



Universidad de Extremadura
Escuela Politécnica

Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen en
Telecomunicaciones

Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de un sistema de corte CNC
usando hardware y software libre

Sergio Sánchez Herranz
Noviembre 2015



Universidad de Extremadura
Escuela Politécnica

Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen en
Telecomunicaciones

Trabajo Fin de Grado

**Desarrollo de un sistema de corte CNC
usando hardware y software libre**

Autor: Sergio Sánchez Herranz

Director: D. Antonio Gordillo Guerrero

Tribunal Calificador

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Noviembre de 2015.

A mi familia

Resumen

El presente documento recoge el desarrollo de las tareas de diseño y construcción de una maquina de corte y grabado láser. Para su realización se ha utilizado software de simulación electrónica, software de realización de esquemas y de diseño de placas de circuito impreso y software de diseño 3D. Se ha elaborado un programa de Python que traduce las imágenes que se desean grabar a código G, el código que entiende la maquina. Como cerebro de la maquina que ha utilizado una placa Arduino Mega con un microcontrolador Atmega 2560 y un *shield* RAMPS v1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) que nos permite la conexión de diversos dispositivos y proporciona la alimentación de los motores.

El láser utilizado es un láser de diodo modelo M140 con una potencia óptica de aproximadamente 2W. La temperatura de trabajo de este diodo se controla mediante un sistema de adquisición de temperatura que utiliza amplificadores operacionales y comparadores para mantener la temperatura en niveles seguros de operación. La potencia de trabajo puede ser modulada mediante una instrucción incluida en el firmware.

La mayoría de las tareas de construcción se han realizado en el laboratorio Smart Open Lab de la Escuela Politécnica de Cáceres.

Índice general

Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
1. Introducción	1
1.1. Motivaciones	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organización del texto	2
2. Láser	5
2.1. ¿Qué es un láser?	5
2.1.1. Emisión estimulada	5
2.2. Partes de un láser	6
2.2.1. Fuente de bombeo	6
2.2.2. Medio de ganancia	7
2.2.3. Resonador óptico	8
2.3. Funcionamiento del láser	9
2.3.1. Bombeo	9
2.3.2. Amplificación	9
2.3.3. Emisión	10
2.4. Modos de operación de un láser	11
2.4.1. Onda continua	11
2.4.2. Modo pulsado	11
2.5. Un poco de historia	13
2.5.1. Fundamentos	13
2.5.2. Máser	13
2.5.3. Láser	14
3. Diseño	17
3.1. Estructura	17

3.2. Electrónica	19
3.2.1. Fuente de alimentación	19
3.2.2. Diodo Láser	20
3.2.3. Fuente de alimentación del diodo láser	23
3.2.4. Dispositivo Peltier	26
3.2.5. Adquisición de la temperatura del diodo.	28
3.2.6. Refrigeración con el dispositivo Peltier	32
3.2.7. Motores	36
3.2.8. Controladores de los motores	38
3.2.9. Microcontrolador Atmega 2560 y RAMPS	40
4. Construcción	43
4.1. Montaje de la estructura	43
4.2. Montaje del bloque del diodo láser y su refrigeración	45
4.3. Colocación de los motores paso a paso y montaje del sistema de transmisión de movimiento	47
4.4. Diseño y fabricación de las placas de circuito impreso	49
4.4.1. Añadir o crear los componentes en las librerías	49
4.4.2. Diseño del esquema	49
4.4.3. Diseño de la placa de circuito impreso	50
4.5. Fabricación y soldadura de la PCB	52
5. Firmware y Software usados	57
5.1. Firmware	57
5.1.1. Características de Marlin Firmware	57
5.2. Software	58
6. Procesamiento de imágenes	61
6.1. Script de Python	61
7. Resultados	65
8. Conclusiones y futuras mejoras	69
8.1. Conclusiones	69
8.2. Futuras mejoras	70

Índice de figuras

2.1. Emisión estimulada	6
2.2. Partes de un láser	8
2.3. Modos de un láser	10
2.4. Manuscrito de Gould	14
3.1. Estructura de la máquina.	18
3.2. Fuente de alimentación usada.	19
3.3. Conector y esquema de los terminales del conector	20
3.4. Foto del diodo láser	21
3.5. Diodo con su cubierta y lente colimadora.	23
3.6. LM317 como regulador de tensión.	24
3.7. LM117 como limitador de corriente.	25
3.8. Fuente de corriente limitada con LM350.	26
3.9. Representación de dispositivo Peltier	27
3.10. Adquisición de temperatura con INA826 y NTC	29
3.11. Adquisición de temperatura con INA826 y NTC resultante	31
3.12. Circuito ejemplo de un disparador de Schmitt, VTC y respuesta a una señal.[10]	32
3.13. Disparador Schmitt no inversor con una sola fuente.[10]	34
3.14. Circuito completo de adquisición de temperatura y control del dispositivo Peltier.	34
3.15. Motor NEMA17	36
3.16. Modelo conceptual de un motor paso a paso bipolar	37
3.17. Micro-stepping en DRV8255	38
3.18. Esquema simplificado del controlador DRV8255	39
3.19. Placa de desarrollo Arduino Mega con microcontrolador Atmega2560	40
3.20. <i>Shield</i> RAMPS versión 1.4	41
4.1. Estructura del prototipo y bloque láser montado	44
4.2. Detalle del soporte del bloque del láser	45
4.3. Bloque del láser con y sin soporte	46

4.4.	Montaje del motor con el separador/soporte del final de carrera	47
4.5.	Montaje del motor con el separador	48
4.6.	esquema completo de la PCB diseñada	50
4.7.	Inicio del diseño de la placa de circuito impreso	51
4.8.	Diseño de la placa de circuito impreso	52
4.9.	Placa de circuito impreso en transparencia	53
4.10.	Placa de circuito impreso con pistas unidas	54
4.11.	Placa de circuito impreso con pistas separadas	55
4.12.	Placa de circuito impreso con sus componentes	56
7.1.	Selección de trabajo en el menú de la LCD	66
7.2.	Grabado de una imagen	67

Índice de cuadros

3.1. Absolute Maximum Ratings	21
3.2. Specifications ($T_C = 25^\circ C$, $I_{op} = 2A$)	22

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivaciones

La motivaciones principales de llevar a cabo este proyecto podría decir que son: la necesidad, la curiosidad y las ganas e ilusión de concluir la titulación con un proyecto que después pudiera ser usado.

Con la necesidad me refiero, a la necesidad de herramientas que tenemos en *Smart Open Lab* (SOL). SOL es un laboratorio que se creó en el seno de la Escuela Politécnica con la colaboración de profesores, alumnos y de la propia Universidad de Extremadura. El objetivo de este laboratorio es dotar a los usuarios de un espacio abierto en el que se puedan llevar a cabo proyectos en el ámbito de la robótica, la electrónica y la informática. Para realizar estos proyectos muchas veces son necesarias herramientas que no podemos tener en casa, así una de las cosas que se propuso comprar fue una cortadora láser.

Respecto a la curiosidad, personalmente siempre he sentido cierta fascinación por la robótica y los láser. Por eso me interese por realizar un proyecto en el que pudiera combinar estas dos cosas.

Y por último las ganas e ilusión de concluir la titulación con un trabajo de estas características, ya que la construcción y el diseño de un dispositivo así han supuesto un bonito y duro reto.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el diseño y la construcción de una cortadora y grabadora láser. La cual debe tener las características mínimas siguientes:

- Debe tener un área de trabajo mínima equivalente a la de un documento DIN A3, es decir 297mm x 420mm.
- Debe ser capaz de cortar contrachapado, plásticos y otros materiales con un espesor de unos 3mm.
- Debe ser capaz de operar de modo continuado sin riesgo de sobrecalentamiento de sus elementos y más importante sin riesgo de COD(Catastrophic Optical Damage).
- Además la máquina debe ser capaz de realizar grabados modulando la intensidad con la que quema el láser de manera que consigamos un grabado en "escala de grises".
- Debe ser adaptable para hacer la función de fresadora CNC al menos y idealmente de fresadora CNC y de impresora 3D.
- Debe ser compatible con el código G estándar.
- Debe incluir un programa que cargue y transforme las imágenes, y que además cree un archivo que contenga el código G listo para la ejecución.

1.3. Organización del texto

El siguiente texto estará organizado como sigue. El capítulo dos tratará sobre los fundamentos del láser, los tipos, las partes que los componen y un poco de historia sobre su desarrollo. En la pareja de capítulos siguientes se expondrá el proceso de diseño y de construcción que se ha llevado a cabo en la realización de este proyecto. Se continuará con una presentación del firmware que se usará para el prototipo y la explicación del programa confeccionado para la obtención de las instrucciones de código G partiendo de las imágenes que se quieran grabar. Para terminar se expondrán los resultados y se compararán con los objetivos marcados y en el último capítulo se expondrán las conclusiones. Todos los capítulos y sus secciones pueden consultarse en el índice del documento.

En el mismo texto se hará referencia a figuras del documento y en ocasiones se remitirá a los apéndices para ver, por ejemplo, el código completo usado o los diseños de las piezas en tres dimensiones que se han utilizado.

Capítulo 2

Láser

2.1. ¿Qué es un láser?

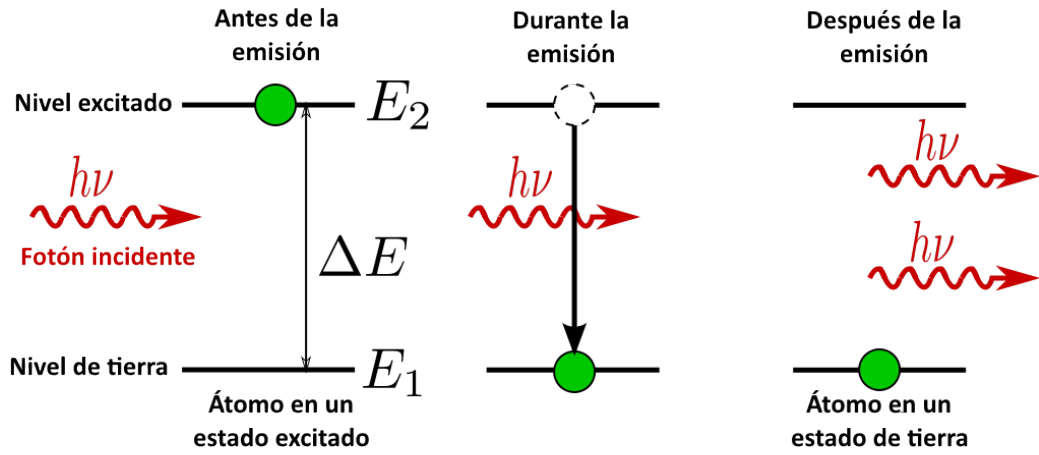
Un láser es un dispositivo que emite luz mediante el proceso de amplificación óptica, este proceso está basado en el fenómeno de la emisión estimulada de radiación electromagnética. El nombre, láser proviene de la sigla inglesa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*[1], en español, amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

El primer láser fue construido por Theodore H. Maiman en los *Hughes Laboratories* en 1960, basándose en el trabajo teórico de Charles Hard Townes y Arthur Leonard Schawlow.

Un láser se diferencia de otras fuentes de luz en que éste emite luz de manera coherente, tanto espacial como temporalmente. La coherencia espacial permite que el láser sea enfocado en un punto muy pequeño, posibilitando aplicaciones como el corte con láser y la fotolitografía. Esto mismo permite que el rayo láser se mantenga enfocado incluso a grandes distancias. La coherencia temporal es la propiedad de los láser que les permite emitir luz en un ancho de banda muy estrecho, es decir, en emitir luz de aproximadamente un solo color.

2.1.1. Emisión estimulada

La **emisión estimulada** es el proceso por el cual un fotón con unas determinadas características incide sobre un electrón que se encuentra en un nivel de excitación. En esta interacción se fuerza a que el electrón cambie a un nivel de energía más bajo, y al producirse una diferencia de energía entre los dos estados se crea un nuevo fotón de fase, frecuencia, polarización



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Figura 2.1: Emisión estimulada

y dirección idénticas al fotón incidente.

Para que se produzca la emisión estimulada se debe conseguir primero una **inversión de población**. El fenómeno de inversión de población se produce cuando existen más átomos en los estados de energía superiores que en los inferiores. La frecuencia con la que ocurre la emisión estimulada es proporcional al número de átomos que se encuentren en estado excitado.

Un detalle muy importante de la emisión estimulada es que los fotones que se producen mantienen la frecuencia y la fase del fotón incidente, es decir, tienen coherencia temporal.

2.2. Partes de un láser

Un láser generalmente está compuesto por tres partes principales que serán descritas en esta sección:

2.2.1. Fuente de bombeo

Una **fente de bombeo** (*pump source*) es la parte encargada de entregar la energía al sistema láser. Ejemplos de fuentes de bombeo podrían

ser corrientes eléctricas, lámparas de descarga, la luz de otro láser, reacciones químicas e incluso artefactos explosivos[2]. El tipo de fuente de bombeo viene determinado por el medio de ganancia utilizado para la construcción del láser.

2.2.2. Medio de ganancia

El **medio de ganancia** (*gain medium*) es la materia que debe ser excitada por la fuente de bombeo para poner sus átomos en un estado de excitación. Este medio de ganancia es el que determina, principalmente, la longitud de onda de la emisión láser. Medios de ganancia de diferentes composiciones pueden tener espectros estrechos o espectros amplios. Los que tienen espectros amplios permiten ajustar la frecuencia del láser en un rango mayor. Los medios de ganancia pueden ser líquidos, sólidos, gases, y semiconductores.

Los medios líquidos usualmente utilizan disoluciones orgánicas de alcoholes y tintes. La composición de esta disolución determina la longitud de onda del láser. Este tipo de láser por su naturaleza se puede sintonizar en un amplio rango de frecuencias. Se utilizan sobre todo en el campo de la medicina para estudiar reacciones.

Los medios gaseosos están formados por un gas o una mezcla de gases a baja presión, que al ser estimulados por una fuente de bombeo producen emisión láser. Los más utilizados son el dióxido de carbono, gases nobles como el argón, criptón y mezclas de helio y neón. Estos medios normalmente son excitados mediante descargas eléctricas. Suelen ser de muy alta potencia y necesitan refrigeración constante.

Sólidos como cristales y vidrios que deben estar dopados con impurezas de cromo, neodimio, erbio o iones de titanio. En esta categoría se encontrarían los láser Nd:YAG (Neodymium: Yttrium Aluminium Garnet) usados en la depilación. Suelen excitarse mediante luces de descarga o la luz de otro láser. También entraría en esta categoría el láser de fibra.

Láser de semiconductor, conformados por un cristal con una distribución de impurezas uniforme o un material con impurezas no uniformes en los que el movimiento de los electrones puede causar emisión láser. La gran ventaja de este tipo de láser es que son pequeños, y pueden ser excitados mediante una corriente eléctrica, permitiendo que sean introducidos en multitud de dispositivos en forma de diodo láser.

2.2.3. Resonador óptico

La tercera y última parte que conforma un láser se trata del **resonador óptico** o cavidad resonante. El resonador óptico usualmente consiste en dos superficies enfrentadas entre las cuales viaja un rayo coherente de luz en ambos sentidos. Una de ellas es altamente reflectante mientras que la otra tiene una reflectividad menor, este último se denomina **acoplador de salida** (*output coupler*). De esta manera los fotones pasarán por el medio de ganancia repetidamente hasta que sean emitidos o desaparezcan por efecto de la absorción.

La reflectividad del espejo que forma el acoplador de salida viene dada según el tipo de medio de ganancia que se utilice, por ejemplo los láser de que utilizan una mezcla de helio-neón como medio de ganancia necesitan que tenga una reflectividad del 99 %. Sin embargo los láser que utilizan nitrógeno el cual tiene una ganancia extremadamente alta, no requieren reflectividad ninguna[3] y se fabrican para que esta sea lo más cercana al 0 %.

