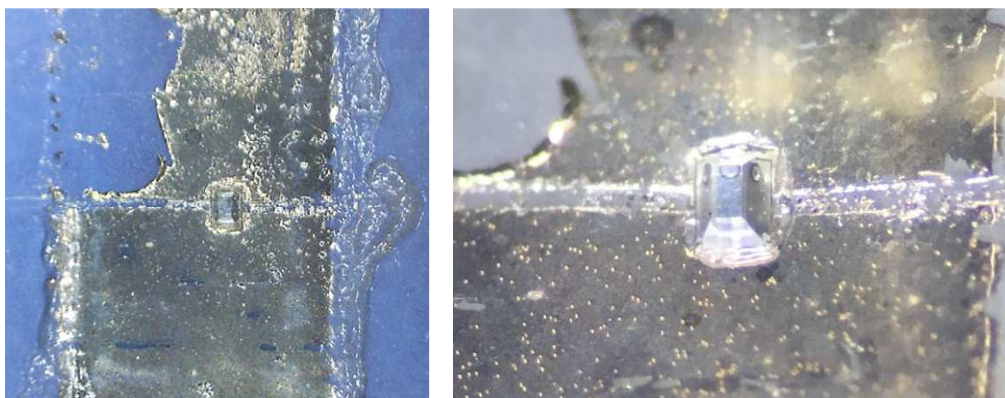


Figura 98. Imágenes tomadas con el microscopio tras finalizar el proceso con el LED CREE DA2432.

Hay que tener en cuenta que este circuito no se ha impreso con serigrafía plana como los anteriores, sino que se ha utilizado *inkjet*. Se trata de una metodología más precisa pero con una consecuencia negativa para el objetivo de este TFM ya que el espesor de la pista impresa es muy bajo, 6µm.

Con los resultados obtenidos de esta prueba no se puede concluir el motivo de la conexión fallida entre el LED y el circuito impreso. Puede deberse a que el tamaño de los pads del LED no cumple los requerimientos mínimos de la cinta, o al problema mencionado anteriormente de la tinta.

#### 17.4. Uso del adhesivo fluido para fijar un LED de tamaño 1206

El uso de la cinta anisotrópica no reporta resultados correctos a la hora de conectar los LEDs de tamaño 240x320µm. Como se ha comentado al final del mismo, se han evaluado dos posibles problemas. El primero puede ser como consecuencia de que la cinta requiere un área de pad mínima superior al pad del LED. La segunda está relacionada con cierta incompatibilidad entre la tinta impresa con *inkjet* y la cinta. Ambos posibles problemas están directamente relacionados con la cinta anisotrópica por lo que parece interesante hacer alguna prueba utilizando el otro adhesivo anisotrópico que hay en Fundación PRODINTEC.

Se trata de un adhesivo fluido de baja viscosidad del fabricante *DELO*, más concretamente el adhesivo *DELO-MONOPOX AC365*. Consultando su hoja de características se han podido analizar las variables del proceso requeridas para su uso. En primer lugar se observa que la fuerza necesaria sobre el componente es de en torno a 24kg/cm<sup>2</sup>, dentro del rango de la fuerza requerida por la cinta que es de 20-30kg/cm<sup>2</sup> según el fabricante. Respecto a la temperatura y el tiempo del proceso, el fabricante da unos valores de 150°C durante unos 5 segundos.

Conocidas las variables de proceso, se lleva a cabo una primera prueba con un LED de tamaño 1206 utilizando la misma configuración que la empleada en la segunda fase de la cinta anisotrópica. En primer lugar se dispensa adhesivo sobre la zona de unión. Posteriormente se coloca el componente sobre los pads impresos y se ejerce una fuerza media utilizando el taladro de columna durante unos 5 segundos. Bajo el taladro se sitúa la mesa calefactora regulable con una temperatura de referencia de 150°C. A continuación se presentan un par de imágenes, la primera tomada durante el proceso y la segunda tras finalizar el mismo.

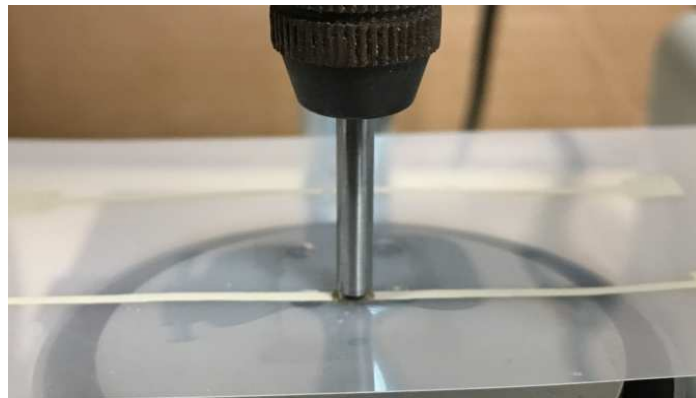


Figura 99. Captura tomada durante el proceso utilizando el adhesivo fluido para fijar un LED 1206.



Figura 100. Resultado obtenido con un LED tamaño 1206 tras el uso del adhesivo fluido.

Aprovechando el microscopio de laboratorio, en la *Figura101* se presentan un par de imágenes que se han tomado para mostrar de forma ampliada el resultado.

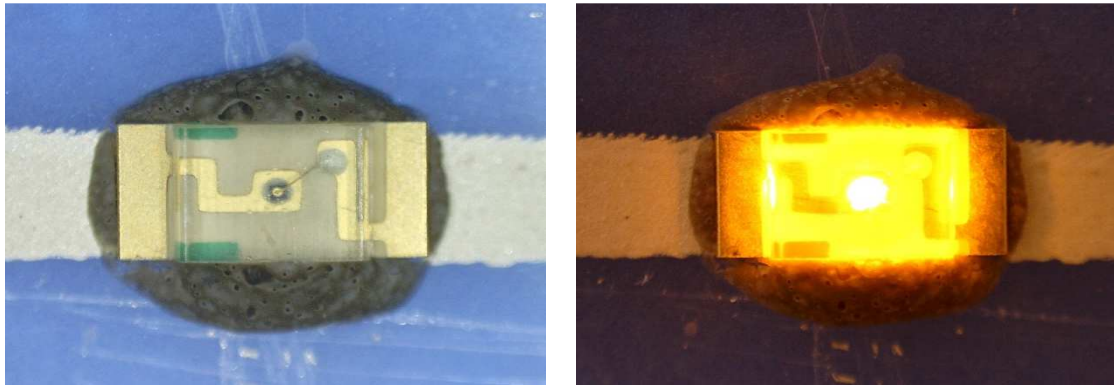


Figura 101. Imágenes tomadas con el microscopio tras fijar un LED 1206 con el adhesivo fluido.

Como se ha mostrado en las imágenes anteriores, el LED ilumina por lo que se puede comprobar que la conexión eléctrica está correcta. No obstante, tras varias pruebas, algunos de los LEDs no iluminan. Analizando paso a paso el proceso se observa un problema común que en ocasiones condiciona la conexión fallida entre el LED y el circuito. Se trata de que cuando se coloca el sustrato sobre la mesa calefactora, el adhesivo comienza a curar antes de ejercer la presión con el taladro. Como consecuencia, en el momento que se aplica la presión, el adhesivo ya ha curado parcial o totalmente y ya no se lleva a cabo la unión de las partículas esféricas conductoras que se encuentran inmersas en el adhesivo.

Debido a las condiciones de funcionamiento y el control propio de la mesa calefactora, no es posible encender la mesa una vez se ejerce la presión sobre el componente, ya que tarda mucho en llegar a la temperatura de referencia y además tiene un comportamiento muy sobre oscilado. Por el momento la solución propuesta es procurar ejercer la fuerza lo más rápido posible tras colocar el sustrato en la mesa, intentando que el adhesivo comience a curar una vez la fuerza está aplicada y no antes.

### 17.5. Uso del adhesivo fluido para fijar un LED de tamaño 240x320µm

Analizando la hoja de características del adhesivo de *DELO* se observa un detalle importante y es que el fabricante no ofrece unas especificaciones mínimas de diseño de circuito como el fabricante de la cinta anisotrópica, con la distancia mínima entre pads o el área mínima de los mismos. A pesar de esto, se prevé que pueda soportar condiciones de conexión eléctrica más críticas que la cinta en cuanto a medidas. A esta conclusión se llega utilizando un parámetro común de ambos adhesivos, el tamaño de partícula conductiva. El fabricante *3M* apunta que su cinta utiliza partículas de un tamaño aproximado de 10µm mientras que el adhesivo del fabricante *DELO* las tiene de un tamaño de 2.5µm. Esto parece que puede solucionar el problema ocurrido al utilizar la cinta anisotrópica con los LEDs de tamaño 240x320µm. Se recuerda que los pads del LED tienen un área menor que la mínima exigida por la cinta de *3M*.



Utilizando la misma configuración que la explicada en el apartado anterior, se llevan a cabo varias pruebas para colocar los LEDs de tamaño  $240 \times 320 \mu\text{m}$ . A continuación se presenta una imagen tomada durante el proceso, en la que se pueden ver varios LEDs ya colocados.

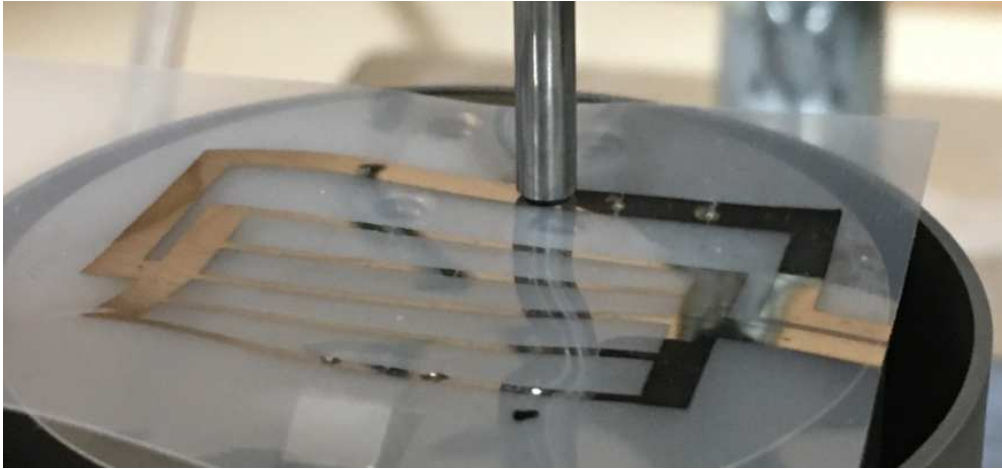


Figura 102. Imagen obtenida utilizando el adhesivo fluido con un LED de tamaño  $240 \times 320 \mu\text{m}$ .

Tras alimentar los LEDs, se comprueba que ninguno de ellos ilumina correctamente. Como consecuencia, se toman varias capturas con el microscopio y se comprueba que los LEDs no se han embebido correctamente en el adhesivo. Se trata del mismo problema explicado al final de apartado anterior, el adhesivo comienza a curar antes de ejercer la fuerza requerida. En este caso el problema no se soluciona como antes, procurando ejercer la fuerza más rápido, probablemente como consecuencia del pequeño tamaño del área de los pads del LED.

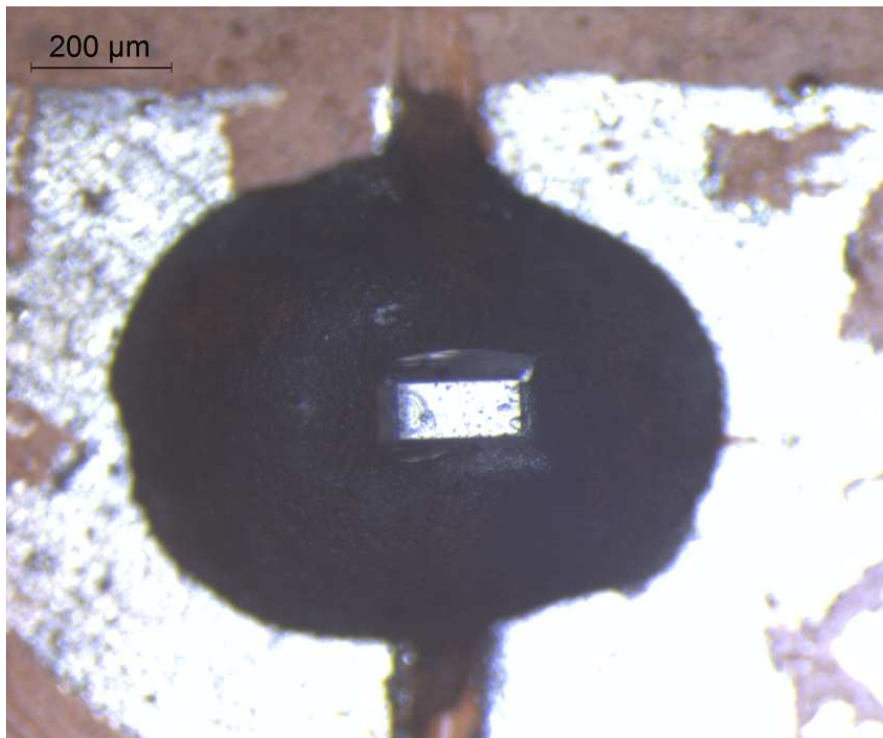


Figura 103. Imágenes capturadas con el microscopio de un LED fijado con adhesivo fluido.

Parece que tratando de componentes tan pequeños, los requerimientos de uso del adhesivo son más estrictos, por lo que toma especial importancia el hecho de comenzar a elevar la temperatura una vez se ha alcanzado la fuerza, y no en el orden contrario. Como se ha explicado antes, el control de la mesa calefactora es muy lenta y sobre oscilada por lo que no es posible encenderla y apagarla cada ciclo. Como consecuencia, es necesario buscar otra solución alternativa. Dicha alternativa será descrita en el siguiente capítulo.

## 17.6. Conclusiones tras las pruebas iniciales

Tras haber llevado a cabo un gran número de pruebas con el objetivo de conocer el funcionamiento y los aspectos más críticos del proceso, se han evaluado los resultados obtenidos y las dificultades encontradas. A continuación se describen las conclusiones obtenidas de estas pruebas para tener en cuenta en el diseño y desarrollo de la primera versión.

En primer lugar, el problema que se ha tenido es que al aplicar la fuerza sobre el componente, éste no se adhiere en el adhesivo de forma perpendicular al sustrato, dando lugar a conexiones erróneas entre el componente y el circuito. Como conclusión a este problema se comprueba que es un aspecto crítico el hecho de aplicar la fuerza de forma totalmente vertical.

Posteriormente se ha encontrado un problema al fijar componentes sobre circuitos impresos con la tecnología *inkjet*. Como ya se ha profundizado anteriormente, el adhesivo arrastra e incluso levanta la tinta como consecuencia del bajo espesor de impresión, 6µm. La solución a esto pasa por utilizar algún tipo de tratamiento sobre el sustrato antes de la impresión del circuito, aumentando la adhesión entre el sustrato y la tinta.

Finalmente, el último problema observado está relacionado con el orden de aplicación de fuerza y temperatura. En un principio se estaba trabajando sobre una mesa calefactora en la que se colocaba el circuito y el componente y posteriormente se aplicaba la fuerza. Esto hace que el adhesivo cure de forma parcial o total antes de llegar a la presión requerida, lo que da lugar a fallos en la conexión eléctrica entre el circuito y el componente. La solución sería cumplir el orden establecido por los fabricantes de adhesivos, los que dicen que se ha de ejercer la fuerza y posteriormente alcanzar la temperatura. Debido a la complejidad que tiene esto por motivos de potencia necesaria para calentar tan rápido la herramienta, se plantea una alternativa y es la aplicación simultánea de fuerza y temperatura.

Estos tres aspectos observados, se tendrán en cuenta para el desarrollo de la primera versión y para el desarrollo del equipo final.

## 18. ANEXO B: DISEÑO Y DESARROLLO DE LA PRIMERA VERSIÓN

Evaluando las conclusiones obtenidas de las pruebas iniciales presentadas en el *AnexoA*, la solución más viable y rápida de desarrollar consiste en hacer una herramienta a medida que se pueda anclar al mandril del taladro e instalar en ella una resistencia calefactora controlable.

### 18.1. Diseño y desarrollo mecánico

Se diseña una herramienta compuesta de dos piezas, una de plástico para aislar térmicamente el taladro y otra metálica que será la encargada de transmitir el calor de la resistencia calefactora al componente. Dichas piezas se diseñan utilizando el software *Solidworks*, y posteriormente se fabrican en el taller de mecanizado de Fundación PRODINTEC.

La primera de ellas es la que permite instalar la herramienta en el mandril del taladro por lo que básicamente es un cilindro de 3mm de diámetro con una base en la zona inferior. En dicha base tiene con dos orificios pasantes para sujetar la segunda pieza utilizando dos tornillos. El material concreto seleccionado para fabricar dicha pieza es *PEEK* ya que se trata de un plástico que tiene buenas propiedades mecánicas y un amplio rango de temperatura de trabajo. Esto se trata de un factor importante ya que su función es aislar el taladro del calor que suministra la resistencia calefactora.

La segunda pieza, posee un orificio pasante de 6mm donde se ha de introducir una resistencia calefactora similar a las que tienen las impresoras 3D. Además se ha realizado un pequeño orificio de 2mm de diámetro para introducir una resistencia NTC con el objetivo de poder hacer un control de temperatura. El extremo inferior de dicha pieza consiste en un cilindro de 3mm de diámetro que será el que entre en contacto con el componente y ejerza la fuerza y temperatura requerida sobre el mismo. Para lograr una buena transmisión de calor desde la resistencia calefactora hasta el extremo inferior de la pieza se fabrica en aluminio.

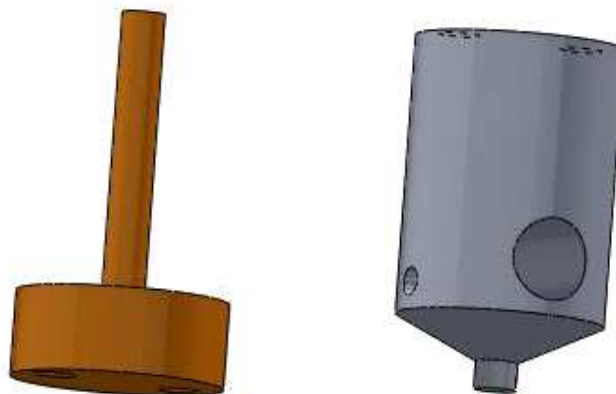


Figura 104. Piezas que conforman la herramienta diseñada.

A continuación se muestra una captura que se ha tomado del diseño realizado en software *Solidworks*, integrado por las dos piezas mencionadas anteriormente.

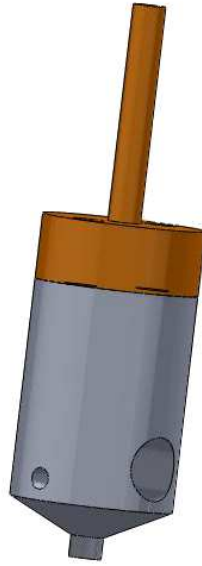


Figura 105. Herramienta diseñada tras ensamblar ambas piezas.

Una vez se han mecanizado ambas piezas en el torno, se ensamblan utilizando dos tornillos. Posteriormente se coloca la resistencia calefactora en el agujero utilizando una galga de 100 micras para que se sujete con cierta presión en el mismo. Finalmente, se coloca la resistencia NTC en el orificio pequeño, fijándola con *Kapton*. A continuación se muestra una foto obtenida tras colocar el conjunto en el mandril del taladro de columna.



Figura 106. Imagen en detalle de la herramienta colocada en el mandril del taladro.

## 18.2. Diseño y desarrollo eléctrico

Como se ha mencionado al inicio de este anexo, la herramienta de esta primera versión se calienta utilizando una resistencia calefactora como se muestra en la *Figura107*. Dicha resistencia es la que se utiliza para calentar los extrusores que tienen las impresoras 3D por lo que hay gran cantidad de fabricantes que la venden y sus especificaciones eléctricas son comunes, con una potencia de 40 vatios y una tensión de alimentación de 12 voltios.



Figura 107. Resistencia calefactora utilizada para calentar la herramienta.

De la potencia y la tensión de alimentación se puede calcular de forma sencilla la corriente que necesita con el fin de seleccionar una fuente para alimentarla.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{40W}{12V} = 3.33A$$

Ecuación 6. Cálculo de la corriente consumida por la resistencia calefactora.

Dado a que se trata de un nivel de corriente admisible, se utiliza para alimentarla una fuente de las que utilizan las CPU de los ordenadores, denominadas técnicamente fuente ATX. A pesar de haber calculado la corriente, se alimenta la resistencia y se hace una medición de la corriente obteniendo 2.58A, inferior a la calculada de forma teórica.



Figura 108. Corriente consumida por la resistencia calefactora.

### 18.3. Sensor de temperatura

No parece razonable trabajar en cadena abierta, es decir, alimentar la resistencia calefactora sin ningún tipo de control ya que la temperatura subiría muy por encima de los requerimientos de los adhesivos que se quieren utilizar. Por este motivo es necesario desarrollar algún tipo de control para poder regular la temperatura de la herramienta.

Tras buscar información sobre sensores de temperatura en varios fabricantes, se ha adquirido un termistor. Estos dispositivos se basan en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. Para este proyecto se ha utilizado un termistor *NTC* de  $100k\Omega$ , con referencia *100k NTC 3950 1%*. Al igual que la resistencia calefactora, se trata de un termistor muy común en equipos de impresión 3D por lo que es fácil de comprar en fabricantes que distribuyen material para impresión 3D.



Figura 109. Termistor *100k NTC 3950 1%* utilizado para el control de temperatura.

Tras buscar en la web algún ejemplo de aplicaciones similares a la que se quiere realizar, se ha localizado un tutorial [7] que explica de forma detallada las ecuaciones de la relación entre la resistencia y la temperatura, y muestra el esquema empleado para las medidas. Dicha relación se trata de una exponencial que corresponde con la *Ecuación 7*, siendo  $R$  la resistencia del sensor a una temperatura  $T$  en grados Kelvin,  $R_0$  la resistencia del sensor a una temperatura de referencia  $T_0$  en Kelvin y  $\beta$  el valor del parámetro *beta*, propio del sensor.

$$R = R_0 \cdot e^{\left\{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}}$$

Ecuación 7. Curva característica del sensor de temperatura utilizado.

Despejando la temperatura  $T$ , se obtiene la ecuación que permite calcular la temperatura a partir de la resistencia  $R$ .

$$T = \frac{\beta}{\ln \cdot \left(\frac{R}{R_0}\right) + \frac{\beta}{T_0}}$$

Ecuación 8. Cálculo de la temperatura a partir de la resistencia del sensor medida.

Para medir la resistencia  $R$  del sensor se utiliza un divisor de tensión como el que se muestra en el esquema de la *Figura110*. En la *Ecuación9* se muestra la ecuación de dicho divisor de tensión.