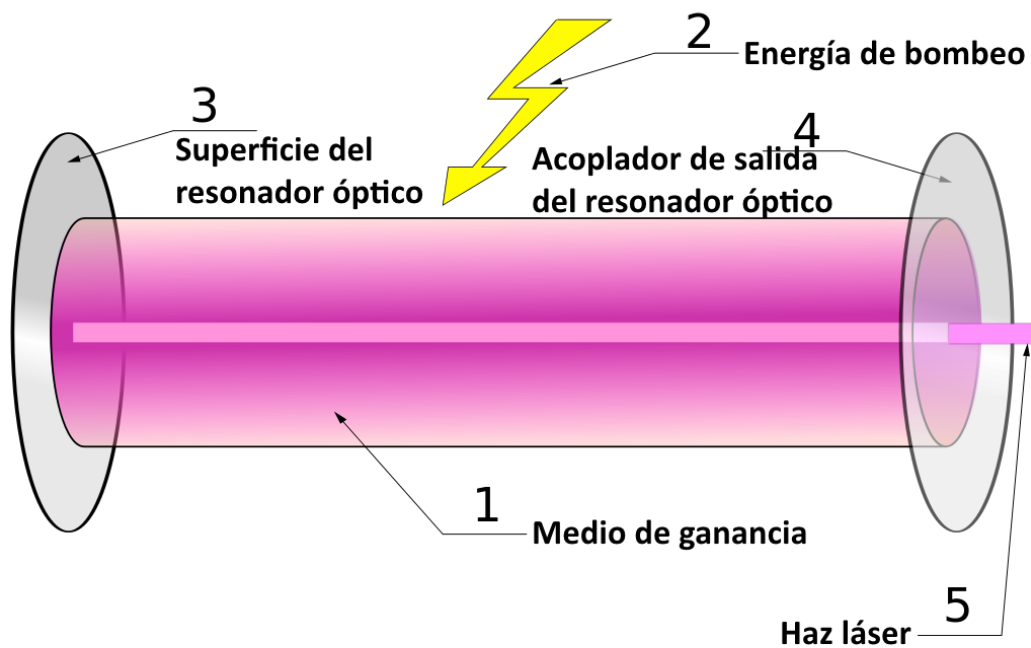


Figura 2.2: Partes de un láser

2.3. Funcionamiento del láser

Vistas las partes que componen un láser y los fenómenos físicos principales en los que se sustenta, a continuación se tratará el funcionamiento del láser.

2.3.1. Bombeo

Ya hemos descrito la **fente de bombeo** como la parte encargada de proporcionar la energía al láser. En particular, la energía que entrega la fuente de bombeo produce que los átomos que componen el **medio de ganancia** pasen de los estados de menos energía a los de mayor energía. De esta manera podemos conseguir la inversión de población necesaria para que sea posible la emisión estimulada de los fotones.

2.3.2. Amplificación

Una vez que tenemos una inversión de población los electrones de los átomos excitados, que se encontrarán en los niveles superiores de energía, pasan espontáneamente a niveles inferiores de energía por el efecto de la emisión espontánea. Estos fotones que se producen espontáneamente serán los que al rebotar en el resonador óptico, volverán a pasar por el medio de ganancia produciendo así, al interactuar con los átomos de este medio, que sean absorbidos llevando al átomo absorbente a un estado de mayor energía, o bien producirán el efecto de emisión estimulada explicado anteriormente. Si la ganancia del sistema es mayor que sus pérdidas, comenzará a aumentar la potencia del haz de luz que circula dentro del medio y comenzará la emisión láser.

En un láser de onda continua (*CW*, *Continuous Wave*), el balance entre la ganancia del resonador óptico, sus pérdidas y la energía de excitación produce un equilibrio de la energía del láser dentro del resonador. Este equilibrio determina el **punto de funcionamiento** del láser. Si la energía entregada por la fuente de bombeo no es lo suficientemente grande, la ganancia no será suficiente para superar las pérdidas del resonador óptico y no se producirá emisión láser. La mínima energía de bombeo necesaria para comenzar la emisión láser se denomina **umbral láser** (*Lasing threshold*).

Todos los fotones que pasen por el medio de ganancia, podrán ser amplificados por efecto de la emisión estimulada. Pero solo aquellos fotones en un

modo espacial soportado por el resonador óptico rebotaran en él pasando de nuevo por el medio de ganancia hasta que sean emitidos.

2.3.3. Emisión

Como ya se ha expuesto, el acoplador de salida, uno de los espejos del resonador óptico tiene una reflectividad entre el 0 y el 99 %. En particular la reflectividad nula, se utiliza en los láser de nitrógeno[3], para los demás medios de ganancia, debe existir reflectividad en el acoplador de salida. Esto permite que los fotones que se encuentran dentro del resonador óptico reboten en multitud de ocasiones. Al pasar de nuevo por el medio de ganancia, se amplifican por el fenómeno de emisión estimulada y algunos de ellos en vez de rebotar serán emitidos por el sistema láser. La luz emitida por el láser al ser producida por emisión estimulada tendrá una gran coherencia temporal. En la mayoría de los láser, el rayo emitido se aproxima a un haz Gaussiano. En este caso se dice que el láser está operando en el modo transversal electromagnético fundamental, o TEM_{00} del resonador óptico.

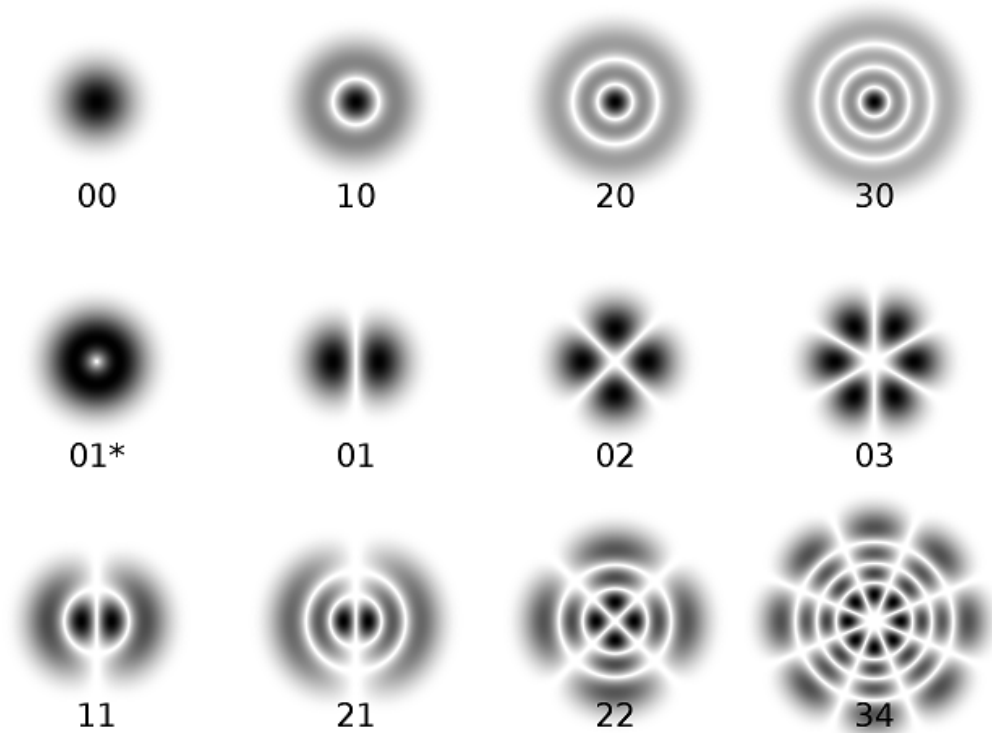


Figura 2.3: Modos de un láser

Cerca de la cintura del haz, o la región focal, los frentes de onda son normales a la dirección de propagación, sin divergencia en ese punto. Sin embargo, debido a la difracción, esto solamente ocurre mientras no se supere la distancia de Rayleigh¹.

2.4. Modos de operación de un láser

2.4.1. Onda continua

Algunas aplicaciones láser necesitan que el rayo tenga una potencia de salida constante en el tiempo. Este tipo de láser se denominan de **onda continua** (*continuous wave*). Para la operación en onda continua de un láser se requiere que la inversión de población sea constantemente repuesta por una fuente de bombeo continua. Con algunos medios láser esto es imposible por las características del medio o porque requeriría una gran cantidad de energía lo que los destruiría por el calor o no sería práctico.

2.4.2. Modo pulsado

Los láser de **operación pulsada** (*pulsed mode*) son aquellos en los que la potencia de salida aparece en pulsos de cierta duración o con cierta frecuencia de repetición. Esto incluye un gran número de tecnologías. Algunos tipos de láser operan en modo pulsado porque no es posible que lo hagan en modo continuo. En otros casos el tipo de aplicación nos obliga a crear pulsos láser con una energía tan grande como sea posible.

Por ejemplo en la ablación láser se debe evaporar cierto volumen de material de la superficie de trabajo, esto se consigue si el material se evapora y para ello debe calentarse en muy poco tiempo sin dar lugar a que se transfiera este calor al resto del material circundante.

El medio de ganancia de algunos láser líquidos y estado sólido nos permiten crear pulsos láser de unos pocos femtosegundos. Aunque al ser pulsos tan pequeños el ancho de banda de emisión es mayor que en un láser de operación continua.

Las técnicas de conmutación-Q, bloqueo modal y bombeo pulsado pertenecen a este modo de operación.

¹En óptica la distancia de Rayleigh es la distancia en la dirección de propagación de un rayo desde su punto focal hasta el lugar donde el área de la sección se duplica. La distancia de Rayleigh es especialmente importante cuando los rayos se modelan como rayos Gaussianos.

Conmutación-Q

En un láser de **conmutación-Q** (*Q-switched*) se permite que la inversión de población se sature introduciendo pérdidas de ganancia dentro del resonador mediante un elemento electro-óptico o acústico-óptico. Podemos decir que se reduce el factor de calidad Q del resonador. Una vez que la inversión de población es suficiente, se eliminan rápidamente estas pérdidas introducidas y comienza la emisión láser con la inversión de población máxima. Este proceso resulta en un pulso de corta duración pero de gran potencia.

Bloqueo modal

Un láser de **bloqueo modal** (*mode-locked*) es capaz de emitir pulsos del orden de picosegundos. Estos pulsos se repiten en el tiempo de ida-vuelta de los fotones dentro del resonador. Debido a la teoría de Fourier, un pulso de tan poca duración tendrá el espectro disperso en un ancho de banda amplio. Debido a esto el medio de ganancia debe tener un ancho de banda de ganancia considerable como por ejemplo el záfiro dopado con titanio, que tiene un gran ancho de banda de ganancia y llega a producir pulsos de una duración de solo una decena de femtosegundos.

Este tipo de láser se utilizan sobre para la investigación de procesos que ocurren en escalas de tiempo muy pequeñas.

Bombeo pulsado

Otro método para conseguir la operación pulsada de un láser es pulsar directamente la fuente de bombeo, bien sea mediante corrientes eléctricas o mediante la luz de una lámpara de descarga o de otro láser. El bombeo pulsado es usado en láser con medios de ganancia líquidos ya que las moléculas orgánicas que componen el medio tienen un tiempo de vida muy bajo y se necesita una fuente que pueda aportar mucha energía en un periodo de tiempo muy pequeño. La manera de hacerlo es mediante la descarga de condensadores a través de lámparas flash que son las fuentes de bombeo del láser. También se utilizan este tipo de técnica en los láser excimer y los de vapor de cobre que sin embargo no pueden ser usados en modo continuo.

2.5. Un poco de historia

2.5.1. Fundamentos

En 1917, Albert Einstein estableció los fundamentos teóricos del láser y el máser mediante la re-derivación de la ley de radiación de Max Planck's[4]. Se basó en los conceptos de los coeficientes de probabilidad de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada de radiación. En 1928, Rudolf W. Ladenburg confirmó la existencia de la emisión estimulada y la absorción. En 1939, Valentin A. Fabrikant predijo el uso de la emisión estimulada para amplificar ondas "cortas" [5]. En 1950, Alfred Kastler (Premio Nobel de Física en 1966) propuso el método de el bombeo óptico, confirmado experimentalmente dos años después[6].

2.5.2. Máser

En 1953, Charles Hard Townes y sus estudiantes de grado James P. Gordon y Herbert J. Zeiger construyeron el primer amplificador de microondas. Este dispositivo operaba con principios similares a los del láser pero amplificando radiación microondas en vez de luz visible.

Mientras tanto en la Unión Soviética, Nikolay Basov y Alexander Prokhorov trabajaban independientemente en el oscilador cuántico y resolvieron el problema de la operación en modo continuo usando medios con más de dos niveles de energía. Estos medios eran capaces de producir emisión estimulada utilizando dos niveles de energía con diferente nivel de excitación en vez del nivel de tierra, de esta manera se facilitaba el mantenimiento de la inversión de población durante la operación.

Charles Hard Townes dijo que alguno físicos eminentes de la época, entre ellos Niels Bohr y John Von Neumann, no pensaban que el máser fuera a funcionar ya que violaba el principio de incertidumbre de Heisenberg[7].

Más tarde en 1964 Townes, Basov y Prokhorov compartieron el Premio Nobel de física por: "su trabajo fundamental en el campo de la electrónica cuántica, que conllevó la construcción de osciladores y amplificadores basados en el principio del láser-máser."

2.5.3. Láser

En 1957, Charles Hard Townes y Arthur Leonard Schawlow, entonces en los laboratorios Bell, empezaron a estudiar concienzudamente el láser infrarrojo. Cuando avanzaron en su estudio decidieron abandonar la radiación infrarroja para concentrarse en el láser en el espectro visible. Este concepto fue llamado en principio "máser óptico". En 1958 los laboratorios Bell presentaron una petición de patente para su propuesta de máser óptico y Schawlow y Townes enviaron sus cálculos teóricos a la publicación *Physical Review*. Este trabajo fue publicado ese mismo año en volumen 112 de la revista.

Al mismo tiempo, en la Universidad de Columbia, Gordon Gould, aún un estudiante, estaba trabajando en su tesis doctoral sobre los niveles de energía de los átomos excitados del talio. Cuando Gould y Townes se encontraron en 1957 hablaron sobre su trabajo, lo que inspiró a Gould para escribir su concepto de láser, incluyendo el uso de un resonador óptico abierto, que más tarde se descubrió que era un componente fundamental en el funcionamiento de un láser. Además en 1958, Prokhorov propuso por su parte el uso de un resonador óptico abierto, en la que fue la primera publicación sobre esta idea. Un tiempo más tarde Schawlow y Townes llegaron a la conclusión de usar un resonador óptico abierto, aparentemente sin saber del trabajo de Prokhorov y conocer del trabajo de Gould.

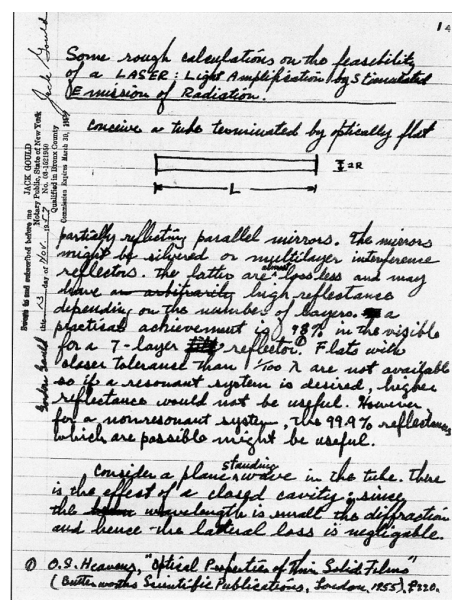


Figura 2.4: Manuscrito de Gould

En una conferencia en 1959, Gould publicó el término LASER en su trabajo "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" [1]. La intención de Gould era usar el sufijo -aser y el prefijo para denotar el tipo de radiación emitida por el dispositivo. Aunque nunca llegó a extenderse, durante un tiempo se llegó a utilizar raser para denotar a dispositivos emisores de radio frecuencia.

Las notas de Gould incluían posibles aplicaciones para un láser, entre ellas la espectrometría, interferometría, y ser un sustituto del radar. En 1959, envió una petición de patente pero la oficina de patentes de EEUU se la denegó. Sin embargo le concedió la patente a los laboratorios Bell en 1960. Después de 28 años de guerra en los tribunales, se le concedió a Gould la patente de los láser bombeados por fuentes ópticas y los de descarga de gas. Debido al paralelismo con el que se descubrió y se fundamentó el láser, no hay un consenso sobre a quien atribuir el descubrimiento del láser. Lo que si es un hecho es que el término fue usado por primera vez por Gould, R. Gordon[1][8].

El 16 de mayo de 1960, Theodore H. Maiman puso en operación el primer láser funcional[9] en el laboratorio de investigación Hughes, en Malibú, California. Maiman utilizó un láser de estado sólido con un cristal de rubí energizado por una lámpara de descarga. Este dispositivo sólo era posible utilizarlo en modo pulsado. Más tarde ese mismo año el físico iraní Ali Javan, y los estadounidenses William R. Bennett y Donald Herriott construyeron el primer láser de gas utilizando una mezcla de helio y neón que además era capaz de operar en modo continuo.

El diodo láser como lo conocemos no llegaría hasta 1970. Fue obra de Zhores Alferov en la Unión Soviética e Izuo Hayashi y Morton Panish en los laboratorios Bell, que de manera simultánea desarrollaron un diodo láser capaz de operar a temperatura ambiente y de modo continuado.

Capítulo 3

Diseño

En esta sección se tratarán todos los temas de diseño. Desde la estructura, las piezas en 3D, pasando por la elección de componentes, cálculos y diseños electrónicos.

3.1. Estructura

En los objetivos hemos adelantado que la máquina debería ser fácilmente adaptable para usarse como fresadora CNC o como impresora 3D. Por ello hemos utilizado una estructura realizada con perfiles de aluminio de 15x15 mm reforzados mediante varillas de acero inoxidable de 5mm de diámetro en los ejes de rodadura. Esta estructura dispone en sobre su eje Y de una parte pensada para introducir un cabezal fresador del tipo Dremel o similar. En nuestro caso esta estructura será intercambiada por otra hecha a medida mediante impresión 3D para alojar el bloque del diodo láser y su refrigeración.

Tiene una superficie de trabajo algo mayor a la de un documento A3, la cual está reforzada con numerosos perfiles de aluminio que son fácilmente movibles para adaptar la base a distintas necesidades. En concreto el eje X tiene un recorrido de 450 mm y el recorrido del eje Y alcanza los 330 mm. Los ejes de movimiento están reforzados con varillas de acero inoxidable que actúan como caminos de rodadura para los rodamientos de doble línea de bolas.

Los soportes de los motores están hechos en aluminio, están pensado para soportar motores paso a paso como los NEMA 17 que hemos utilizado.

Las patas de la estructura están hechas con los mismos perfiles de aluminio que el resto y están acabadas en unas patas de silicona negra que impiden que la estructura se mueva durante el funcionamiento debido a las vibraciones que se producen.

El intercambio de movimiento de los motores a la maquina se realiza mediante correas dentadas de poliuretano T2.5 de 5 mm de ancho y por poleas dentadas de metal en los extremos de cada eje.

Además se han añadido piezas hechas a medida para impedir el roce de las correas dentadas con los perfiles y para añadir soporte para los finales de carrera que necesitará la máquina para operar. Estos finales de carrera servirán para que la maquina pueda tener un punto de referencia (0,0) dentro de su espacio de trabajo.

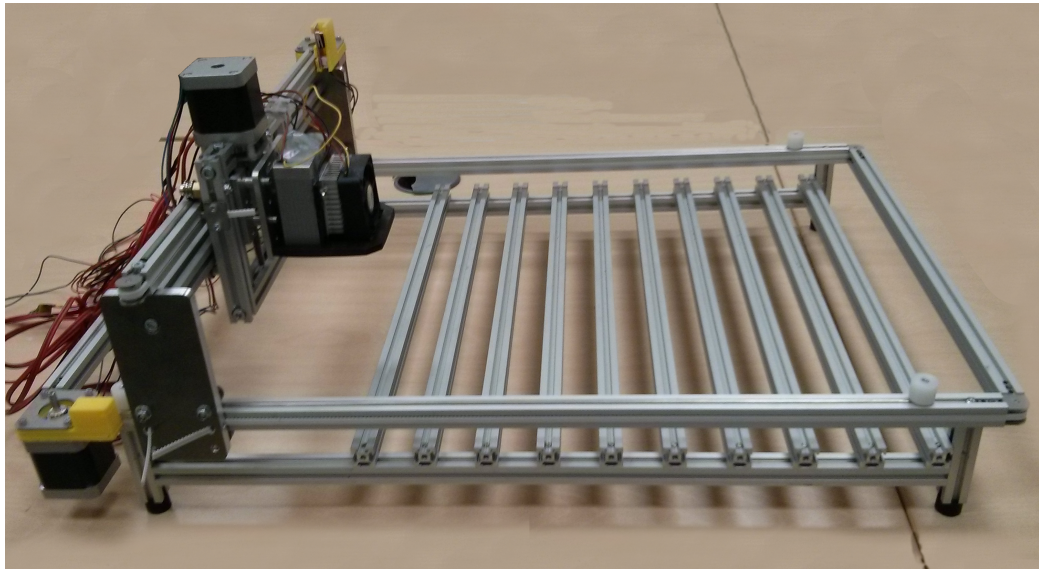


Figura 3.1: Estructura de la máquina.

3.2. Electrónica

3.2.1. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación que se ha usado es una recuperada de un antiguo ordenador. Se trata de una fuente ATX con conectores estándar incluyendo el conector principal de alimentación de 20 pines. Con este conector tenemos salidas de +3.3V, +5V, +12V, -5V, -12V y tierra. Esto nos brinda gran versatilidad a la hora de trabajar con diferentes componentes electrónicos, ya que podemos utilizar componentes que necesiten alimentaciones simétricas (voltajes negativos y positivos) de manera sencilla. Además al ser una fuente de alimentación de uso tan extendido disminuye el precio total del prototipo. En este caso ha tenido coste cero ya que ha sido recuperada de un antiguo ordenador.

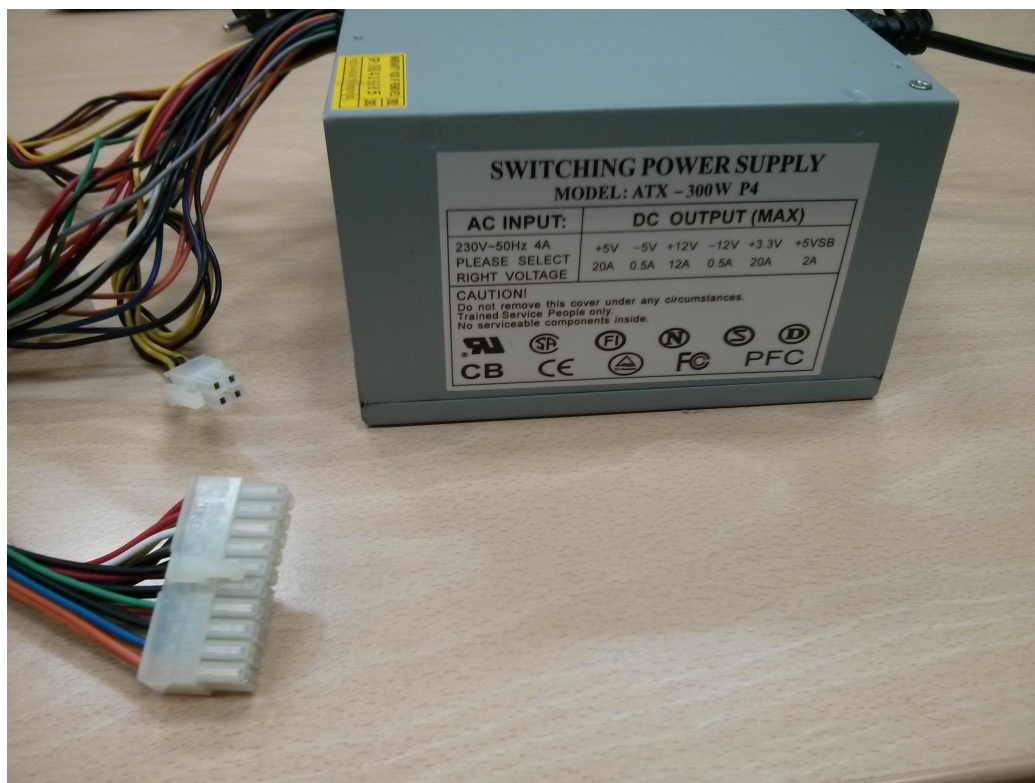


Figura 3.2: Fuente de alimentación usada.

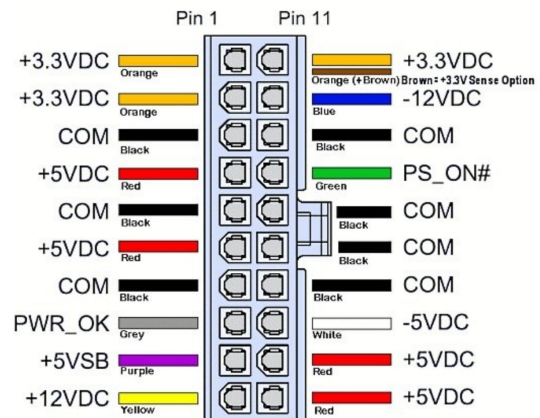
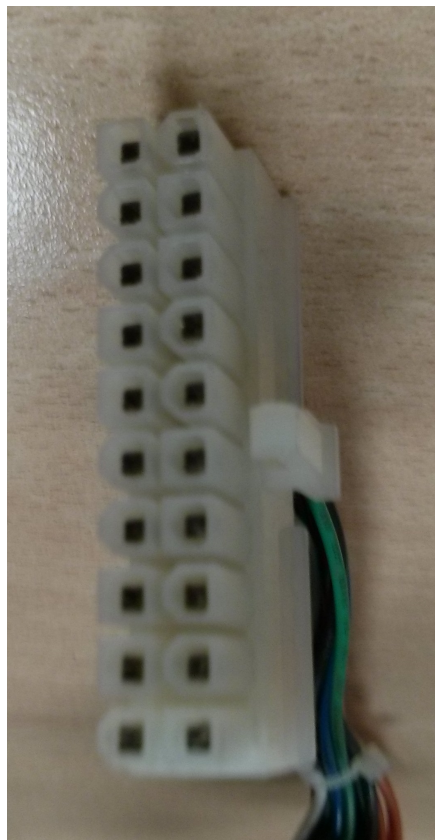


Figura 3.3: Conector y esquema de los terminales del conector

3.2.2. Diodo Láser

Ya hemos visto en el segundo capítulo los tipos de láser que existen, sus partes, modos de funcionamiento y los fenómenos físicos que los hacen posibles. En este apartado vamos a hablar del diodo láser que se ha elegido para el proyecto.

El dispositivo en cuestión se trata de un diodo láser de nitruro de galio-indio (InGaN) el cual emite en los 445nm. Esta longitud de onda pertenece al espectro de luz visible en particular al color azul.

El diodo láser en cuestión es el modelo M140 cuya potencia óptica de salida está entorno a los 2W. Las especificaciones eléctricas del diodo son similares a las de cualquier otro diodo de este tipo y esta potencia. Podemos ver las características principales que debemos tener en cuenta para el diseño en los cuadros 3.1 y 3.2.



Figura 3.4: Foto del diodo láser

Cuadro 3.1: Absolute Maximum Ratings

Item	Symbol	Value	Unit
LD Reverse Voltage	$V_R(\text{LD})$	4.5	V
LD Forward Current	I_F	2.2	A
Operating Case Temperature	T_C	0 ... +35	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-30 ... +70	°C

Como podemos ver en las características, la divergencia del diodo es muy alta, esto es normal para los láser de semiconductor, por ello es necesario usar una lente colimadora para concentrar en un solo punto la luz que emite. El diodo está montado en una cubierta de metal de 12 mm de diámetro, en cuya apertura delantera se encuentra la lente colimadora regulable (Figura 3.5). Esta lente permite enfocar toda la luz en un punto muy pequeño concentrando toda la energía que emite el láser.

Cuadro 3.2: Specifications ($T_C = 25^\circ C$, $I_{op} = 2A$)

Item	Symbol	Min.	Typ.	Max	Unit
<i>Optical Specifications</i>					
Optical Output Power(CW)	P_o	1.8	2.00	2.20	W
Dominante Wavelength	Λ_D	442	445	448	nm
Beam Divergence Full Angle ($1/e^2$)	$\Theta_{\parallel}$	5	12	25	deg
	$\Theta_{\perp}$	30	40	50	deg
Emission Point Accuracy	$\Delta\theta_{\perp}$	-5		5	deg
<i>Electrical Specifications</i>					
Threshold Current	I_{th}	150		200	mA
Operating Current	I_{op}	-	2	-	A
Operating Voltage	V_{op}	4	-	6	V
Slope Efficiency	η	0.8	-	1.8	W/A

Otra característica importante de el diodo es que tiene una corriente de operación máxima $I_F = 2,2A$ y una intensidad umbral $I_{th} = 200mA$. Esto quiere decir que a partir de 200mA comienza la emisión láser y debemos alimentarlo como máximo con una corriente de 2.2A. Es muy importante no exceder los 2.2A ya que podríamos destruir el diodo láser debido al calor generado en el mismo. Así que dejaremos un margen de seguridad y trabajaremos con una intensidad de aproximadamente 1.9A-2A. También es importante saber que a medida que el diodo aumenta su temperatura disminuye su resistencia interna, por esto se debe utilizar una fuente de alimentación que limite el paso de corriente hasta el diodo. Debido a esto último no se puede usar una alimentación directa desde la línea de 12 voltios de la fuente ATX, se necesitará diseñar un circuito de alimentación.

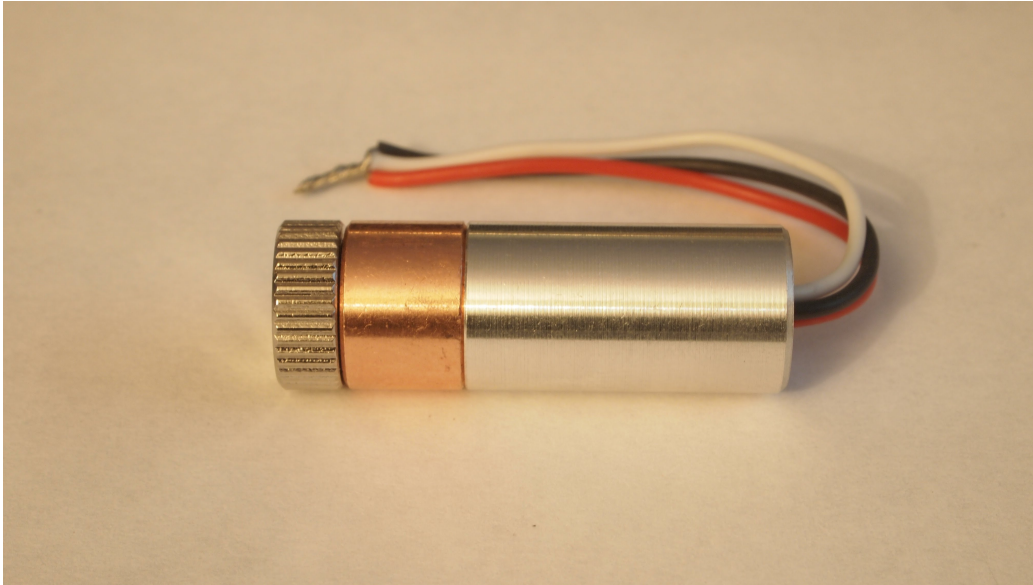


Figura 3.5: Diodo con su cubierta y lente colimadora.