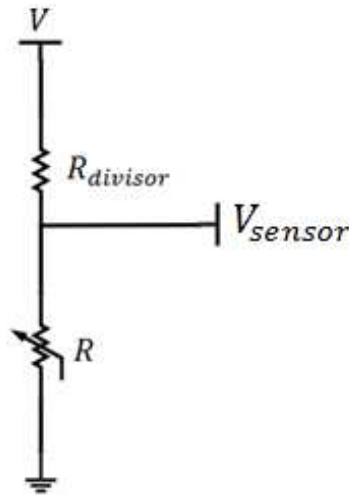


Figura 110. Divisor de tensión utilizado para la lectura de la resistencia del sensor.

$$V_{sensor} = \frac{R}{R + R_{divisor}} \cdot V$$

Ecuación 9. Ecuación del divisor de tensión utilizado para la lectura de la resistencia del sensor.

Despejando en la ecuación anterior el valor de la resistencia del sensor  $R$ , se obtiene:

$$R = \frac{V_{sensor} \cdot R_{divisor}}{V - V_{sensor}}$$

Ecuación 10. Ecuación para calcular la resistencia del sensor a partir de la tensión del mismo.

El último paso es la lectura del valor analógico de la tensión  $V_{sensor}$ . Para el control de esta primera versión del equipo se va a utilizar un Arduino UNO, placa de desarrollo que tiene un conversor AD de 10 bits, lo que da lugar a 1024 valores digitales. En la *Ecuación11* se presenta la fórmula que permite el cálculo de la tensión a partir de la lectura del módulo AD.

$$V_{sensor} = \frac{V}{1024} \cdot lecturaAD$$

Ecuación 11. Cálculo de la tensión de entrada utilizando el módulo AD del Arduino UNO.

Obtenidas todas las ecuaciones, el cálculo de la temperatura es sencillo. Sustituyendo esta tensión  $V_{sensor}$  en la *Ecuación10* se calcula la resistencia del sensor  $R$ , y sustituyendo este valor en la *Ecuación7* se obtiene la temperatura.

## 18.4. Interfaz de entrada y salida

Como ya se ha mencionado anteriormente se ha utilizado un Arduino UNO para el control de este equipo. En el siguiente apartado se justifica su uso, pero en relación con la interface de entrada y salida, Arduino ofrece una gran flexibilidad ya que existen librerías para cualquier componente relativamente común, por lo que su programación es rápida y sencilla.

En este caso, se ha querido hacer una interface sencilla que permita al usuario ver la temperatura de la herramienta y establecer la temperatura de consigna, parámetro del proceso que controla el Arduino.

Como interface de entrada se utilizan dos pulsadores, rojo y azul, para subir y bajar la temperatura respectivamente. De forma adicional se ha querido añadir un tercer pulsador de color verde para decidir cuándo comenzar a calentar en lugar de hacerlo inmediatamente después de fijar la temperatura de referencias.

En cuanto a la interface de salida, se ha utilizado una pantalla LCD de 2 filas y 16 caracteres en cada una de ellas. En dicha pantalla se muestra la temperatura instantánea del extremo de la herramienta en la primera línea y la temperatura de consigna en la segunda. De forma adicional, se ha añadido por seguridad un LED de color rojo para indicar que la resistencia calefactora está alimentada.

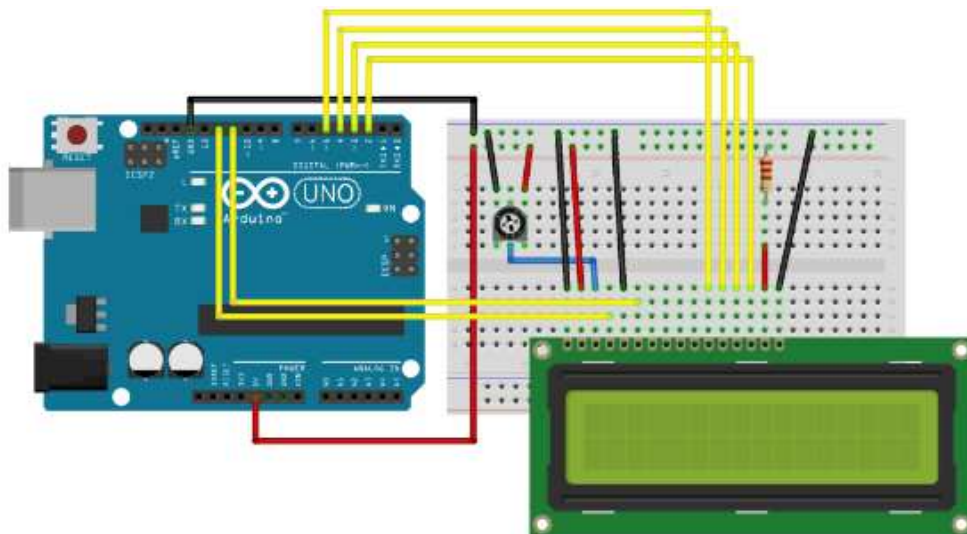


Figura 111. Esquema de conexión de la pantalla LCD 16x2 con el Arduino UNO.

## 18.5. Control del equipo con Arduino UNO

El equipo de control utilizado es un Arduino. Se trata de una placa de desarrollo que para aplicaciones sencillas como un lazo de temperatura, permite la implementación rápida y proporciona gran flexibilidad para modificaciones posteriores del programa. Además integra módulos de conversión analógico-digital, necesarios para la lectura del valor del sensor.



El software programado en el Arduino se trata de un bucle iterativo en el que en primer lugar se leen las entradas, tanto las de interface de usuario como la entrada del sensor. Posteriormente, utilizando el valor analógico leído del sensor, se calcula la temperatura que tiene en ese instante el extremo de la herramienta de acuerdo a las ecuaciones explicadas anteriormente.

En el caso de que el usuario haya activado el control, se activa o desactiva la salida hacia la resistencia calefactora comparando la temperatura de referencia y la temperatura de la herramienta. Para ello, en un principio se había pensado en un control PWM, pero debido a que la temperatura es un parámetro progresivo y sin cambios rápidos no ha sido necesario. La solución finalmente utilizada es un control utilizando histéresis. Con dicho control se actúa sobre un relé que se ha seleccionado de acuerdo a los parámetros eléctricos de la salida del Arduino y de la resistencia calefactora presentados en la *Tabla 31*. Tras buscar algún relé con estas especificaciones se ha adquirido el *FINDER 32.21.7.005.2000*.

<b>Tensión pin Arduino</b>	5V
<b>Corriente máxima pin Arduino</b>	20mA
<b>Tensión resistencia calefactora</b>	12V
<b>Corriente resistencia calefactora</b>	2.87A

Tabla 31. Parámetros eléctricos para la selección del relé.

Finalmente, el bucle iterativo imprime la temperatura del extremo de la herramienta en la línea superior de la pantalla y la temperatura de consigna en la línea inferior.

*El código de control del equipo con Arduino se puede consultar en el AnexoE.*

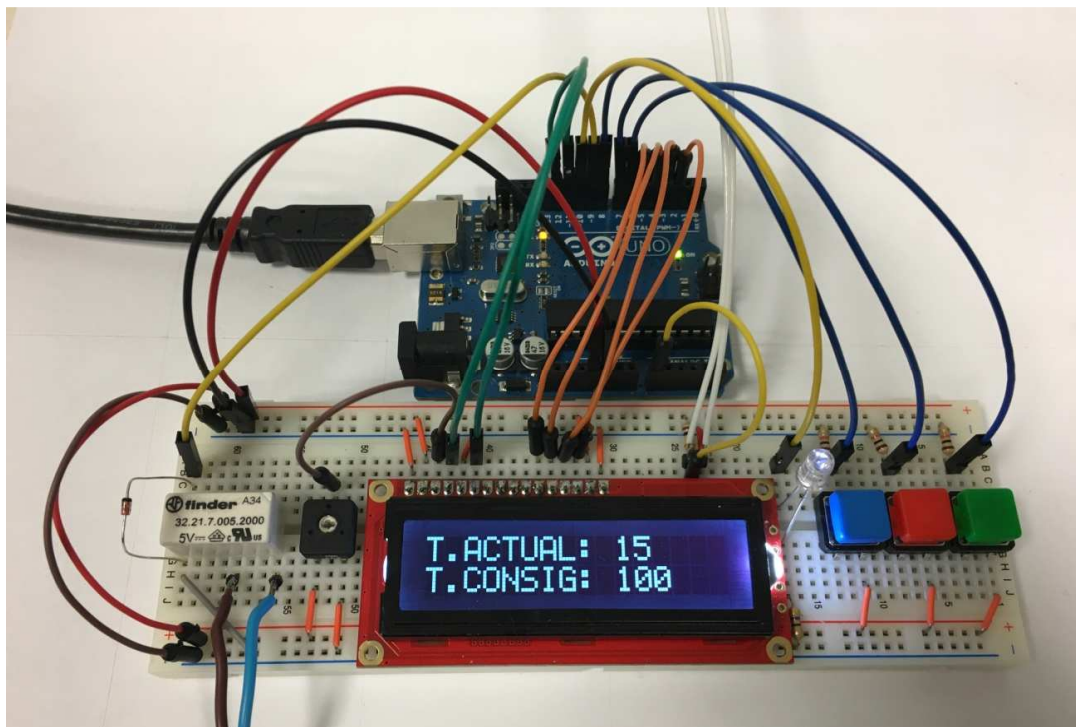


Figura 112. Foto de la placa Arduino UNO junto a la protoboard utilizada para la interfaz.

## 19. ANEXO C: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA PRIMERA VERSIÓN

Desarrollada la primera versión del equipo de acuerdo a lo escrito en el *AnexoB*, el siguiente paso es el empleo del mismo para fijar varios componentes. De esta forma se puede comprobar si el equipo funciona correctamente, lo que permite tener cierta garantía de que el equipo que se desarrollará finalmente funcionará también de forma correcta, ya que ambos utilizan el mismo principio. En el caso de que estas pruebas muestren algún problema o algún punto crítico del proceso que no se ha tenido en cuenta, éste será estudiado para el desarrollo de la versión final.

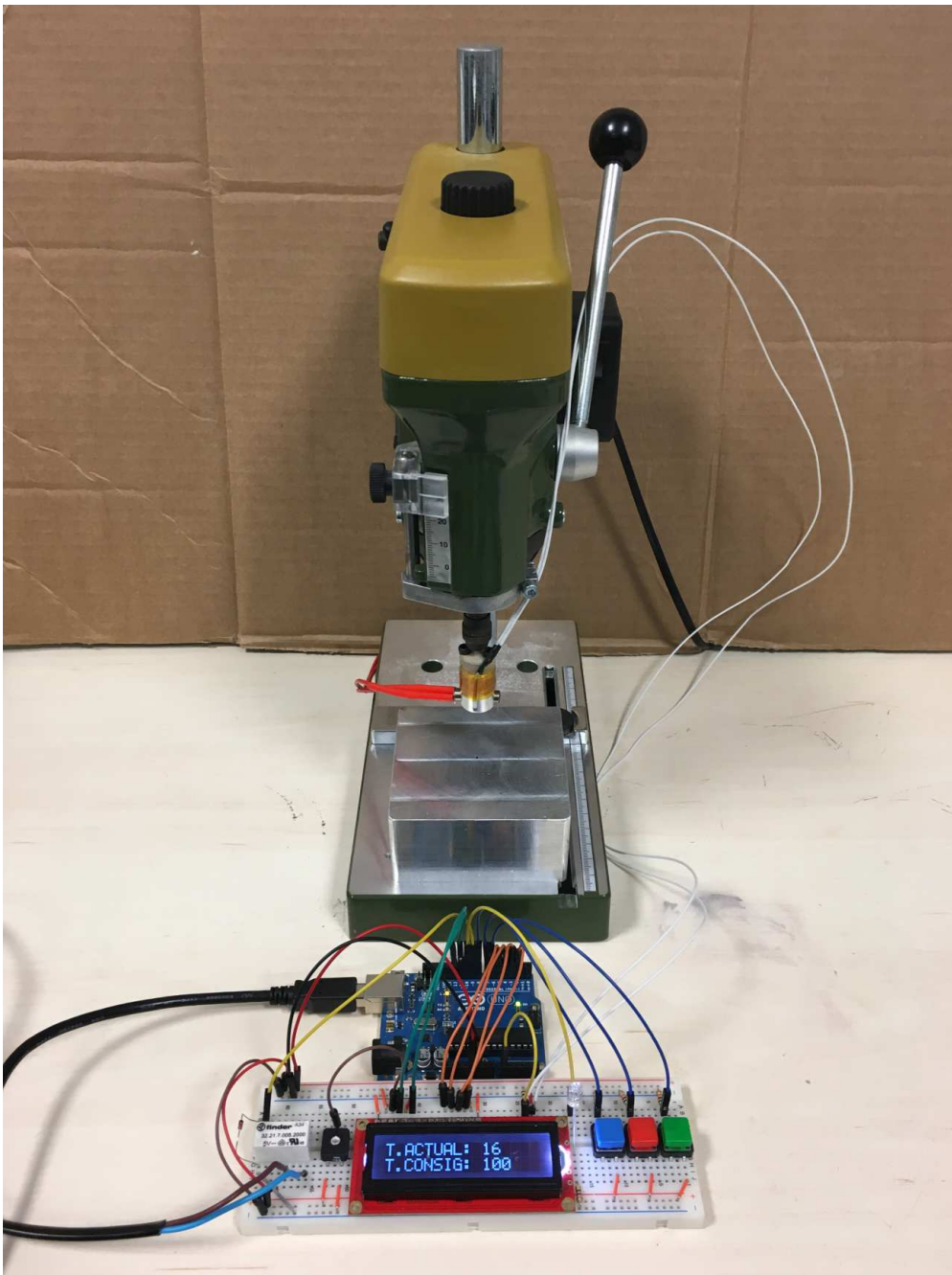


Figura 113. Foto de la primera versión del equipo.

*Desarrollo de un equipo a medida para la conexión de microcomponentes electrónicos sobre sustratos flexibles mediante adhesivos anisotrópicos*

En la figura anterior se muestra una foto del conjunto del equipo, tanto la parte de control formada por el Arduino y la *proto-board* con la interfaz, como la parte mecánica formada por el taladro de columna con la herramienta diseñada. La única parte del equipo que no se muestra en esta foto es la fuente de alimentación, pero es prescindible ya que se trata de una simple fuente ATX.

En primer lugar se hacen varias pruebas con la cinta anisotrópica de 3M para fijar un LED de tamaño 1206, estableciendo 170°C como temperatura de referencia. Tras alimentar las pruebas realizadas se comprueba que todas ellas iluminan correctamente por lo que se puede afirmar que el proceso se ha llevado a cabo de forma correcta. Se trata del resultado esperado ya que se estos LEDs tienen un tamaño relativamente grande y ya han sido fijados correctamente desde un primer momento instalando una broca mecanizada en el mandril del taladro sin necesidad de usar la herramienta diseñada.

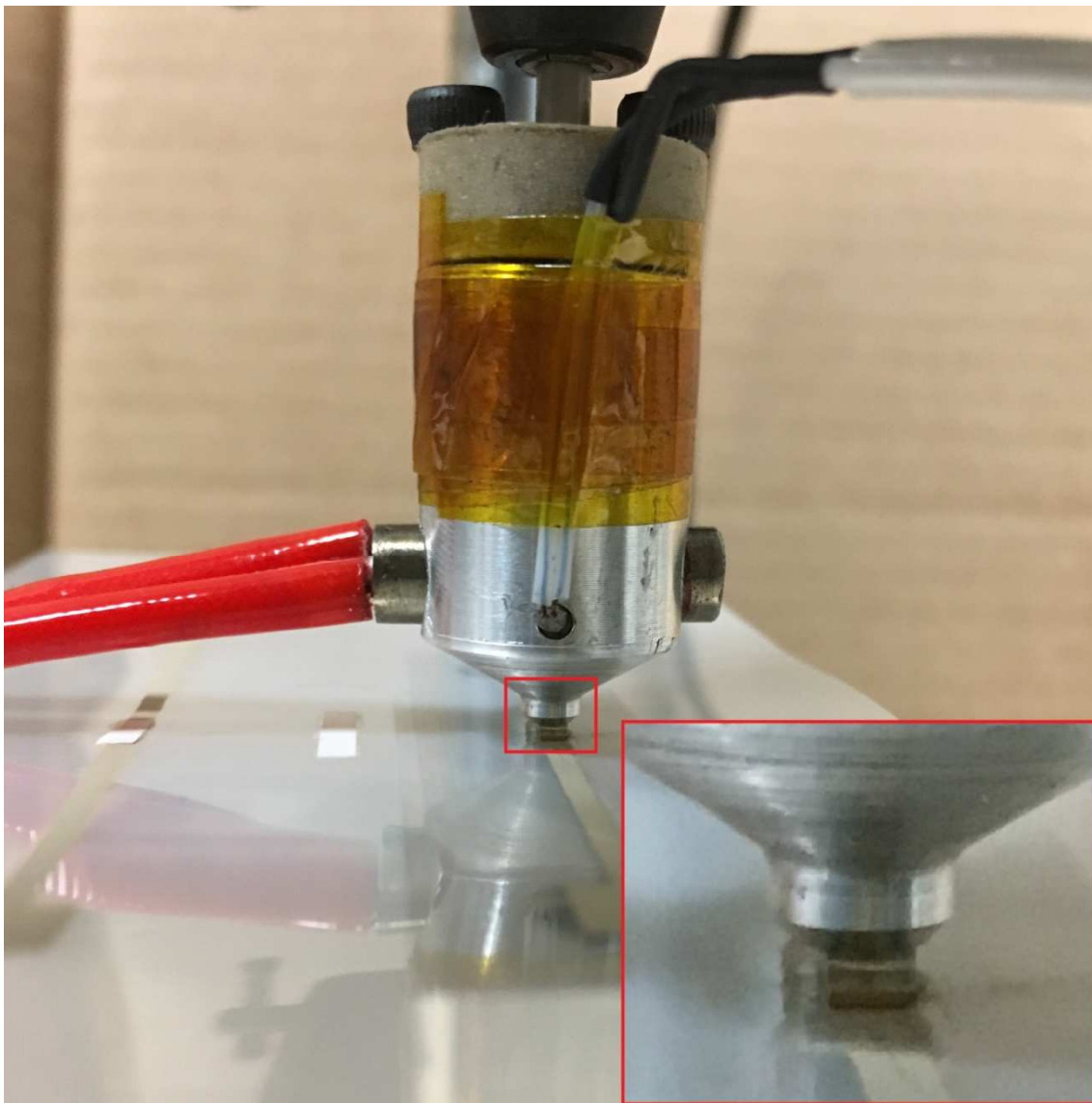


Figura 114. Captura tomada durante el proceso utilizando la cinta 3M para fijar un LED tamaño 1206.

Tras comprobar que con los LEDs de tamaño 1206 y la cinta anisotrópica el equipo funciona correctamente, se prescinde de hacer más pruebas con LEDs de tipo SMD de menor tamaño, pasando directamente a hacer pruebas con los ya mencionados CREE DA2432, recordando que su tamaño es de 240x320µm.

Como se ha explicado en las conclusiones del AnexoA, debido al escaso tamaño de estos componentes, se hace más crítico el proceso de fijación, tomando mayor importancia la necesidad de aplicar la temperatura una vez se ha aplicado la fuerza como indican los fabricantes de adhesivos y no en orden inverso como se había hecho hasta ahora. El uso de esta herramienta no cumple el orden indicado sino que aplica fuerza y temperatura de forma simultánea, lo que supone un control más sencillo y lo que es más importante, se logra un proceso más rápido. En lugar de aplicar la presión y posteriormente alimentar la resistencia calefactora hasta alcanzar la temperatura, lo que supondría unos 30-45 segundos, se mantiene la herramienta a una temperatura constante de consigna y cuando se coloca bajo la misma el sustrato con el componente a fijar, se aplica la fuerza requerida, transfiriendo el calor de la herramienta al conjunto componente-adhesivo en cuanto se ponen en contacto.

Para probar si este método soluciona el problema mencionado a la hora de fijar estos LEDs, se llevan a cabo cinco pruebas estableciendo 150°C como temperatura de referencia. En la Figura115 se muestra una foto tomada durante el proceso.

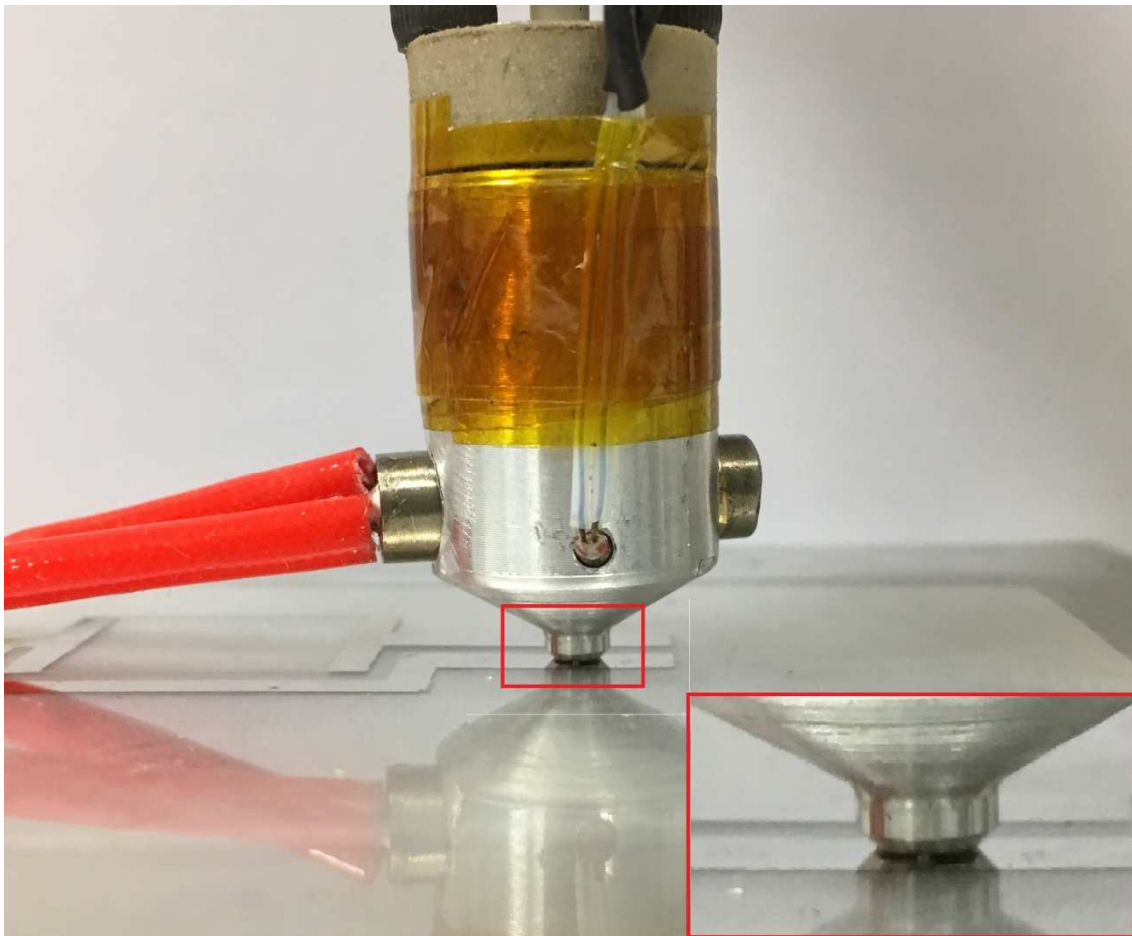


Figura 115. Captura tomada durante el proceso utilizando el adhesivo para fijar un LED 240x320µm.