3.2.3. Fuente de alimentación del diodo láser

Para alimentar el diodo láser es necesario hacerlo con una fuente que limite la corriente que llega al diodo. Para las pruebas y las etapas iniciales del desarrollo se utilizó una fuente de alimentación de laboratorio. Obviamente no es posible utilizar este tipo de fuente en el prototipo. Para el prototipo se optó por realizar una fuente de alimentación con reguladores de tensión como el archiconocido LM317. Este tipo de dispositivos están pensados para mantener un nivel de tensión constante. Son muy utilizados en las fuentes de alimentación de computadoras para conseguir una tensión fija independientemente de la carga que utilicen los elementos.

En la figura 3.6 se puede ver la configuración típica de un LM317 actuando como regulador de tensión, pero como se ha visto anteriormente, necesitamos limitar la corriente con la que el diodo láser va a trabajar. Para ello usaremos otra configuración de los reguladores de tensión. En nuestra configuración conectaremos la carga al terminal de ajuste en vez de al pin de salida (V_{OUT}). De esta manera lo que se consigue es que el regulador de tensión mantenga una corriente constante circulando por la resistencia R1, obteniendo una limitación de corriente dependiente del valor de la resistencia(Figura 3.7).

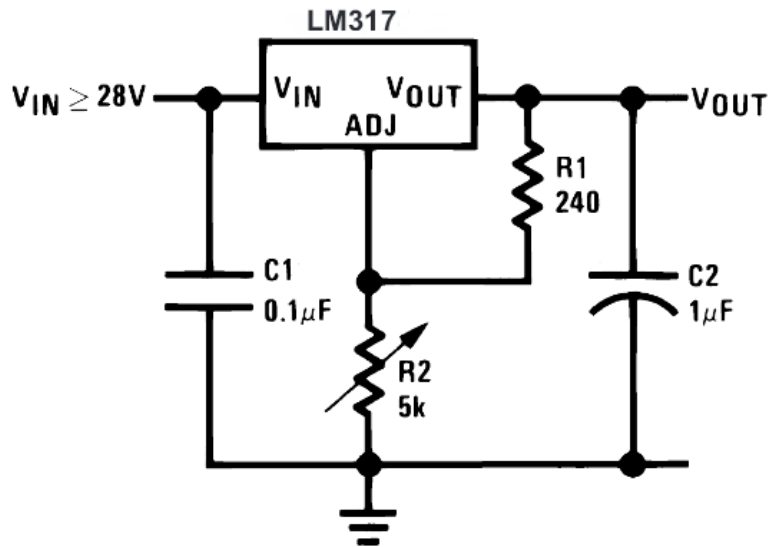


Figura 3.6: LM317 como regulador de tensión.

$$I_{OUT} = 1,25/R1 \quad (3.1)$$

Para obtener el valor de la resistencia a utilizar conociendo el valor límite de la intensidad se aplica la ecuación 3.1. Como la intensidad de trabajo del diodo es un valor conocido, 2 amperios, se debería usar una resistencia de $0,625\Omega$. Si miramos la hoja de características del LM317 vemos que la intensidad máxima de salida es de 1,5 amperios. Así que no podemos hacer el diseño con este dispositivo. Sin embargo podemos usar a "su hermano mayor" el LM350 que tiene unas especificaciones mejores y tiene una intensidad de salida máxima de 3 amperios.

Sin embargo, en los test iniciales se pudo comprobar que, incluso con un disipador térmico acoplado, se calentaban demasiado así que se decidió que usar dos LM350 en paralelo configurados con una limitación de intensidad de salida de 1A es decir $R1 = 1,25\Omega$. De esta manera el estrés producido en cada uno de ellos es menor y conseguimos una limitación de corriente de efectivamente 2A.

Hay que tener en cuenta a la hora de realizar el diseño que las resistencias que están en serie en la salida soportarán cierta intensidad, por lo que se deben elegir resistencias de potencia acorde a esto. Además por seguridad hemos dejado un margen y no hemos llegado a los 2 amperios de salida, he-

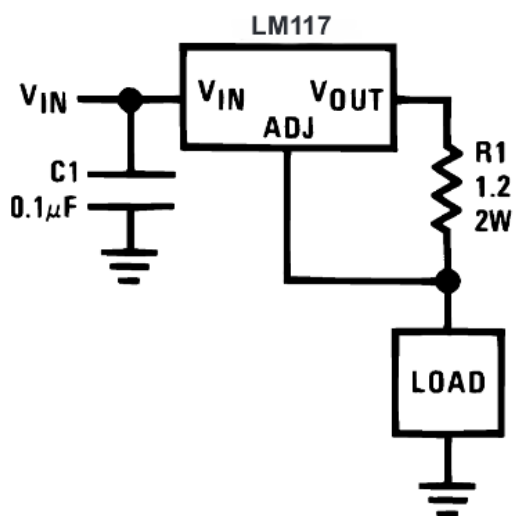


Figura 3.7: LM117 como limitador de corriente.

mos utilizado resistencias de 1,35 Ω que nos darán una salida en cada LM350 de 0,925A, en total entre los dos 1,85A. Podemos verlo en la figura 3.8.

Se puede observar en la figura 3.8 que los 12V que alimentan los reguladores LM350 utilizan una modulación de ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation), esto es así ya que la intención es utilizar esta señal PWM para modular la salida del láser y cambiar su corriente dependiendo de la intensidad con la que queramos grabar el material con el láser. Esta salida PWM en particular es de 8 bits con lo que en teoría permitiría 255 niveles de intensidad y apagado. El ancho de pulso se controlará mediante las instrucciones en código G que lleguen al microcontrolador Atmega 2560. En concreto la instrucción "M106 SXXX" donde XXX será un valor entre 0 y 255.

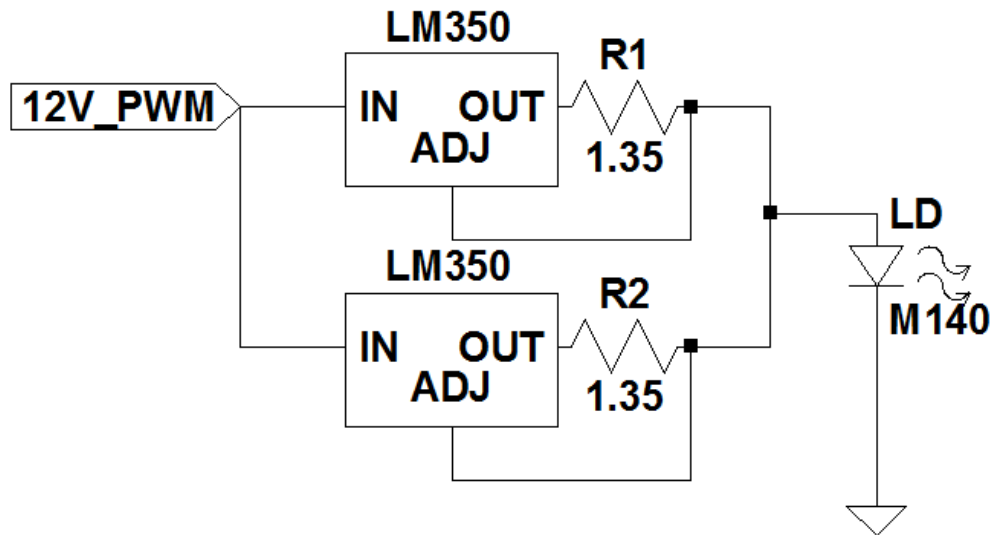


Figura 3.8: Fuente de corriente limitada con LM350.

3.2.4. Dispositivo Peltier

El efecto Peltier consiste en hacer pasar una corriente por un circuito compuesto por uniones de semiconductores que dispuestos de una determinada manera producen un efecto inverso al Seebeck, el conocido como efecto termoeléctrico. En este caso lo que se observa es que se absorbe el calor en una unión y se desprende en la otra, lo que produce en el dispositivo Peltier una parte fría y otra parte caliente que los hace muy útiles para enfriar dispositivos electrónicos u otros elementos que requieran refrigeración. Debido a las temperaturas que alcanzan en su parte fría hay que tener cuidado, ya que en determinadas condiciones de trabajo pueden producir condensación e incluso hielo. De igual manera todo el calor que se elimina de la parte fría se produce en la parte caliente, con lo que es necesario eliminar el calor con otros medios, un disipador de aluminio y un ventilador de ordenador por ejemplo.

Este dispositivo Peltier será utilizado para mantener el bloque del diodo láser a una temperatura de funcionamiento correcta. Esto garantizará que no se produzcan daños en el propio diodo y que además no se produzcan grandes cambios en la potencia de salida ya que ésta depende de la temperatura de operación.

La parte fría del dispositivo Peltier estará en contacto con el bloque que

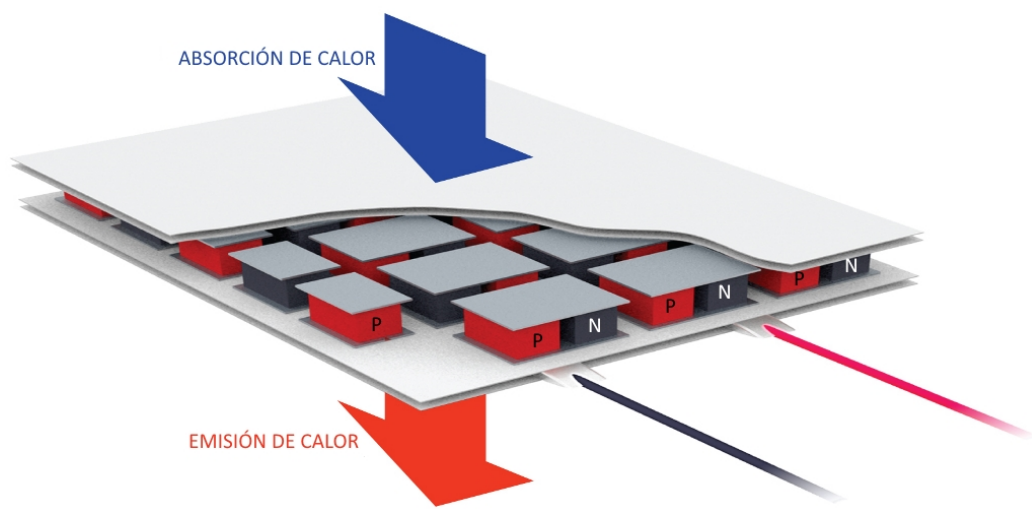


Figura 3.9: Representación de dispositivo Peltier

aloja al diodo láser para mantenerlo a una temperatura de trabajo adecuada, y la parte caliente tendrá un disipador de aletas de aluminio con un ventilador acoplado para eliminar el calor que se produzca. El control del encendido y apagado del dispositivo se realizará con un sistema de adquisición de temperatura mediante un termistor (NTC) acoplado al encapsulado del diodo láser.

El dispositivo Peltier concreto será un TEC12706 de 40W, esto quiere decir que alimentada con 12V pasarán por ella 3.4A aproximadamente.

3.2.5. Adquisición de la temperatura del diodo.

Debido a que un aumento sin controlar en la temperatura del diodo podría significar su destrucción, se va a realizar el control de temperatura de manera analógica, esto es sin que pase por el microcontrolador, para evitar que por un fallo del firmware o un "cuelgue" se pueda estropear una de las partes más caras del proyecto, el diodo láser. Para ello se utilizará un circuito formado por un amplificador de instrumentación que mediante un puente de resistencias con termistor obtendrá la temperatura en el rango que nosotros ajustemos. Después usaremos la salida de este sistema para que un amplificador comparador apague y encienda el dispositivo Peltier actuando sobre un transistor MOSFET (Metal Oxide Semi-Conductor Field Effect Transistor) del tipo N.

La adquisición de la temperatura en el diodo se realizará mediante un termistor en contacto con el encapsulado del diodo. En concreto el termistor será del tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) con una resistencia de $100k\Omega$ a temperatura ambiente, 25°C .

Resumen del diseño

Los requisitos del diseño para la adquisición de temperatura son los siguientes:

- Voltajes de alimentacion: $+12\text{ V}$, $+5\text{ V}$.
- Voltajes de referencia: $+5\text{ V}$.

Objetivos del diseño de adquisición de temperatura:

	Objetivo	Simulado	Medido
V_{out} @ 10°C	0V	0.087V	-
V_{out} @ 40°C	5V	5.134V	-

La figura 3.10 muestra la configuración típica de un amplificador de instrumentación (AI) con un puente resistivo, en el cual los dos divisores de corriente se denominan soportes del puente[10]. El AI amplifica la diferencia de señal entre su entrada positiva y negativa según su ganancia. Esta ganancia se configura mediante una resistencia entre dos de sus terminales. En esta configuración se deberán calcular los valores de las resistencias de cada soporte del puente dependiendo de nuestros requisitos de salida. Como vemos una de las resistencias del puente es el termistor, de esta manera al variar la temperatura irá variando la salida del AI, ya que su entrada positiva

variara mientras que la negativa permanecerá fija.

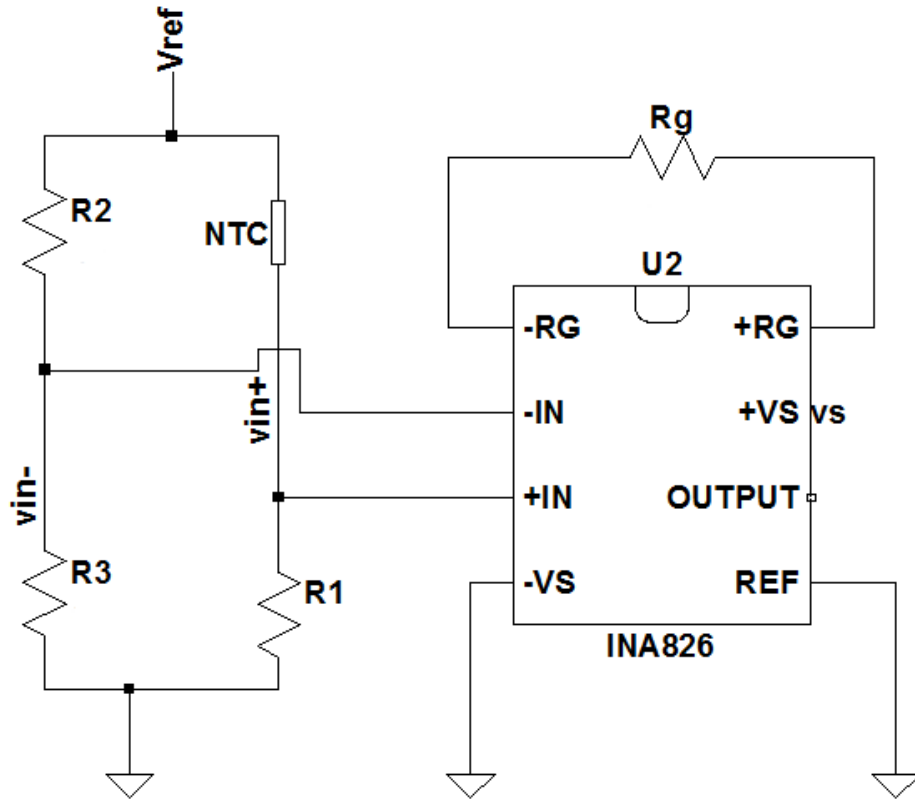


Figura 3.10: Adquisición de temperatura con INA826 y NTC

Si las dos entradas son iguales, en un amplificador ideal, su salida sería 0. En general la salida de un amplificador estará dada por la ecuación 3.2.

$$V_{OUT} = G(V_{IN+} - V_{IN-}) \quad (3.2)$$

Siendo G , la ganancia del amplificador, que vendrá dada por una ecuación dependiente de la resistencia de ganancia R_g . Esa ecuación será diferente según el modelo de amplificador operacional que se use.

La salida de este amplificador se utilizará como entrada para el circuito que gestiona el encendido y apagado del dispositivo Peltier.