Debido al pequeño tamaño de los LEDs, la fuerza aplicada debe ser muy concreta ya que si no es así se puede sobrepasar la que el componente es capaz de soportar dando lugar al deterioro o incluso a la rotura del mismo. Tras cinco pruebas, dos de ellas se han roto como consecuencia de un exceso de fuerza. Se recuerda que esta primera versión del equipo se basa en un taladro de columna por lo que la fuerza a aplicar no está controlada y se hace de forma manual, lo que da lugar a una baja repetibilidad.

Se alimentan las tres muestras que no se han roto durante el proceso de fijado comprobando que todas ellas iluminan correctamente por lo que se confirma que la conexión eléctrica de los mismos es correcta. En la *Figura 116* se muestran un par de fotos tomadas de una de las muestras funcionales.

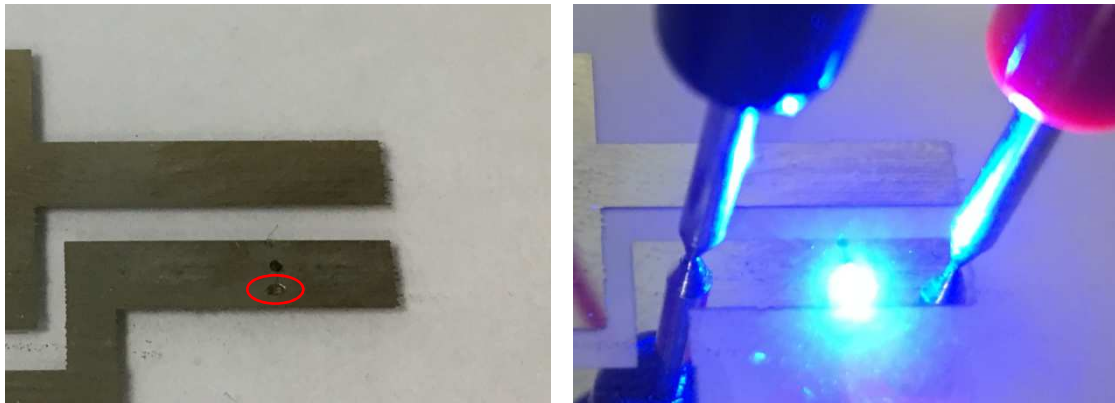


Figura 116. Resultado funcional obtenido tras fijar un LED de tamaño  $240 \times 320 \mu\text{m}$ .

## 19.1. Conclusiones

Tras las pruebas llevadas a cabo mostradas en este capítulo, se puede confirmar que la primera versión del equipo funciona muy bien con componentes de tamaño estándar, tanto utilizando la cinta como el adhesivo anisotrópico.

De las pruebas llevadas a cabo con los LEDs de tamaño  $240 \times 320 \mu\text{m}$ , se ha comprobado que se tratan de componentes de dimensión muy reducida por lo que los aspectos delicados del proceso se vuelven aún más críticos. Especialmente el control de la fuerza toma especial importancia ya que dos de los cinco LEDs fijados se han roto como consecuencia de un exceso de fuerza. De todas formas, el resultado interesante tras estas pruebas es el correcto funcionamiento de los tres restantes ya que se trata de un porcentaje de éxito del 100% teniendo en cuenta solo las pruebas que no se han roto durante el proceso.

Respecto a las dos pruebas que se han roto, no es un aspecto a tener en cuenta ya que en esta versión la fuerza se hace de forma manual pero en la versión final se utilizará un elemento neumático, por lo que la fuerza será controlada.

## 20. ANEXO D: CALIBRACIÓN DE LOS TERMOPARES

Como se puede ver en la imagen en la que se presentan los *thermodes* adquiridos, éstos integran un sensor de temperatura. Se trata de un termopar fijado al extremo de cada *thermode* con el fin de poder medir la temperatura en el punto de la pieza que se encuentra en contacto con el componente a fijar durante el proceso.

Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña en función de la temperatura. El fabricante de los *thermodes* no envía información acerca de los termopares instalados en sus piezas y debido a que existe una amplia variedad, parece que la mejor solución para su calibración es hacer un ensayo experimental. Para ello, se fija el *thermode* sobre la superficie de la mesa calefactora regulable utilizada en las pruebas iniciales presentadas en el *Capítulo 3*. Con el fin de medir la temperatura en el punto exacto donde se encuentra el termopar, se adhiere utilizando *Kapton* el sensor de temperatura que utiliza el multímetro de precisión empleado, un *FLUKE 289*. En la *Figura 117* se muestra una imagen tomada de la instalación del *thermode* sobre la mesa y la adhesión del sensor de temperatura del multímetro.

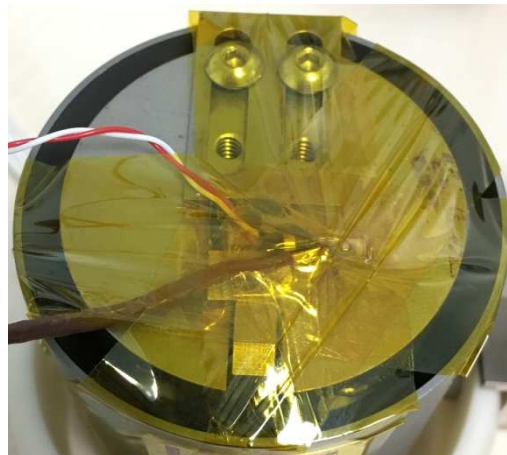


Figura 117. Fijación del *thermode* a la mesa calefactora regulable utilizando *Kapton*.

El rango de temperaturas que se utiliza para los adhesivos anisotrópicos conocidos va desde los 100°C hasta los 150°C. No obstante el termopar se va a calibrar en un rango de temperatura más amplio con el objetivo de comprobar su linealidad y por si en un futuro se adquieren adhesivos que varíen ligeramente su temperatura de curado. Debido a esto, el rango de temperatura inicial del ensayo se establece en 200°C y el final en 50°C, dando 50°C de margen tanto por arriba como por abajo del rango que se prevé se va a utilizar. En todo este rango, se va reduciendo la temperatura de la mesa calefactora regulable en 10°C tomando nota de la temperatura medida por el multímetro y la tensión en mili voltios proporcionada por el termopar a calibrar. En la *Figura 118* se muestra una imagen tomada durante el proceso.



Figura 118. Imagen tomada durante el proceso de calibración.

Tras el recorrido de todo el rango de calibración se disponen de 16 puntos de calibración de los que se conoce la temperatura de la mesa calefactora regulable, la temperatura del extremo del *thermode* medida con el multímetro de precisión, y la tensión en milivoltios proporcionada por el termopar. Estos datos se presentan en la *Tabla32*.

T [°C] WB	V [mV]	T [°C] Fluke
200,0	12,5	181,1
190,0	11,9	173,3
180,0	11,1	165,2
170,0	10,5	158,4
160,0	9,6	148,6
150,0	8,8	138,1
140,0	8,1	129,2
130,0	7,3	119,5
120,0	6,7	112,6
110,0	6,0	103,5
100,0	5,3	94,9
90,0	4,7	87,3
80,0	3,9	76,6
70,0	3,3	67,9
60,0	2,7	58,7
50,0	2,0	49,7

Tabla 32. Valores medidos para la calibración del termopar.

Como se puede ver la temperatura medida con el sensor del multímetro de precisión y la establecida de referencia en la mesa difieren. Esto se debe a que la transferencia de calor entre la mesa y el *thermode* es lenta, no obstante, esto no tiene gran importancia ya que la temperatura que interesa es la que se mide en el extremo del *thermode*, lugar donde se encuentra el termopar que se desea calibrar.

Tras medir los 16 puntos anteriores, se dibuja la curva que forman dichos puntos. Como se puede ver en la *Figura119* los datos forman una línea prácticamente recta (*línea azul*), por lo que se comprueba que la función del termopar se puede considerar lineal dentro del rango de trabajo establecido. Como consecuencia se calcula una línea de tendencia de tipo lineal (*línea roja*), obteniendo la función que permite calcular la temperatura del termopar a partir de la tensión medida entre los terminales de dicho termopar.

$$y = 12.454 \cdot x + 27.492$$

Ecuación 12. Función que permite calcular la temperatura a partir de la tensión del termopar.

Tras el cálculo de la función del termopar, se recorre un par de veces el rango de temperatura desde los 50°C hasta los 200°C, midiendo la temperatura con el multímetro de precisión y calculando la temperatura a partir de la tensión entre los terminales del termopar. Se comprueba que la diferencia de temperaturas entre ambas medidas difiere en un máximo de 2°C. Posteriormente, se lleva a cabo la misma prueba con los *thermodes* disponibles en las otras dos dimensiones comprobando el mismo resultado.



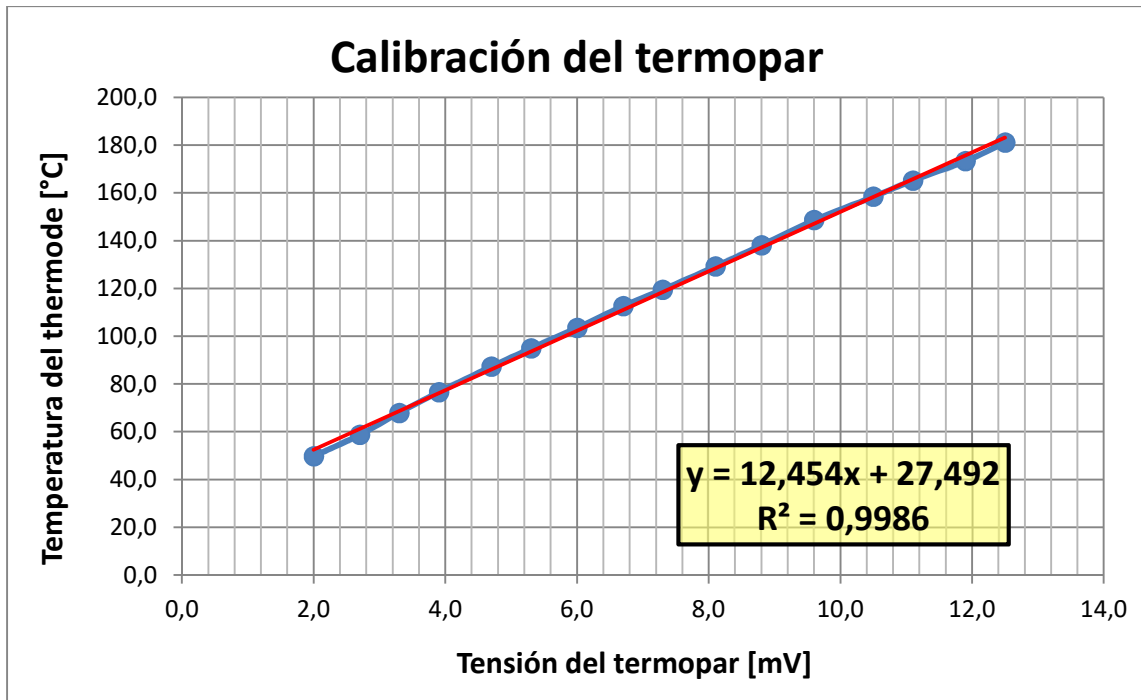


Figura 119. Recta de calibración del termopar integrado en los *thermodes* adquiridos.

## 21. ANEXO E: CÓDIGO DE LA PRIMERA VERSIÓN DEL EQUIPO

```

// Inlcudes necesarios para el programa
#include <LiquidCrystal.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>

// Pines de entradas y salidas
#define
#define sensorPin 0
#define pulOn 6
#define pulMas 7
#define pulMenos 8
#define pinRele 9
#define pinLED 10

// Parámetros para el cálculo de temperatura
#define Vin 5.0 // [V]
#define Raux 100000 // [ohm]
#define R0 100000 // [ohm]
#define T0 293.15 // [K]

// Valores de temp y resistencia de dos puntos de calibración
#define T1 373 // [K]
#define T2 473 // [K]
#define RT1 6749 // [ohms]
#define RT2 639 // [ohms]

// Valores para la histéresis
#define hist_apagar 0 //0 grados por ENCIMA de la de referencia
#define hist_encender -4 //4 grados por DEBAJO de la de referencia

// Variables globales
float Vout = 0.0;
float Rout = 0.0; // [ohm]
float beta = 0.0; // [K]
float Rinf = 0.0; // [ohm]
float TempK = 0.0; // [K]
float TempC = 0.0; // [°C]
int ref = 100; // [°C]
bool activado = false;

// Inicialización de la libreria LCD
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

void setup() {

// Configuración serie
Serial.begin(9600);

// Configuración de pines
pinMode(sensorPin, INPUT);
pinMode(pulOn, INPUT);
pinMode(pulMas, INPUT);
pinMode(pulMenos, INPUT);
pinMode(pinRele, OUTPUT);
pinMode(pinLED, OUTPUT);

// Cálculo del parametro beta de la resistencia NTC utilizando dos puntos
// beta=(log(RT1/RT2))/((1/T1)-(1/T2));
beta=3990; //Segun datasheet
Rinf=R0*exp(-beta/T0);

```

```
// Definición de número de filas y columnas
lcd.begin(16, 2);
}

void loop() {

    // Control de pulsadores para establecer consigna
    if (digitalRead(pulMas)==HIGH){
        ref = ref+5;
    }
    if (digitalRead(pulMenos)==HIGH){
        ref = ref-5;
    }

    // Control de pulsador para establecer consigna
    if ((digitalRead(pulOn)==HIGH)){
        if (activado==true){
            activado=false;
        }
        else{
            activado=true;
        }
    }
}

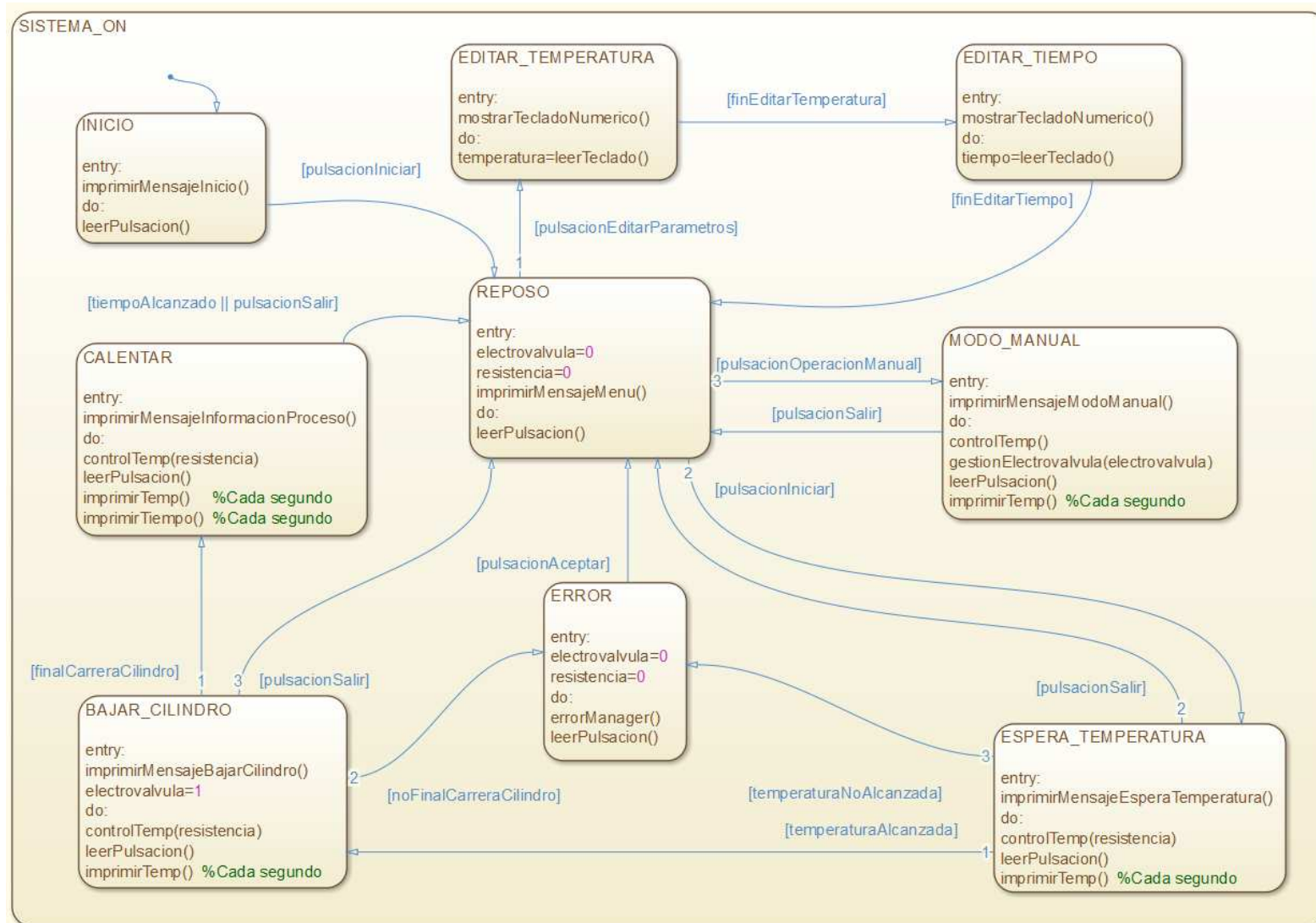
// Cálculo de temperatura de acuerdo a la medida del sensor
Vout=Vin*((float)(analogRead(sensorPin))/1024.0);
Rout=(Raux*Vout/(Vin-Vout));
TempK=(beta/log(Rout/Rinf));
TempC=TempK-273.15;

// Activación de la salida utilizando histéresis
if ((TempC<=(ref+hist_encender))&&(activado==true)){
    digitalWrite(pinRele, HIGH);
    digitalWrite(pinLED, HIGH);
}
if ((TempC>=(ref+hist_apagar))|| (activado==false)){
    digitalWrite(pinRele, LOW);
    digitalWrite(pinLED, LOW);
}

// Impresión de temperatura en el sensor y temperatura de consigna
lcd.clear();
lcd.print("T.ACTUAL:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("T.CONSIG:");
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print(TempC,0);
lcd.setCursor(10, 1);
lcd.print(ref);

// Delay
delay(500);
}
```

## 22. ANEXO F: STATECHART DE LA VERSIÓN FINAL DEL EQUIPO



*Desarrollo de un equipo a medida para la conexión de microcomponentes electrónicos sobre sustratos flexibles mediante adhesivos anisotrópicos*

## 23. ANEXO G: CÓDIGO DE LA VERSIÓN FINAL DEL EQUIPO

```

////////////////////////////////////
//
//          AUTOR: DAVID ARIAS PÉREZ          //
//
//          FECHA: ENERO DE 2017              //
//
// DESCRIPCIÓN: Programa diseñado para el control de un equipo //
// desarrollado para el uso de adhesivos anisotrópicos con el //
// fin de facilitar la conolocación de componente electrónicos //
// de pequeño tamaño. El funcionamiento de dicho equipo se ba- //
// sa en aplicar una temperatura y una fuerza determinada so- //
// bre el componente a aplicar durante un tiempo determinado. //
// Para el control de dicho equipo, se ha empleado una panta- //
// lla táctil del fabricante AdaFruit, en la que se ha progra- //
// mado una interfaz que permite navegar entre los diferentes //
// modos de funcionamiento y supervisar el proceso.          //
//
////////////////////////////////////

// Incluye´s necesarios para el control de la pantalla táctil
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <SPI.h>
#include "Adafruit_HX8357.h"
#include "TouchScreen.h"

// Pines para el control del touch de la pantalla
#define YP A2 // Debe de ser un pin analógico
#define XM A3 // Debe de ser un pin analógico
#define YM 7 // Puede ser un pin digital
#define XP 8 // Puede ser un pin digital

// Pines de la pantalla táctil
#define TFT_RST -1
#define TFT_DC 9
#define TFT_CS 10

// Parámetros para la lectura y el cálculo de la temperatura
#define SENSOR A0
#define VIN 5
#define RAUX 1000
#define R0 100000
#define T0 293.15
#define T1 373
#define T2 473
#define RT1 6749
#define RT2 639

// Calibración resistiva de los márgenes de la pantalla táctil
#define TS_MINX 120 // 110
#define TS_MINY 70 // 80
#define TS_MAXX 905 // 900
#define TS_MAXY 933 // 940

// Calibracion de los márgenes de presión de la pantalla táctil
#define MINPRESSURE 10
#define MAXPRESSURE 1000

// Parámetros necesarios para dibujar el teclado numérico en pantalla
#define BOXSIZE 80
#define POSX_NUMBER 28

```

```

#define POSY_NUMBER 23

// Pines de salidas del sistema
#define RESIS      3
#define VALVE      4

// Pines de entradas al sistema
#define SWITCH     2
#define PEDAL      5

// Margenes de temperatura y tiempo
#define TEMPMAX    170
#define TEMPMIN    100
#define TIMEMAX    30
#define TIMEMIN    5

// Define para la histéresis
#define HIST_OFF   0
#define HIST_ON    -4

// Define para la obtención de una señal de 1Hz
#define RATE       9

// Define que almacena el numero de muestras que se quieren obtener
// cada vez que se calcula la temperatura
#define MUESTRASMEDIA 20

// Define que almacena la temperatura maxima de funcionamiento a
// partir de la cual el sistema entra en error
#define SAFETYTEMPERATURE 180

//////////////////////////////////// GLOBAL VARIABLES //////////////////////////////////////

Adafruit_HX8357 tft = Adafruit_HX8357(TFT_CS, TFT_DC, TFT_RST);
TouchScreen ts = TouchScreen(XP, YP, XM, YM, 300);

char numberKeyboard[13] = {'1','2','3',
                           '4','5','6',
                           '7','8','9',
                           'C','0','>'};

enum errores {sinError, neumatico, resistencia};
errores error = sinError;
enum estados {inicio, reposo, edicionParametros, esperaTemperatura,
              bajarCilindro, calentamiento, modoManual, errorEquipo};
estados estadoIterActual = inicio, estadoIterAnterior = reposo;

// Variables para almacenar temperatura y tiempo actual y de ref
int refTemp = 120;
int refTime = 10;
int actualTemp = 0;
int actualTime = 0;
int initialTemp = 0;

// Variables para el cálculo de la temperatura
float Vout = 0.0;
float Rout = 0.0;
float beta = 0.0;
float Rinf = 0.0;
float TempK = 0.0;
float TempC = 0.0;

// Variables para la obtención de una señal de 1Hz
int iRATE = 0;