Proceso de diseño

Ya sabemos que nuestro objetivo es controlar que la temperatura no llegue a un punto en el que se puedan producir daños en el diodo. Además no queremos disminuir demasiado la temperatura ya que podría producirse condensación, y podría producir daños en la electrónica. Entonces intentaremos mantener la temperatura entre los 20°C y los 25°C ya que es una temperatura de trabajo adecuada para el diodo y no se producirá condensación. Se sigue el siguiente procedimiento:

- Usaremos el amplificador INA826 de Texas Instruments, ya que nos permite trabajar con un rango amplio de fuentes de alimentación y tiene muy poco consumo.
- Elegimos nuestro termistor (NTC), en nuestro caso un NJ28 el cual tiene una resistencia a temperatura ambiente $R_0=100k$ @ 25°C y tiene una temperatura característica del material $\beta=4390K$
- Calculamos la resistencia de la NTC a 10°C y 40°C R_{10C} y R_{40C} con la ecuación 3.3:

$$R_T = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (3.3)$$

- $R_{10C} = 218,32k\Omega$ y $R_{40C} = 49,36k\Omega$.

Siguiendo la notación de las resistencias de la figura 3.6:

Para $T=10^\circ C$ haremos que $V_{OUT} = 0$ con lo que $V_{IN+} = V_{IN-}$:

- Si $V_{IN+} = 5(\frac{R_1}{218,32k\Omega + R_1}) = 5(\frac{76k\Omega}{218,32k\Omega + 76k\Omega}) = 1,29V$.
El valor de $R_1=76k\Omega$ es arbitrario, para que $V_{IN+} = V_{IN-}$ ajustaremos las resistencias del otro soporte.
- Si $V_{IN-} = 5(\frac{R_3}{R_2 + R_3}) = 5(\frac{59k\Omega}{R_2 + 59k\Omega}) = V_{IN+}$ con $R_3 = 59k\Omega$ tendremos $R_2 = 169,7k\Omega$
El valor de $R_3 = 59k\Omega$ es arbitrario, mantenemos la relación de resistencias con el valor de R_2 .

Para $T=40^\circ C$ debemos tener $V_{OUT} = 5$. Como ya hemos dicho, la salida del amplificador se da en función de la diferencia que haya entre sus dos entradas según la ecuación 3.2. Así que:

- $V_{IN+} = 5\frac{76k\Omega}{49,36k\Omega + 76k\Omega} = 3,04V$

- $V_{IN-} = 1,29V$ Constante
- $V_{OUT} = G(V_{IN+} - V_{IN-})$ y siendo $G = 1 + (\frac{49,4k\Omega}{R_g})$
- $5 = [1 + (\frac{49,4k\Omega}{R_g})][3,04V - 1,29V]$ con lo que: $R_g = 26,6k\Omega$

Con el diseño de este circuito ya dispondríamos de una manera segura de obtener la temperatura del bloque del diodo. Podemos ver el resultado en la figura 3.11

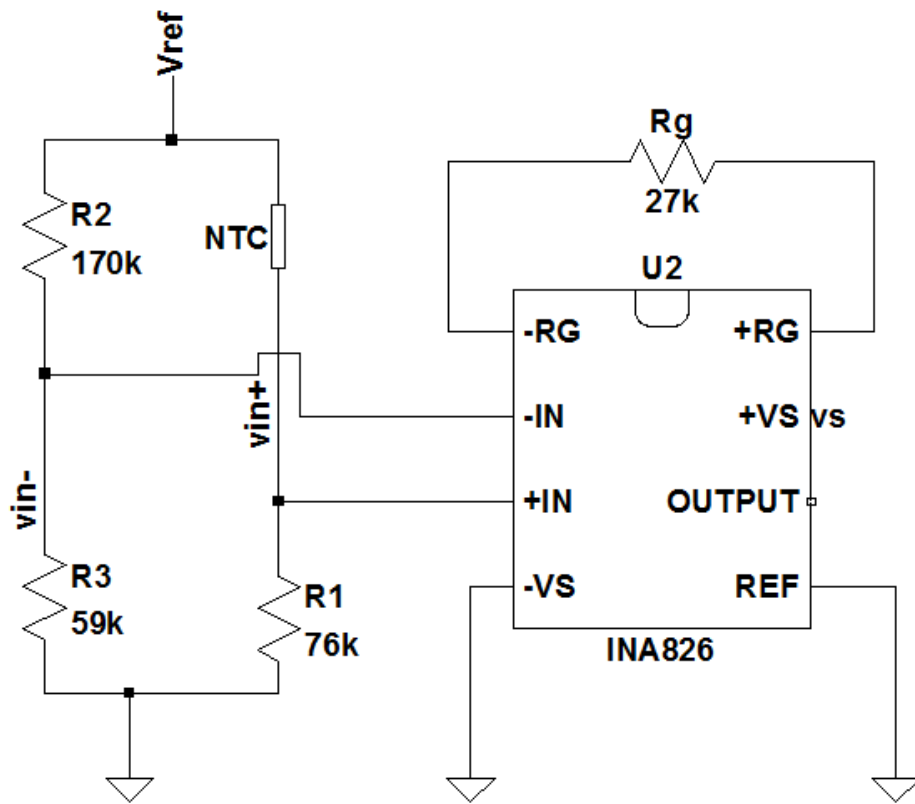


Figura 3.11: Adquisición de temperatura con INA826 y NTC resultante

Ahora debemos ingeniar otro circuito que según la salida del amplificador active el dispositivo Peltier.

3.2.6. Refrigeración con el dispositivo Peltier

Resumen del diseño

La salida del circuito de adquisición de temperatura actuará sobre un amplificador comparador diferencial que activará o desactivará el dispositivo Peltier según la temperatura a la que se encuentre. En este amplificador comparador hemos insertado un ciclo de histéresis para que no se produzca tableteo, es decir, que no se produzca una sucesión de cambios rápidos de encendido y apagado. Haciendo esto evitamos daños en el dispositivo Peltier y comportamientos erráticos.

Objetivos del diseño del comparador con histéresis:

	Objetivo	Simulado	Medido
V_{th} @ 25°C	2.5V	2.53V	-
V_{tl} @ 20°C	1.7V	1.83V	-

Este circuito estará compuesto por un amplificador comparador con realimentación positiva, de manera que se comporte como un *disparador de Schmitt*.

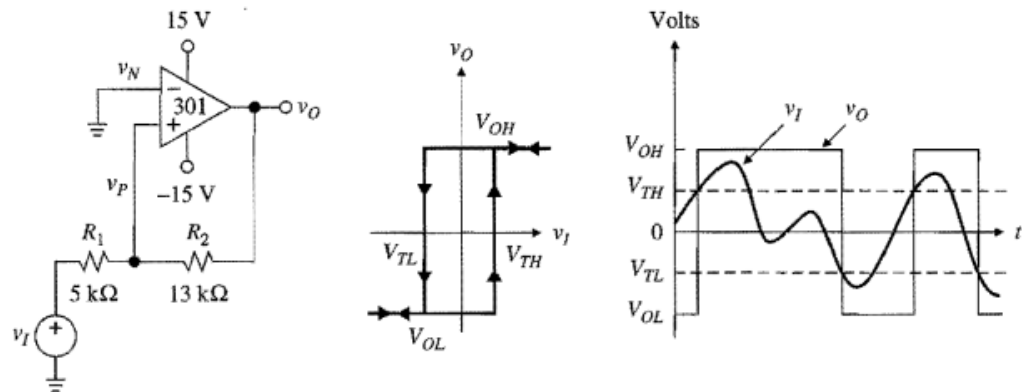


Figura 3.12: Circuito ejemplo de un disparador de Schmitt, VTC y respuesta a una señal.[10]

En la figura 3.12 podemos ver un disparador de Schmitt en configuración no inversora, con fuente de alimentación simétrica. Como se ve en la figura tiene dos umbrales de disparo, V_{th} el voltaje umbral superior y V_{tl} voltaje umbral inferior. Cuando la salida del comparador se encuentra en V_{OL} o en V_{OH} , que son los voltajes de salida inferior y superior respectivamente, en la entrada positiva tendremos por superposición para un mismo V_{In} un voltaje V_P distinto en cada caso. De esta manera se consigue que el V_{In}

necesario para que el disparador de Schmitt bascule dependa de la salida en ese momento, consiguiendo así un ciclo de histéresis.

Proceso de diseño

Como se ha visto anteriormente, la temperatura de funcionamiento del diodo láser está entre los 0 y los 35 grados Celsius. Así que el objetivo consiste en mantener la temperatura estable siempre por debajo de ese límite. Con este fin se ha decidido utilizar un circuito basado en el conocido disparador de Schmitt. Este tipo de circuito es un tipo especial de circuito comparador, el cual tiene una red de realimentación positiva de manera que disponga de dos umbrales de disparo. De esta manera se elimina el tableteo que se pueda producir por una señal de entrada ligeramente inestable o por el ruido presente a la entrada.

- Se usará el comparador diferencial LM2903 de Texas Instruments, ya que su versatilidad en la alimentación y su pequeño tiempo de respuesta lo hacen ideal para esta aplicación. Se debe tener en cuenta que se trata de un comparador de colector abierto, lo que quiere decir que su salida debe ser conectada a V_{cc} con una resistencia de *pull-up*.
- Ya que se usará el amplificador comparador con alimentación simple, se debe desplazar la VTC, para ello se añadirá un puente resistivo en la entrada negativa. Se tendrá que $V_{OL} = 0$ y los valores umbral no estarán centrados en 0V, si no en V_N , que es el valor presente en la entrada negativa del comparador (Figura 3.13).
- Ahora se deben decidir las temperaturas umbral y se calculará su equivalente en voltios. Para asegurar que el diodo nunca alcance los 35°C, el umbral superior se fija en 25°C y el umbral inferior en 20°C. Para estas temperaturas se calculan un voltaje umbral superior $V_{th} = 2,5V$ y un voltaje umbral inferior $V_{tl} = 1,7V$.
- Si se considera $R_5 \ll R_4 + R_3$ para calcular los valores de las resistencias podemos aplicar las ecuaciones 3.4 y 3.5.[10]

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{V_{th} - V_{tl}}{V_{cc}} \quad (3.4)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{cc} - V_{tl}}{V_{th}} \quad (3.5)$$

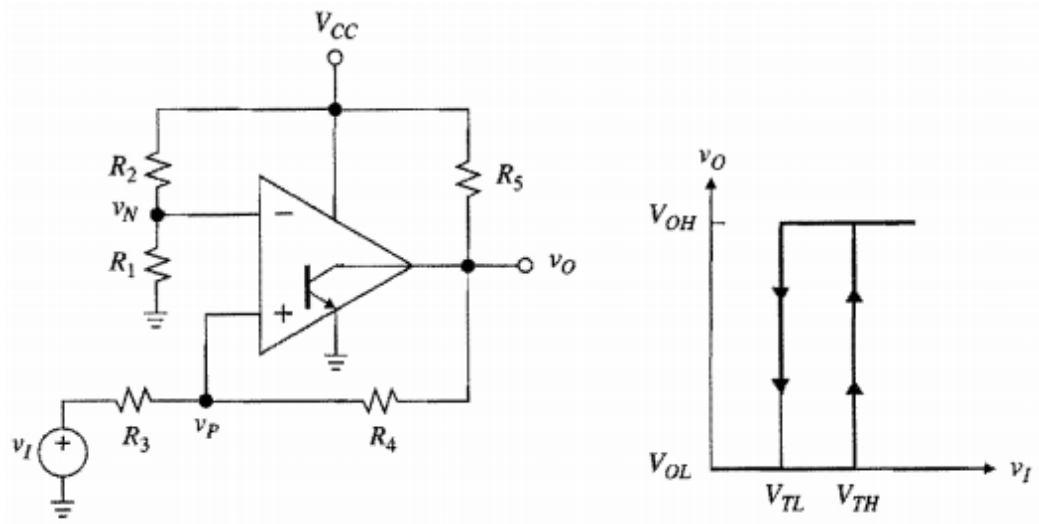


Figura 3.13: Disparador Schmitt no inversor con una sola fuente.[10]

Con lo que se obtendría $\frac{R_3}{R_4} = \frac{2,5-1,7}{5} = 0,36$ y $\frac{R_2}{R_1} = \frac{5-1,7}{2,5} = 1,32$ respectivamente para las dos ecuaciones anteriores. Fijando R_1 en $20k\Omega$ y R_4 en $100k\Omega$ resultará $R_3 = 36k\Omega$ y $R_2 = 26k\Omega$

- $R_5 = 4,3k\Omega$ tal y como aparece en las notas de aplicación de la hoja de características del LM2903 de Texas Instruments.

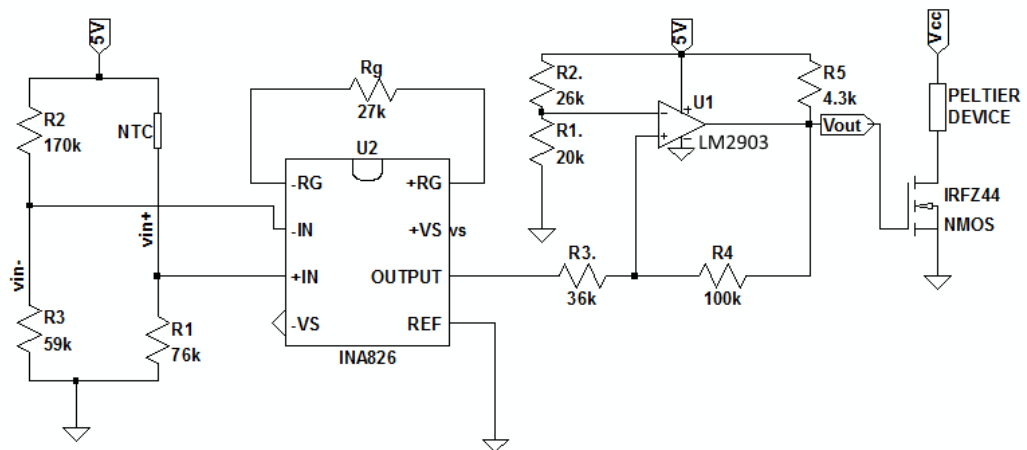


Figura 3.14: Circuito completo de adquisición de temperatura y control del dispositivo Peltier.

Después de todo este proceso de diseño se ha obtenido el circuito de la figura 3.14. Esa figura incluye el circuito de adquisición de temperatura con INA826, el circuito del comparador LM2903, el dispositivo Peltier y el transistor MOSFET IRFZ44.

3.2.7. Motores

Una parte fundamental del proyecto es el sistema de movimiento, ya que de él depende la precisión con la que se realice el trabajo. El uso de los motores paso a paso está muy extendido en el mundo industrial y el mundo del hobby. Bien sea para controlar el movimiento de brazos robóticos o para controlar el movimiento de las máquinas de mecanizado bien a nivel profesional o a nivel particular. Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que dividen una rotación completa en un número de pasos del mismo tamaño. El motor puede ser controlado para que se mueva a una posición y se mantenga en ella sin necesidad de realimentación, siempre y cuando el motor sea capaz de realizar el giro sin problema y no "se salte" ningún paso. Para que no se pierda ningún paso es necesario usar motores de potencia adecuada a la aplicación.

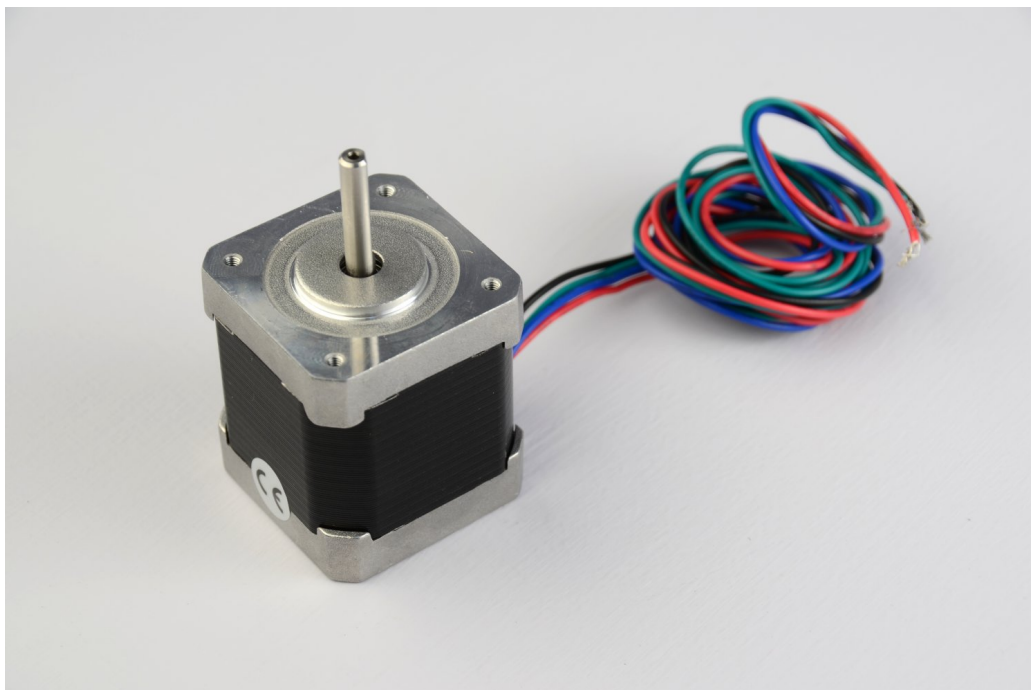


Figura 3.15: Motor NEMA17

En este caso se utilizarán los motores NEMA17, figura 3.15. Se trata de motores paso a paso bipolares, con un ángulo de paso de 1.8° , es decir, 200 pasos por vuelta. Cada bobina es capaz de soportar 1.2A y tiene un par motor de 3.2Kg/cm. Sus bobinas tienen una resistencia de 3.3Ω cada una y tiene un peso total de 350 gramos.

Dos de estos motores serán usados para mover el eje X de la estructura ya que es el eje en el que más fuerza se debe ejercer, uno para mover el eje Y que va montado en el carro y por último uno para mover el eje Z. En el caso de que la máquina se este usando con el láser, el eje Z no estará en uso. Por tanto el eje Z no se usará habitualmente. Los motores del eje X deben girar en direcciones opuestas y habra que tenerlo en consideración cuando se conecten al controlador.

Los motores paso a paso no se pueden controlar mediante una corriente continua, necesitan controlarse mediante señales de de dirección y paso, que un controlador transformará en corrientes que pasarán por sus bobinas.

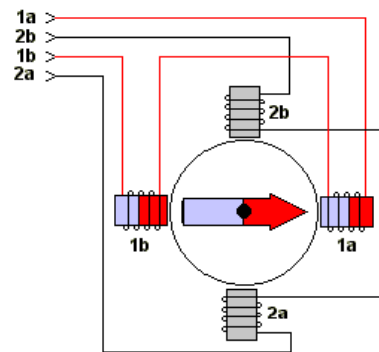


Figura 3.16: Modelo conceptual de un motor paso a paso bipolar

3.2.8. Controladores de los motores

Los motores paso a paso necesitan de un controlador. Este controlador se encarga de traducir las señales de paso (step) y dirección (dir) con las que el microcontrolador actúa sobre ellos. Estas señales de paso y dirección se transforman en corrientes que atraviesan los bobinados del motor, y producirán el movimiento de rotación. Según el tipo de controlador que se utilice podrá tener la función de subdividir los pasos (micro-stepping). El micro-stepping permite al controlador subdividir el paso según la configuración en sus entradas de MODE0, MODE1 y MODE2. Se puede observar la forma de onda de ambos bobinados usando micro-stepping en la figura 3.17.

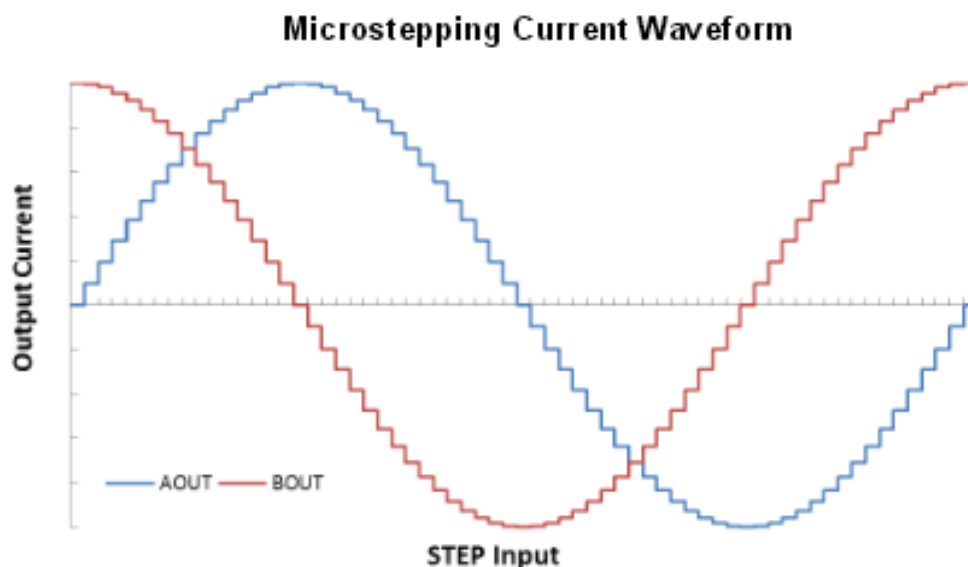


Figura 3.17: Micro-stepping en DRV8255

En este caso se va a utilizar un chip controlador DRV8255 de Texas Instruments para motores paso a paso bipolares. Este DRV8255 tiene un rango de alimentación muy amplio, de 8.2 a 45 voltios, además puede entregar hasta 2.5A en cada bobina. Estas características y la función de micro-stepping de hasta 1/32 lo hacen ideal para esta aplicación. En la figura 3.18 se puede observar un esquema simplificado del controlador DRV8255. Estos controladores van montados en placas diseñadas por *Pololu*.

En la figura 3.18 las líneas de entrada "Step Size", tamaño de paso, co-

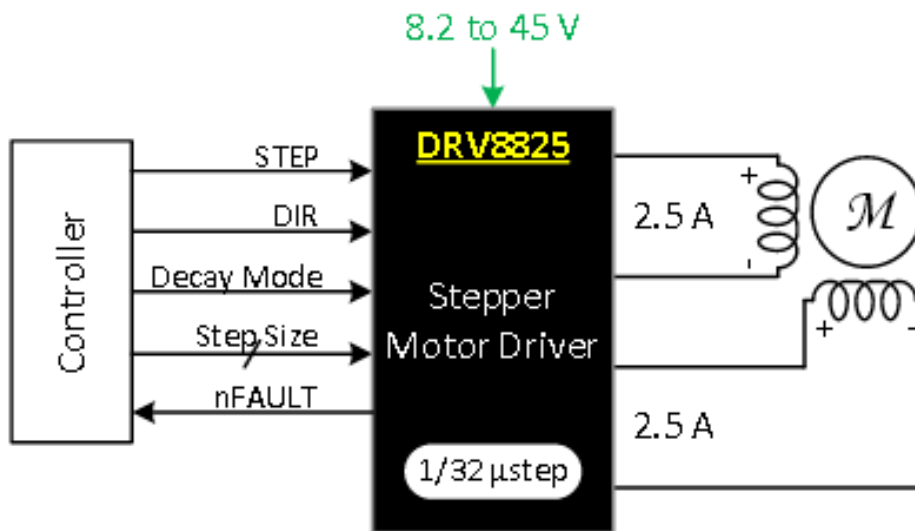


Figura 3.18: Esquema simplificado del controlador DRV8255

responden a las líneas MODE0, 1 y 2 comentadas anteriormente. Son las líneas de entrada con las que se configura el micro-stepping del controlador. la señal DIR le dice al controlador hacia que lado debe girar el motor, y la línea de step le indica cada vez que debe realizar un paso. Estas dos señales provienen del microcontrolador que traducirá el código G en el que se encuentran las instrucciones de trabajo, en pequeños pulsos para realizar la tarea que corresponda.

3.2.9. Microcontrolador Atmega 2560 y RAMPS

Atmega 2560

Como se ha expuesto en la introducción uno de los objetivos es que este diseño sea fácilmente adaptable a una maquina de fresado y a una impresora 3D. Las impresoras 3D actuales que son *open-source* en su mayoría están controladas por una placa Arduino Mega con el microcontrolador Atmega 2560. Esta placa de desarrollo funciona a 16MHz, tiene 54 pines digitales de entrada y salida, 15 de ellos con funcionalidad PWM, 16 entradas analógicas y es compatible con multitud de "shields", placas que se superponen y aportan distintas funcionalidades.

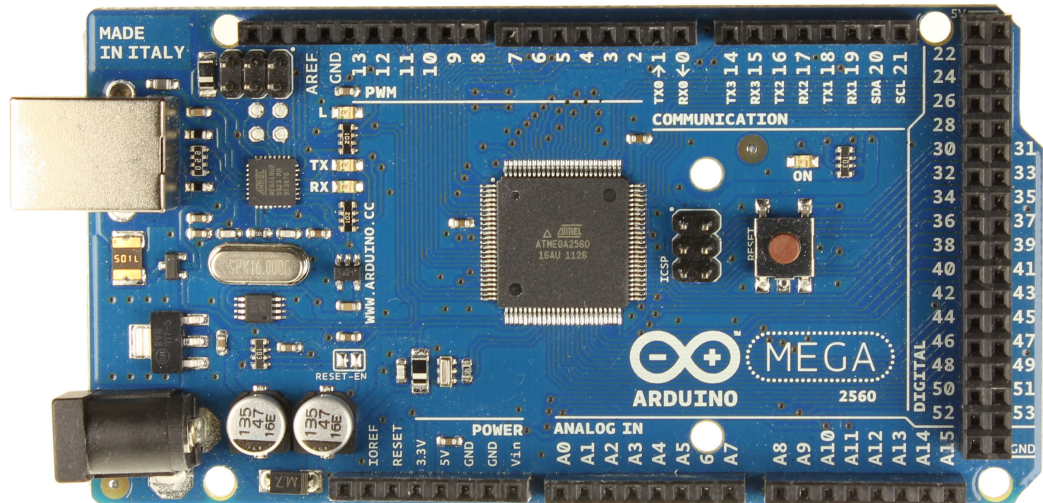


Figura 3.19: Placa de desarrollo Arduino Mega con microcontrolador Atmega2560

Ya que actualmente la presencia de las impresoras 3D a nivel particular y empresarial ha experimentado un crecimiento explosivo. Lo lógico es utilizar lo que se ha convertido en un *estándar de facto* para realizar el prototipo. Respecto a la conversión a una fresadora, el funcionamiento es similar al de cualquier otra maquina de este tipo y no se espera ningún problema para realizar la conversión.

Existen alternativas con otros controladores pero no disponen de una comunidad tan amplia o no son de código abierto.

RAMPS

RepRap Arduino Mega Pololu Shield, o RAMPS. Es un *shield* fabricado para Arduino Mega que está diseñado para albergar la electrónica necesaria para construir una impresora 3D. Se trata de un diseño totalmente libre, y que la comunidad se encarga de mejorar y mantener. RAMPS se encuentra a la venta en multitud de tiendas especializadas, pero los archivos de diseño están disponibles para que cualquiera pueda fabricarla por si mismo. En la figura 3.20 se puede observar una placa RAMPS.

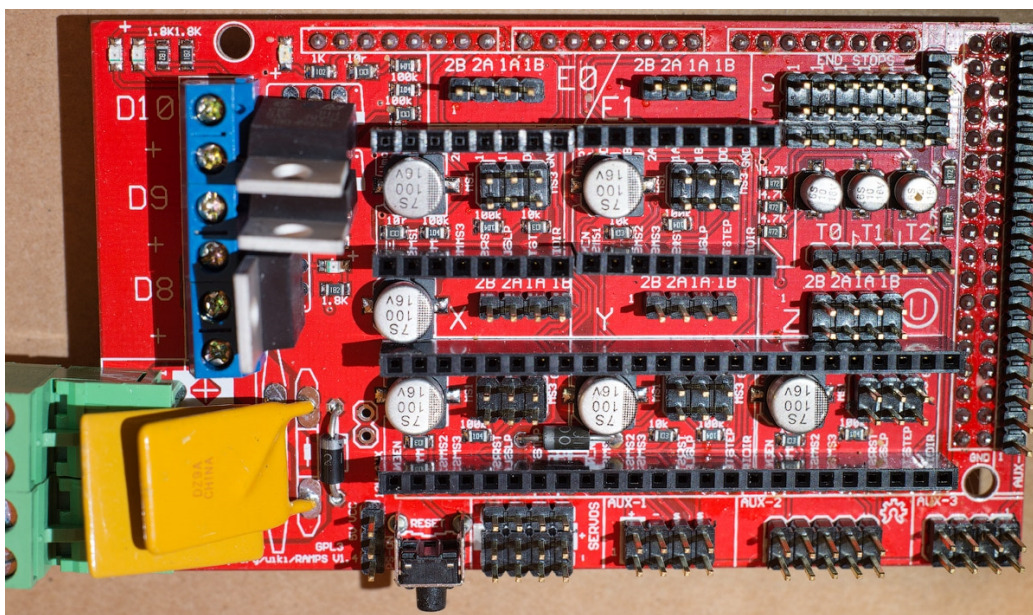


Figura 3.20: *Shield* RAMPS versión 1.4

Esta placa otorga al Arduino Mega facilidades para conectar: finales de carrera, termistores, calentadores para los filamentos, ventiladores, controladores de motores paso a paso, alimentación, servo motores y conectores auxiliares, estos últimos suelen usarse para conectar una pequeña pantalla LCD. A esta placa se conectará la fuente de alimentación, los controladores DRV8255 y se utilizará una de las salidas digitales con funcionalidad PWM para modular la intensidad del láser. En concreto se utilizará el pin D9, que es uno de los conectores azules que se puede ver a la izquierda en la figura 3.15. Para usarlo como tal se deberán realizar modificaciones en el firmware que se instalará en el Atmega 2560, estas modificaciones se explicarán más adelante.

Capítulo 4

Construcción

En este capítulo se explicará el proceso de construcción que se ha llevado a cabo durante el proyecto. Todo el proceso y el trabajo de montaje se ha llevado a cabo en el laboratorio *Smart Open Lab* de la Escuela Politécnica.

4.1. Montaje de la estructura

El montaje de la estructura fue una tarea no muy complicada pero que consumió mucho tiempo. Esto fue así ya que consta de multitud de perfiles de aluminio, conectores en las aristas que deben ser fijados en su posición mediante tornillos. Además durante la realización de esta tarea se encontraron problemas inesperados como que al estar fabricada casi en su totalidad de aluminio y usar herrajes y tornillos de acero o hierro, las roscas de la estructura se estropeaban con facilidad ya que estos dos metales son más duros que el aluminio. Se solucionó temporalmente usando en los anclajes en los que esto había ocurrido tornillos de nylon que quedaban fijados correctamente.

En este apartado también podemos incluir la realización de las piezas a medida que se han usado. Estas piezas serían: el soporte a medida para el bloque del diodo láser y la refrigeración, y las sujeciones para los finales de carrera que también sirven de separadores de los soportes del motor. Se incluyen los diseños de estas piezas en el apéndice A.

El ventilador del bloque del diodo cumple dos funciones: La principal es refrigerar el disipador de aluminio que se ha colocado a la cara caliente del dispositivo Peltier y su segunda función es que a través de la abertura diagonal que se encuentra debajo del disipador de aluminio se redirige el aire frente a la lente del diodo. Esto produce un movimiento de aire debajo del

láser que disminuye la velocidad con la que la lente del mismo se ensucia por efecto del humo.