```

```

int CLK1SEG = 0;

////////////////////////////////////// FUNCIONES ////////////////////////////////////////

void showInitialMessage()
{
    tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
    tft.setTextColor(HX8357_BLUE);
    tft.setTextSize(7);
    tft.setCursor(73, 68);
    tft.println("THERMODE");
    tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
    tft.setTextSize(3);
    tft.setCursor(75, 223);
    tft.println("PULSE PARA INICIAR");
    tft.drawRect(47, 200, 380, 70, HX8357_WHITE);
}

int initialTouch()
{
    TSPoint p = ts.getPoint();
    int aux = map(p.x, TS_MAXX, TS_MINX, 0, tft.height());
    p.x = map(p.y, TS_MINY, TS_MAXY, 0, tft.width());
    p.y = aux;
    if (p.x>47 & p.x<427 & p.y>200 & p.y<270)
    {
        return(1);
    }
    return(0);
}

void showMainMenu()
{
    tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
    tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
    tft.setTextSize(3);
    tft.setCursor(48, 33);
    tft.println("PARAMETROS DE PROCESO");
    tft.setCursor(98, 78);
    tft.println("Temperatura:");
    tft.setCursor(328, 78);
    tft.println(refTemp);
    tft.setCursor(98, 123);
    tft.println("Tiempo(seg):");
    tft.setCursor(328, 123);
    tft.println(refTime);
    tft.drawRect(47, 170, 180, 60, HX8357_WHITE);
    tft.setCursor(85, 190);
    tft.println("EDITAR");
    tft.drawRect(247, 170, 180, 60, HX8357_WHITE);
    tft.setCursor(275, 190);
    tft.println("INICIAR");
    tft.drawRect(47, 240, 380, 60, HX8357_WHITE);
    tft.setCursor(98, 260);
    tft.println("OPERACION MANUAL");
}

int mainMenuTouch()
{
    TSPoint p = ts.getPoint();

```

```

int aux = map(p.x, TS_MAXX, TS_MINX, 0, tft.height());
p.x = map(p.y, TS_MINY, TS_MAXY, 0, tft.width());
p.y = aux;

if (p.x>47 & p.x<227 & p.y>180 & p.y<240)
{
    return(1);
}
if (p.x>247 & p.x<427 & p.y>180 & p.y<240)
{
    return(2);
}
if (p.x>47 & p.x<240 & p.y>240 & p.y<300)
{
    return(3);
}
return(0);
}

void showNumberKeyboard()
{
    tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
    tft.setTextSize(5);
    int number=0;
    for (int j=0; j<4; j++)
    {
        for (int i=0; i<3; i++)
        {
            // Borde del boton
            tft.drawRect(BOXSIZE*i, BOXSIZE*j, BOXSIZE, BOXSIZE, HX8357_WHITE);
            // Texto del boton
            tft.setCursor(BOXSIZE*i+POSX_NUMBER, BOXSIZE*j+POSY_NUMBER);
            tft.println(numberKeyboard[number]);
            number++;
        }
    }
}

char readNumberKeyboard(TSPoint p)
{
    int aux = map(p.x, TS_MAXX, TS_MINX, 0, tft.height());
    p.x = map(p.y, TS_MINY, TS_MAXY, 0, tft.width());
    p.y = aux;
    if (p.x<240)
    {
        int x = p.x/BOXSIZE;
        int y = p.y/BOXSIZE;
        return(numberKeyboard[y*3+x]);
    }
    else
    return('E');
}

int readKeyboard(int pulNum)
{
    int i=0;
    char number_char;
    int number_int=0;
    tft.drawRect(310, 220, 105, 55, HX8357_WHITE);
    while(number_char!='>' && i<pulNum)
    {
        TSPoint p = ts.getPoint();
        number_char = readNumberKeyboard(p);
        switch (number_char)

```



```

{
  case 'E':
  {
    break;
  }
  case 'C':
  {
    number_int = number_int/10;
    i--;
    if (i<0)
    {
      i = 0;
    }
    tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
    tft.setTextSize(5);
    tft.fillRect(320, 230, 85, 35, HX8357_BLACK);
    tft.setCursor(320,230);
    tft.println(number_int);
    break;
  }
  case '>':
  {
    break;
  }
  default:
  {
    number_int = number_int*10+((int)number_char-48);
    i++;
    tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
    tft.setTextSize(5);
    tft.fillRect(320, 230, 85, 35, HX8357_BLACK);
    tft.setCursor(320,230);
    tft.println(number_int);
    break;
  }
}
}
delay(150);
}
return(number_int);
}

void editTemp()
{
  tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
  showNumberKeyboard();
  tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
  tft.setTextSize(3);
  tft.setCursor(270,30);
  tft.println("INTRODUCIR");
  tft.setCursor(260,70);
  tft.println("TEMPERATURA");
  tft.setCursor(300,125);
  tft.println("MIN:");
  tft.setCursor(380,125);
  tft.println(TEMPMIN);
  tft.setCursor(300,160);
  tft.println("MAX:");
  tft.setCursor(380,160);
  tft.println(TEMPMAX);
  refTemp = readKeyboard(3);
  if (refTemp>TEMPMAX)
  {
    refTemp = TEMPMAX;
  }
  if (refTemp<TEMPMIN)
  {

```

```
    refTemp = TEMPMIN;
  }
}

void editTime()
{
  tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
  showNumberKeyboard();
  tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
  tft.setTextSize(3);
  tft.setCursor(270, 30);
  tft.println("INTRODUCIR");
  tft.setCursor(300, 70);
  tft.println("TIEMPO");
  tft.setCursor(300, 125);
  tft.println("MIN:");
  tft.setCursor(380, 125);
  tft.println(TIMEMIN);
  tft.setCursor(300, 160);
  tft.println("MAX:");
  tft.setCursor(380, 160);
  tft.println(TIMEMAX);
  refTime = readKeyboard(2);
  if (refTime>TIMEMAX)
  {
    refTime = TIMEMAX;
  }
  if (refTime<TIMEMIN)
  {
    refTime = TIMEMIN;
  }
}

void showWaitingMessage()
{
  tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
  tft.setTextColor(HX8357_RED);
  tft.setTextSize(3);
  tft.setCursor(58, 43);
  tft.println("INICIANDO PROCESO...");
  tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
  tft.setCursor(58, 208);
  tft.println("Temp.Referencia:");
  tft.setCursor(358, 208);
  tft.println(refTemp);
  tft.setCursor(58, 263);
  tft.println("Temp.Thermode:");
  tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
  tft.setTextSize(3);
  tft.setCursor(43, 123);
  tft.println("ALCANZANDO TEMPERATURA");
}

void showPneumaticMessage()
{
  tft.fillRect(38, 118, 420, 35, HX8357_BLACK);
  tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
  tft.setTextSize(3);
  tft.setCursor(98, 123);
  tft.println("BAJANDO CILINDRO");
}

int calTemp()
```

```

{
    long media = 0;
    // Lectura de X medidas del AD
    for (int i=0; i<MUESTRASMEDIA; i++)
    {
        media = media + analogRead(SENSOR);
    }
    media = media/MUESTRASMEDIA;
    // Cálculo de temperatura de acuerdo a la medida del sensor
    Vout = VIN*((float)(media)/1024.0);
    Rout = (RAUX*Vout/(VIN-Vout));
    actualTemp = (beta/log(Rout/Rinf))-273.15;
    return(actualTemp);
}

void showActualTemp()
{
    tft.fillRect(353, 258, 70, 30, HX8357_BLACK);
    tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
    tft.setTextSize(3);
    tft.setCursor(358, 263);
    actualTemp=calTemp();
    tft.println(actualTemp);
}

void tempControl()
{
    if (actualTemp<=(refTemp+HIST_ON))
    {
        digitalWrite(RESES, HIGH);
    }
    if (actualTemp>=(refTemp+HIST_OFF))
    {
        digitalWrite(RESES, LOW);
    }
}

void showProcessInformation()
{
    tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
    tft.setTextColor(HX8357_RED);
    tft.setTextSize(5);
    tft.setCursor(88, 43);
    tft.println("EN PROCESO");
    tft.setTextSize(3);
    tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
    tft.setCursor(58, 208);
    tft.println("Temp.Referencia:");
    tft.setCursor(358, 208);
    tft.println(refTemp);
    tft.setCursor(58, 263);
    tft.println("Temp.Thermode:");
    tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
    tft.setTextSize(4);
    tft.setCursor(53, 263);
    tft.println("SEG.RESTANTES:");
}

void showProcessData()
{
    tft.fillRect(393, 128, 75, 40, HX8357_BLACK);
    tft.setCursor(398, 133);
    tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
}

```

```
tft.setTextSize(4);
tft.println(refTime-actualTime);
showActualTemp();
}

void showManualOperation()
{
  tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
  tft.setTextColor(HX8357_RED);
  tft.setTextSize(5);
  tft.setCursor(78, 43);
  tft.println("MODO MANUAL");
  tft.setTextSize(3);
  tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
  tft.setCursor(58, 208);
  tft.println("Temp.Referencia:");
  tft.setCursor(358, 208);
  tft.println(refTemp);
  tft.setCursor(58, 263);
  tft.println("Temp.Thermode:");
  tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
  tft.setTextSize(3);
  tft.setCursor(98, 113);
  tft.println("PISAR PEDAL PARA");
  tft.setCursor(88, 143);
  tft.println("ACCIONAR CILINDRO");
}

void manualMode()
{
  if (digitalRead(PEDAL)==1)
  {
    digitalWrite (VALVE, HIGH);
  }
  else
  {
    digitalWrite (VALVE, LOW);
  }
}

void showExitButton()
{
  tft.fillRect(440, 0, 40, 40, HX8357_RED);
  tft.setCursor(450, 3);
  tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
  tft.setTextSize(4);
  tft.println("x");
}

int exitTouch()
{
  TSPoint p = ts.getPoint();
  int aux = map(p.x, TS_MAXX, TS_MINX, 0, tft.height());
  p.x = map(p.y, TS_MINY, TS_MAXY, 0, tft.width());
  p.y = aux;
  if (p.x>440 & p.x<480 & p.y>0 & p.y<40)
  {
    return(1);
  }
  return(0);
}
```

```
void errorManager()
{
  tft.fillScreen(HX8357_BLACK);
  tft.setTextColor(HX8357_RED);

  switch (error)
  {
    case sinError:
    {
      // Aqui no debería de entrar nunca
      error = sinError;
    }
    case neumatico:
    {
      tft.setTextSize(4);
      tft.setCursor(25, 25);
      tft.println("ERROR EN NEUMATICA");
      tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
      tft.setTextSize(2);
      tft.setCursor(65, 88);
      tft.println("FINAL DE CARRERA NO ACTIVADO");
      tft.setCursor(96, 133);
      tft.println("Revisar final de carrera");
      tft.setCursor(31, 163);
      tft.println("Revisar alimentacion electrovalvula");
      tft.setCursor(36, 193);
      tft.println("Revisar presion de aire en entrada");
      break;
    }
    case resistencia:
    {
      tft.setTextSize(4);
      tft.setCursor(15, 25);
      tft.println("ERROR CALENTAMIENTO");
      tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
      tft.setTextSize(2);
      tft.setCursor(88, 88);
      tft.println("IMPOSIBLE ALCANZAR TEMPERATURA");
      tft.setCursor(93, 148);
      tft.println("Revisar sensor temperatura");
      tft.setCursor(48, 178);
      tft.println("Revisar alimentacion resistencia");
      break;
    }
  }
  tft.setTextColor(HX8357_WHITE);
  tft.setTextSize(3);
  tft.drawRect(47, 240, 380, 60, HX8357_WHITE);
  tft.setCursor(180, 260);
  tft.println("ACEPTAR");
}

int continueTouch()
{
  TSPoint p = ts.getPoint();
  int aux = map(p.x, TS_MAXX, TS_MINX, 0, tft.height());
  p.x = map(p.y, TS_MINY, TS_MAXY, 0, tft.width());
  p.y = aux;

  if (p.x>47 & p.x<240 & p.y>240 & p.y<300)
  {
    return(1);
  }
  return(0);
}
```

```

void overHeatingError()
{
  if (calTemp() >= SAFETYTEMPERATURE)
  {
    digitalWrite(RESES, LOW);
    digitalWrite(VALVE, LOW);
    while(1)
    {
      tft.fillScreen(HX8357_RED);
      tft.setTextColor(HX8357_YELLOW);
      tft.setTextSize(5);
      tft.setCursor(170, 30);
      tft.println("SOBRE");
      tft.setCursor(50, 100);
      tft.println("CALENTAMIENTO");
      tft.setTextSize(4);
      tft.setCursor(115, 170);
      tft.println("DESCONECTAR");
      tft.setCursor(140, 210);
      tft.println("EL EQUIPO");
      tft.setCursor(140, 250);
      tft.println("DE LA RED");
      delay(500);
    }
  }
}

//////////////////////////////////// SETUP INICIAL //////////////////////////////////////

void setup(void)
{
  delay(250);

  Serial.begin(115200);
  tft.begin(HX8357D);
  tft.setRotation(1);

  pinMode(SENSOR, INPUT);
  pinMode(VALVE, OUTPUT);
  pinMode(RESES, OUTPUT);
  pinMode(SWITCH, INPUT);
  pinMode(PEDAL, INPUT);

  // beta=(log(RT1/RT2))/((1/T1)-(1/T2));
  beta=3990; //Segun datasheet
  Rinf=R0*exp(-beta/T0);
}

//////////////////////////////////// BUCLE INFINITO //////////////////////////////////////

void loop()
{
  while(1)
  {
    switch(estadoinicial)
    {

      ////////////////////////////////////// ESTADO INICIO
      case inicio:

```

```

{
    //////////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nEntry: INICIO");
        showInitialMessage();
        estadoIterAnterior = estadoIterActual;
    }
    //////////////// DO
    int initialPulse = initialTouch();
    //////////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    if (initialPulse==1)
    {
        Serial.print("\nExit: INICIO (to REPOSO)");
        estadoIterActual = reposo;
    }
    break;
}

////////////////////////////////////// ESTADO REPOSO
case reposo:
{
    //////////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nEntry: REPOSO");
        showMainMenu();
        error = sinError;
        digitalWrite(REISIS, LOW);
        digitalWrite(VALUE, LOW);
        estadoIterAnterior = estadoIterActual;
    }
    //////////////// DO
    int mainMenuPulse = mainMenuTouch();
    //////////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    if (mainMenuPulse==1)
    {
        Serial.print("\nExit: REPOSO (to EDICIONPARAMETROS)");
        estadoIterActual = edicionParametros;
    }
    if (mainMenuPulse==2)
    {
        Serial.print("\nExit: REPOSO (to ESPERATEMPERATURA)");
        estadoIterActual = esperaTemperatura;
    }
    if (mainMenuPulse==3)
    {
        Serial.print("\nExit: REPOSO (to OPERACIONMANUAL)");
        estadoIterActual=modoManual;
    }
    break;
}

////////////////////////////////////// ESTADO EDICIONPARAMETROS
case edicionParametros:
{
    //////////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nnEntry: EDICIONPARAMETROS");
        estadoIterAnterior=estadoIterActual;
    }
    //////////////// DO
    editTemp();
    editTime();
    //////////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    Serial.print("\nExit: EDICIONPARAMETROS (to REPOSO)");
}

```

```

    estadoIterActual = reposo;
    break;
}

//////////////////////////////////// ESTADO ESPERATEMPERATURA
case esperaTemperatura:
{
    ////////////////////////////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nEntry: ESPERATEMPERATURA");
        showWaitingMessage();
        showExitButton();
        actualTime = 0;
        initialTemp = calTemp();
        estadoIterAnterior = estadoIterActual;
    }
    ////////////////////////////////// DO
    tempControl();
    if (CLK1SEG)
    {
        showActualTemp();
        actualTime++;
    }
    ////////////////////////////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    if (actualTime>30 && actualTemp<initialTemp+10 && initialTemp<refTemp)
    {
        error = resistencia;
        estadoIterActual = errorEquipo;
    }
    if (abs(actualTemp-refTemp)<5)
    {
        Serial.print("\nExit: ESPERATEMPERATURA (to BAJARCILINDRO)");
        estadoIterActual = bajarCilindro;
    }
    if (exitTouch())
    {
        Serial.print("\nExit: ESPERATEMPERATURA (to REPOSO)");
        estadoIterActual = reposo;
    }
    break;
}

//////////////////////////////////// ESTADO BAJARCILINDRO
case bajarCilindro:
{
    ////////////////////////////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nEntry: BAJARCILINDRO");
        showPneumaticMessage();
        showExitButton();
        digitalWrite (VALVE, HIGH);
        actualTime = 0;
        estadoIterAnterior = estadoIterActual;
    }
    ////////////////////////////////// DO
    tempControl();
    if (CLK1SEG)
    {
        showActualTemp();
        actualTime++;
    }
    ////////////////////////////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    if (digitalRead (SWITCH)==1)
    {
        Serial.print("\nExit: BAJARCILINDRO (to CALENTAMIENTO)");
    }
}

```



```

        estadoIterActual = calentamiento;
    }
    if (exitTouch())
    {
        Serial.print("\nExit: BAJARCILINDRO (to REPOSO)");
        estadoIterActual = reposo;
    }
    if (actualTime>3)
    {
        Serial.print("\nExit: BAJARCILINDRO (to ERROREQUIPO)");
        error = neumatico;
        estadoIterActual = errorEquipo;
    }
    break;
}

//////////////////////////////////// ESTADO CALENTAMIENTO
case calentamiento:
{
    //////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nEntry: CALENTAMIENTO");
        showProcessInformation();
        showExitButton();
        actualTime = 0;
        estadoIterAnterior=estadoIterActual;
    }
    //////////// DO
    tempControl();
    if (CLK1SEG)
    {
        showProcessData();
        actualTime++;
    }
    //////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    if (actualTime>refTime)
    {
        Serial.print("\nExit: CALENTAMIENTO (to REPOSO)");
        estadoIterActual = reposo;
    }
    if (exitTouch())
    {
        Serial.print("\nExit: CALENTAMIENTO (to REPOSO)");
        estadoIterActual = reposo;
    }
    break;
}

//////////////////////////////////// ESTADO MODOMANUAL
case modoManual:
{
    //////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nEntry: OPERACIONMANUAL");
        showManualOperation();
        actualTime = 0;
        iRATE = 0;
        estadoIterAnterior = estadoIterActual;
        showExitButton();
    }
    //////////// DO
    tempControl();
    manualMode();
    if (CLK1SEG)
    {

```

```

        showActualTemp();
    }
    //////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    if (exitTouch())
    {
        Serial.print("\nExit: OPERACIONMANUAL (to REPOSO)");
        estadoIterActual = reposo;
    }
    break;
}

////////////////////////////////////// ESTADO ERROREQUIPO
case errorEquipo:
{
    //////////// ENTRY
    if (estadoIterActual!=estadoIterAnterior)
    {
        Serial.print("\nEntry: ERROREQUIPO");
        digitalWrite(REISIS, LOW);
        digitalWrite(VALVE, LOW);
        errorManager();
        estadoIterAnterior = estadoIterActual;
    }
    //////////// EVALUACION DE TRANSICIONES
    if (continueTouch())
    {
        Serial.print("\nExit: ERROREQUIPO (to REPOSO)");
        estadoIterActual = reposo;
    }
}
break;
}

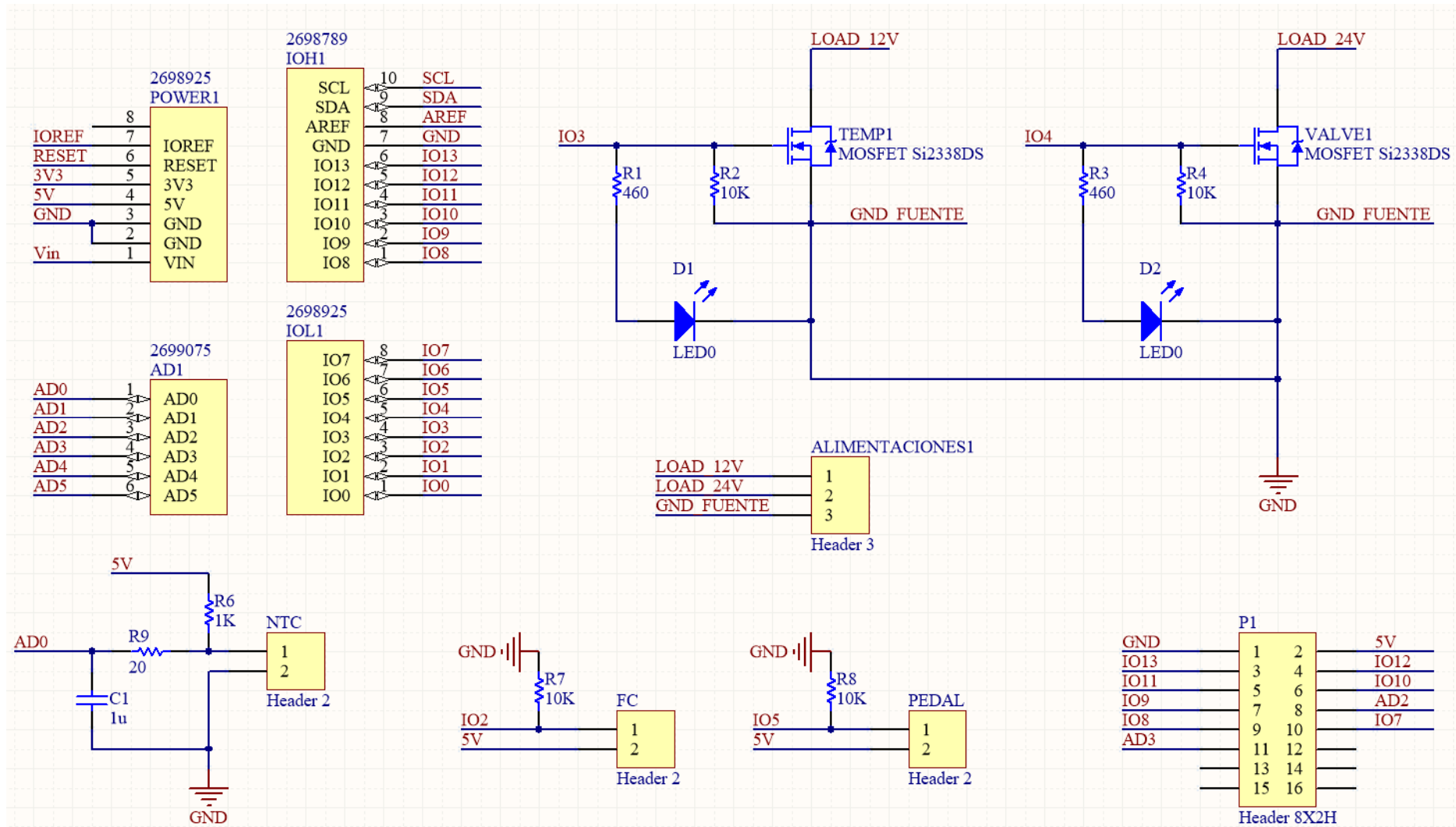
////////////////////////////////////// CONTROL TEMPERATURA SEGURIDAD
overHeatingError();

////////////////////////////////////// SEÑAL DE 1ZH
if (iRATE==RATE)
{
    iRATE = 0;
    CLK1SEG = 1;
}
else
{
    iRATE++;
    CLK1SEG = 0;
}

////////////////////////////////////// DELAY
delay(100);
}
}

```

## 24. ANEXO H: ESQUEMA DISEÑADO PARA LA PCB DE CONTROL



Desarrollo de un equipo a medida para la conexión de microcomponentes electrónicos sobre sustratos flexibles mediante adhesivos anisotrópicos