Los soportes de los finales de carrera también cumplen una doble función, la primera es fijar los finales de carrera en una posición en la que sean activados por el movimiento de la maquina para indicarle que a llegado al final del recorrido del eje. La segunda función es reducir la fricción que sufrían las correas de tracción en la zona cercana al soporte del motor. Esta fricción existía porque dichas correas no se ajustaban perfectamente a su canalización y rozaban con las aristas del perfil de aluminio.

Para la realización de las piezas 3D se ha utilizado el software de modelado *Autodesk Inventor 2015* del que los estudiantes de la UEx tenemos licencia gratuita. Y se han impreso en 3D con filamento de ácido poliláctico (PLA)¹ utilizando una impresora 3D *Prusa i3*.

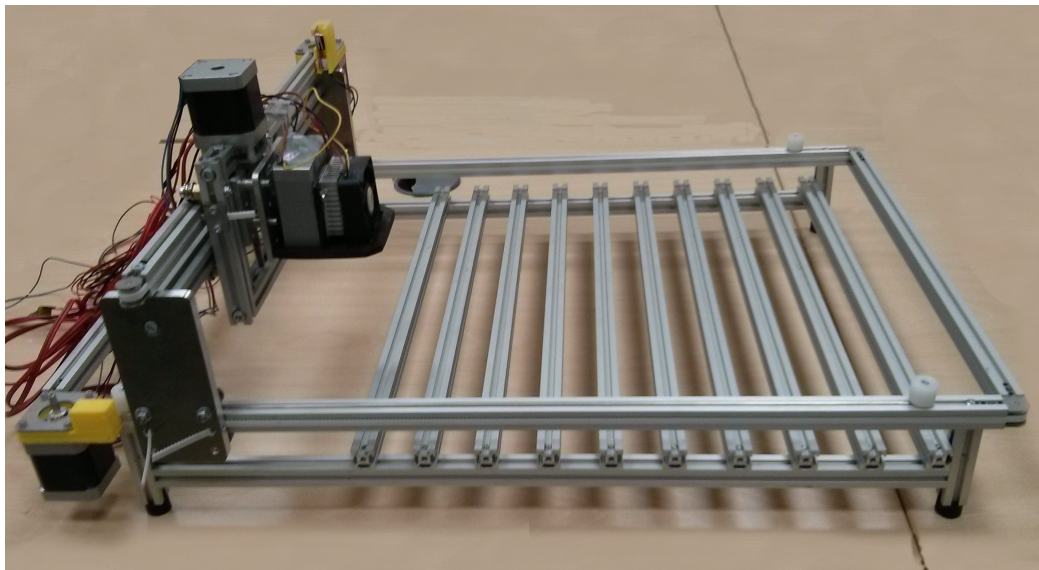


Figura 4.1: Estructura del prototipo y bloque láser montado

¹El PLA es un polímero termoplástico constituido por moléculas de ácido láctico con propiedades similares a las del tereftalato de polietileno(PET) que se utiliza para fabricar envases de alimentos. El PLA se obtiene del almidón de maíz, la caña de azúcar y es biodegradable

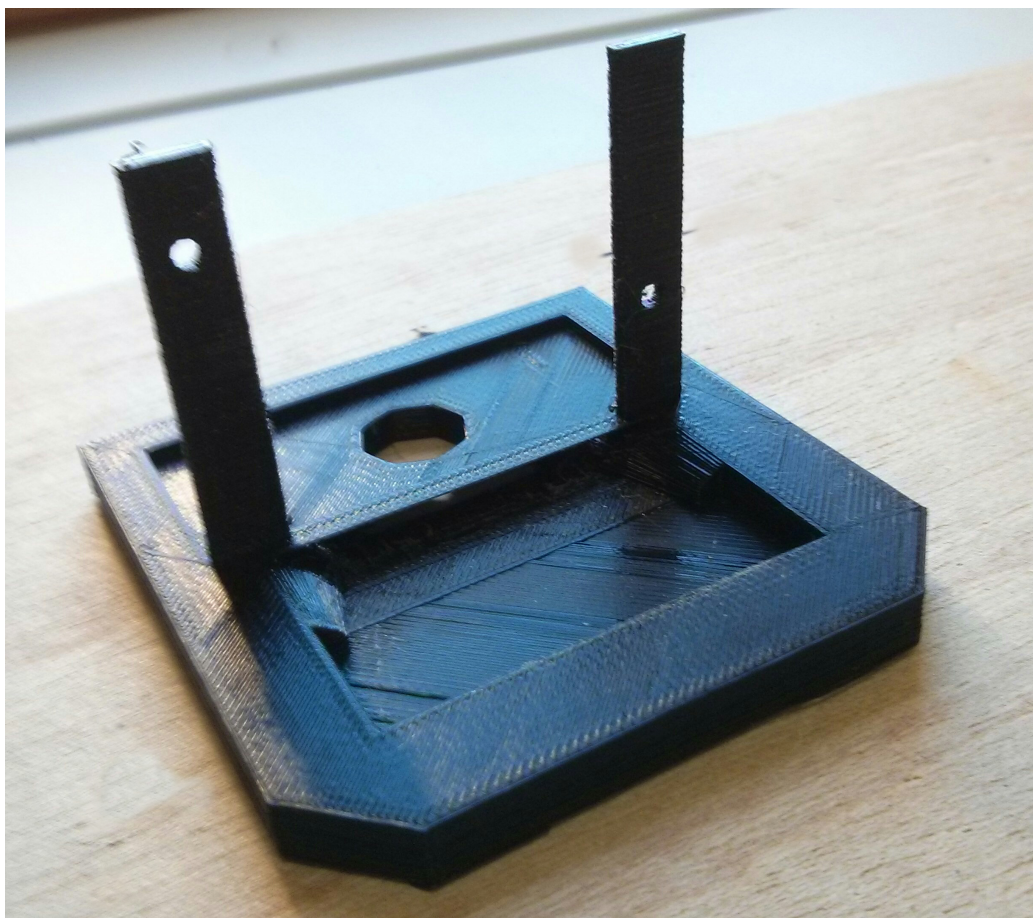


Figura 4.2: Detalle del soporte del bloque del láser

4.2. Montaje del bloque del diodo láser y su refrigeración

El bloque del diodo láser está formado por el diodo láser, su cubierta de cobre y latón, el bloque de aluminio en el que está alojado y la lente colimadora. El diodo láser se compró montado en su cubierta la cual tiene un diámetro de 12mm. La lente colimadora se ajusta y fija mediante un sistema de roscado por dentro de la cubierta del láser.

Junto con el láser se adquirió un disipador metálico que debía encajar con la cubierta del láser. Este disipador no se llegó a utilizar ya que el diámetro interior del mismo era demasiado grande y no se lograba un contacto uniforme con la cubierta del láser. Esta pieza se descartó y se diseñó el disipador de

aluminio que está actualmente montado el cual fue fabricado por José Mateos (IADEX) en el taller de Robolab ya que no se disponía del material necesario.

En contacto con el disipador de aluminio se encuentra la parte fría del dispositivo Peltier y en la parte caliente del mismo hay un disipador de aletas de aluminio y un ventilador de 40x40mm. Para mejorar el contacto y la transferencia de calor entre el aluminio y la placa Peltier se ha utilizado un compuesto de silicona térmica como la utilizada en el montaje de los procesadores de los computadores.

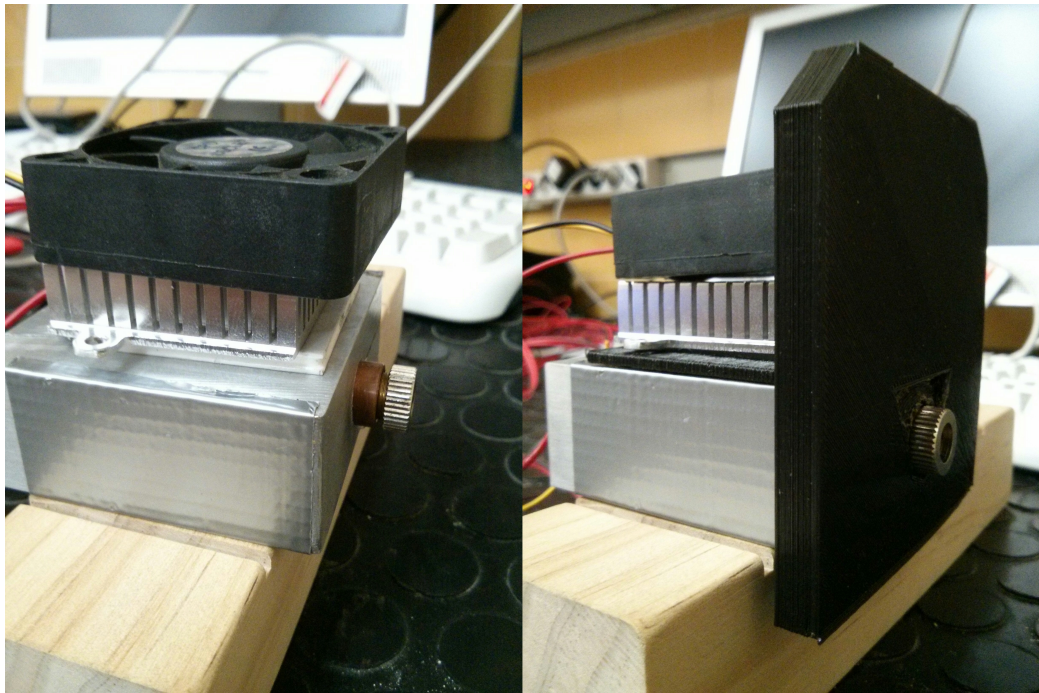


Figura 4.3: Bloque del láser con y sin soporte

4.3. Colocación de los motores paso a paso y montaje del sistema de transmisión de movimiento

Se han utilizado 4 motores paso a paso en total. Dos para el eje X, que están colocados en sus soportes utilizando tornillos M3 de 20mm. En estos soportes se han incrustado las piezas que alojan los finales de carrera actuando como separadores de los dos soportes del motor.

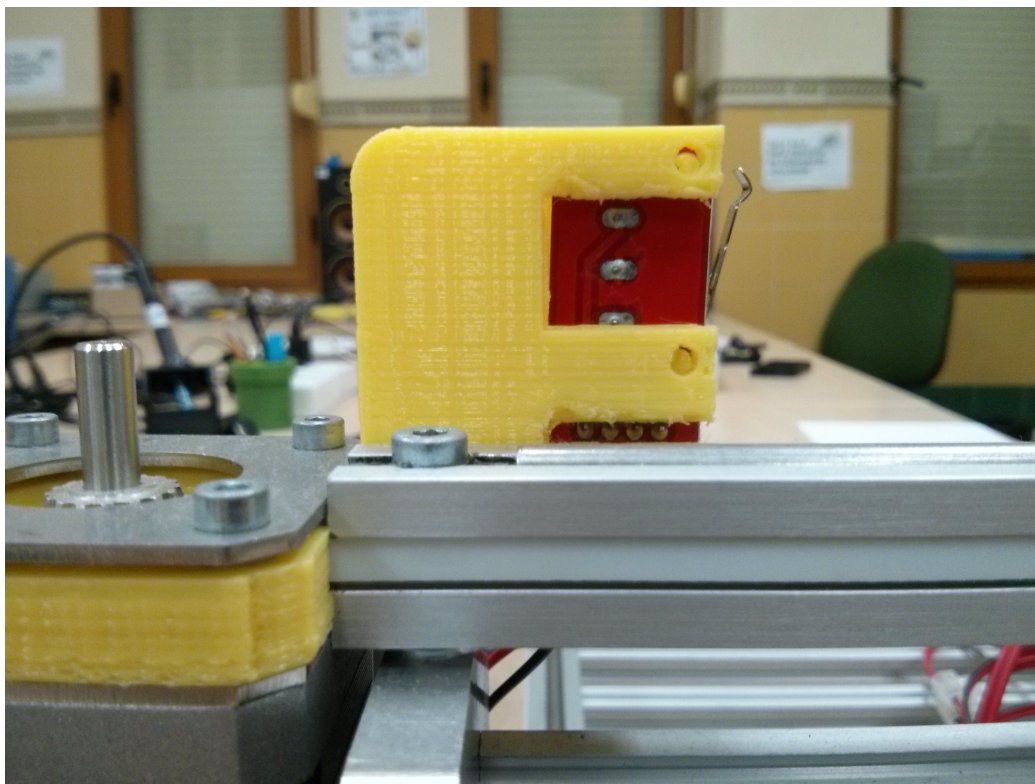


Figura 4.4: Montaje del motor con el separador/soporte del final de carrera

En el eje Y, sin embargo, sólo hay un motor que se ha instalado de manera similar a los del eje Y. El motor del eje Z sin embargo no utiliza este tipo de soportes y su eje está conectado a una varilla roscada que transmite el movimiento al soporte de la herramienta de trabajo, el bloque láser en nuestro caso.

La transmisión de movimiento se realiza mediante correas de transmisión

de poliuretano T2.5 de 5mm. de ancho y poleas dentadas colocadas en las varillas de los motores del eje X e Y. La tensión de las correas del eje X se consigue mediante unos orificios con un tornillo lateral en la sujeción del carro del eje Y. Y la tensión de las correas del eje Y se consigue mediante unas piezas atornilladas al soporte de la herramienta de trabajo. Como ya se ha explicado la transmisión de movimiento del eje Z se consigue mediante una varilla roscada de acero que actúa sobre el soporte de la herramienta.

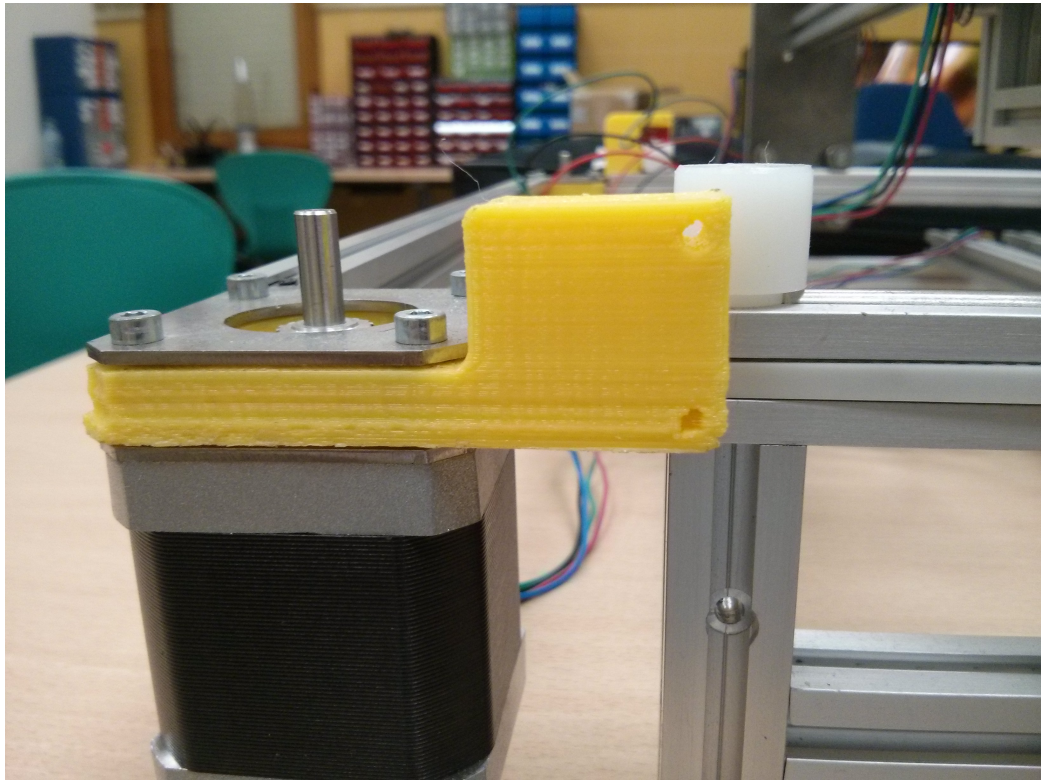


Figura 4.5: Montaje del motor con el separador

4.4. Diseño y fabricación de las placas de circuito impreso

Para el diseño de las placas de circuito impreso (PCB, *Printed Circuit Board*) se ha utilizado el software de diseño electrónico EAGLE en su versión 7.2.0. El proceso de diseño en EAGLE se puede dividir en las siguiente fases:

4.4.1. Añadir o crear los componentes en las librerías

En esta fase se deben añadir o crear los componentes que se vayan a utilizar en el diseño de la PCB. EAGLE cuenta con multitud de librerías y además existe una gran comunidad que pone a disposición pública librerías de diferentes fabricantes, distribuidores, etc... También es posible añadir nosotros mismos los componentes y en el caso de que sea un pequeño número ellos es incluso más rápido que buscar las librerías que los contengan. Para este proyecto se ha creado el componente del INA826, el del LM2903 y el de los reguladores de voltaje LM350. En el caso del IRFZ44 ya estaba incluido en una de las librerías que se uso en un proyecto anterior y no fue necesaria su creación. Para crear componentes en EAGLE se hace en tres pasos. El primer paso es crear el símbolo que tendrá en el esquema. El paso siguiente es crear su huella (footprint) es decir las dimensiones físicas que tiene el dispositivo en cuestión y sus zonas de soldadura, estas aparecerán al colocarlos en la PCB. El tercer y último paso es enlazar los terminales del símbolo a los terminales de su huella. Siguiendo estos pasos tendríamos el dispositivo listo para usarlo en nuestros proyectos.

4.4.2. Diseño del esquema

Después de crear los componentes se procede a pasar el circuito a un esquema para indicarle al programa cómo se conectan los dispositivos y componentes del circuito. Ya que anteriormente habíamos realizado las simulaciones de los circuitos con LTSPICE fue cuestión de trasladar los diseños que ya habíamos hecho a EAGLE. En esta fase no es necesario tener en cuenta la colocación de los componentes ya que no estamos diseñando la PCB todavía. Por ello pueden cruzarse cables y no hay que tener en cuenta la colocación de los dispositivos, es por ello que se denomina esquema. Lo que si difiere respecto a los esquemas que utilizamos en LTSPICE son las fuentes de ali-

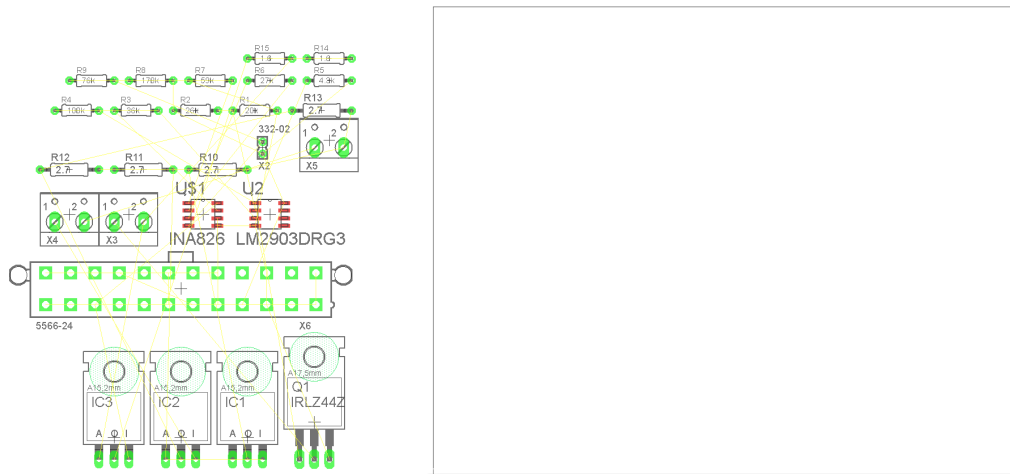


Figura 4.7: Inicio del diseño de la placa de circuito impreso

sobranter. Esto restringía al uso de un ancho de pista mayor y al aprovechamiento de solamente una de las caras de la placa. Por estos motivos se descartó finalmente el uso de componentes pasivos de montaje en superficie (SMD, *Surface Mounted Device*) y se usaron componentes pasivos de montaje en agujero pasante (THT, *Through-Hole Technology*). Con este tipo de componentes se relajan las restricciones del diseño ya que permiten usar la superficie que queda debajo de los mismos.

EAGLE cuenta con una herramienta de trazado automático de pistas que, siguiendo ciertos algoritmos y una serie de restricciones de diseño, es capaz de realizar esta tarea de manera autónoma. El problema es que EAGLE es un software de uso industrial y está pensado para el uso de varias capas de cobre. Es posible configurar que sólo use una, es trivial, pero no desempeña su labor correctamente. Por eso después de intentar usarlo con varias configuraciones en las restricciones de diseño, se decidió hacer el diseño manualmente. Se pueden ver los esquemas y el diseño de la PCB con detalle en el apéndice B.

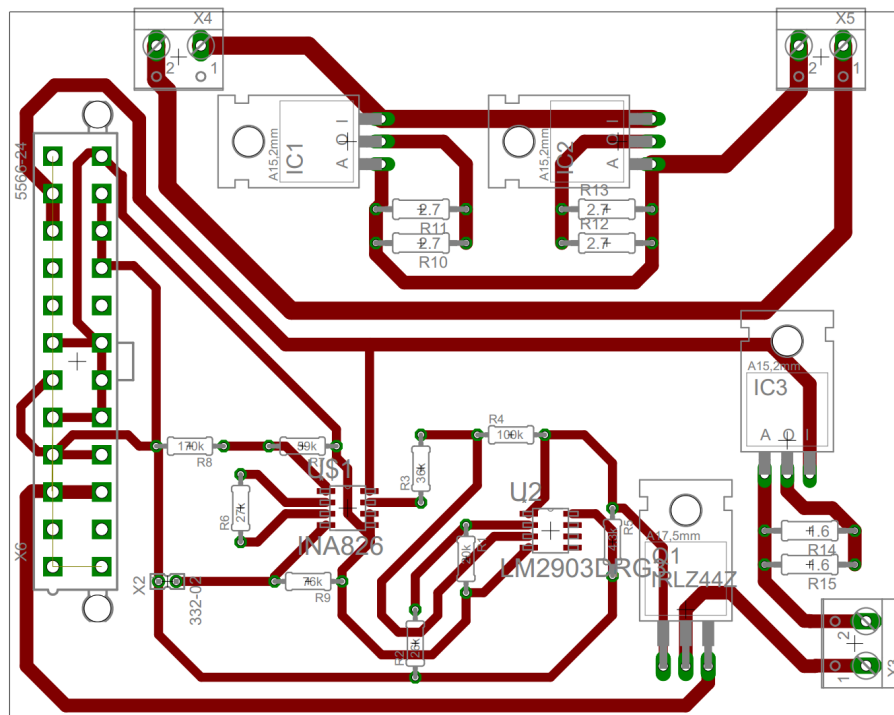


Figura 4.8: Diseño de la placa de circuito impreso

4.5. Fabricación y soldadura de la PCB

Para la fabricación de la PCB se ha utilizado una placa de cobre foto-sensible a la que se le ha superpuesto con una transparencia el diseño que hemos realizado de la placa. El diseño que hemos realizado de la placa solo deberá mostrar las capas de la misma que correspondan al cobre que debe quedar. Después se insola por esa cara para que se elimine el recubrimiento foto sensible que no está tapado por el diseño de la transparencia. Después se introduce en un ácido que reaccionará con el cobre que queda expuesto y lo eliminará de la placa.

Después de este proceso quedan en la placa las zonas de cobre que hemos puesto en la transparencia. Ya que se tuvo que hacer pistas de un ancho considerablemente grande hubo zonas en las que después del ácido no se terminaron de separar unas de otras. Así que fue necesario separarlas manualmente.

Como verificación se comprueba la continuidad en las pistas para que no haya ninguna que esté ligeramente cortada ya que una vez montada es difícil

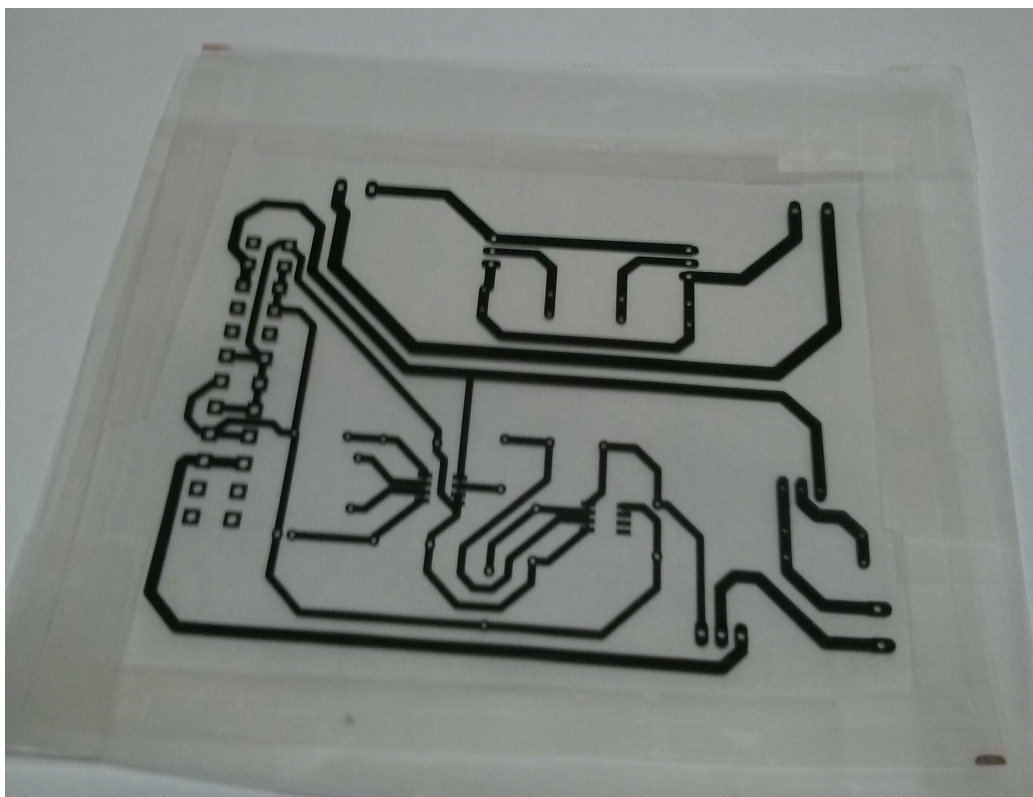


Figura 4.9: Placa de circuito impreso en transparencia

encontrar el error. Se encontraron dos de ellas que tenían arañazos en el cobre y se repararon con estaño y el soldador.

Después de comprobar que la placa de circuito impreso está correcta se procede a soldar los componentes en la misma.

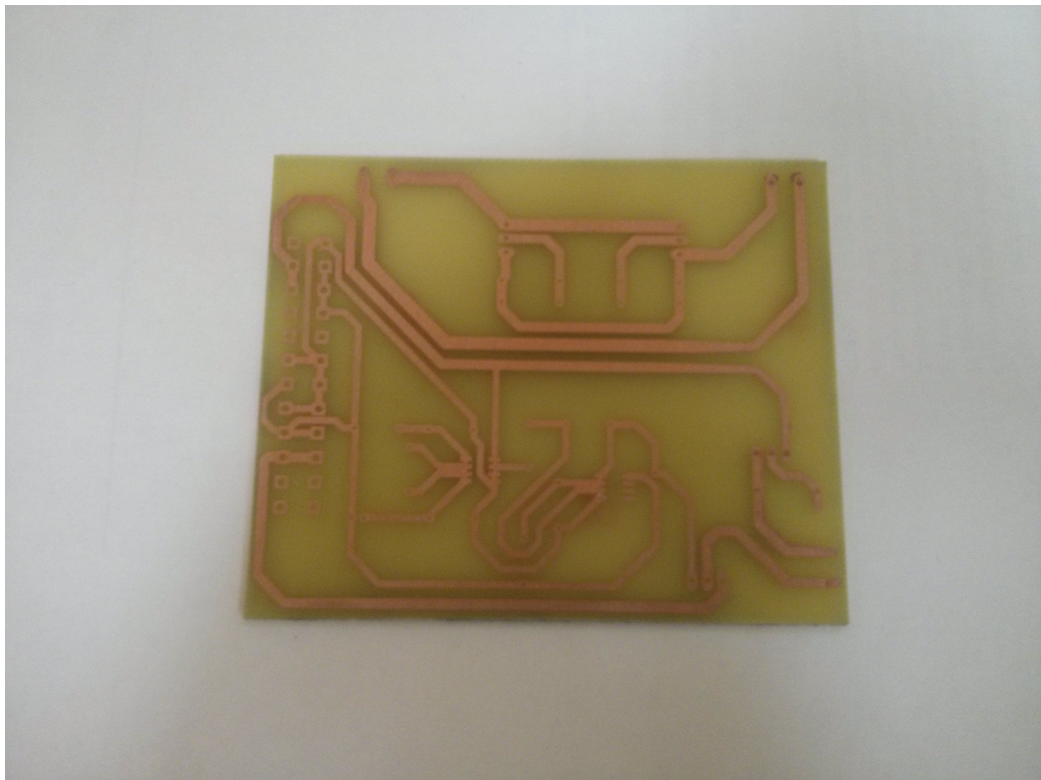


Figura 4.10: Placa de circuito impreso con pistas unidas

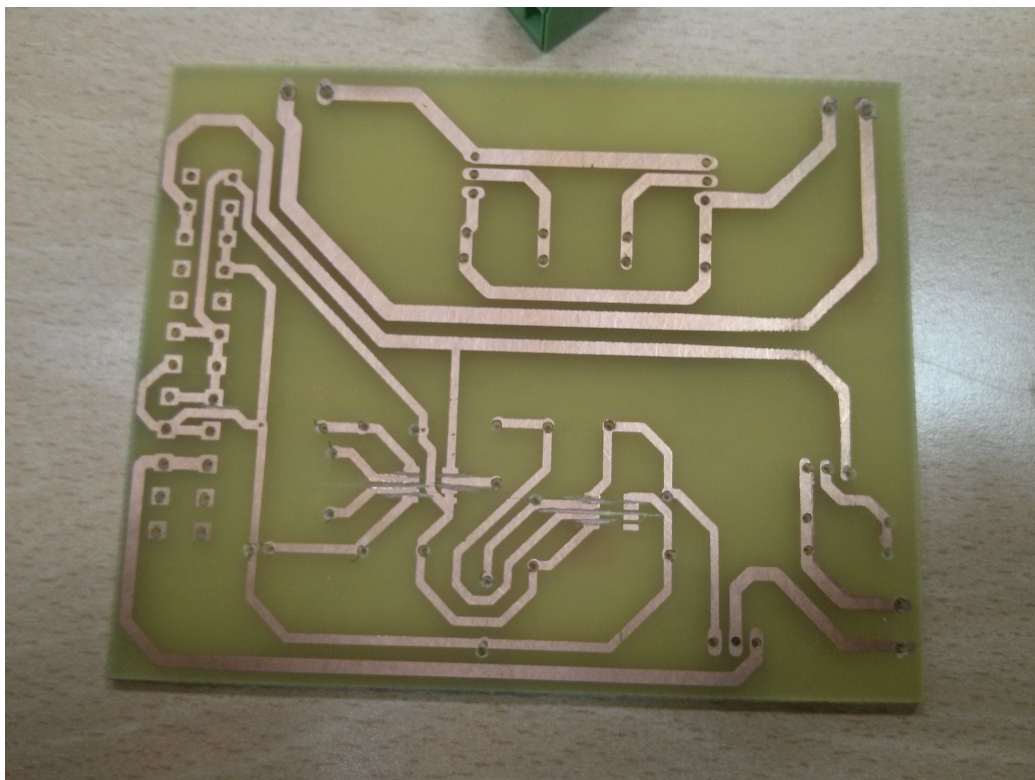


Figura 4.11: Placa de circuito impreso con pistas separadas

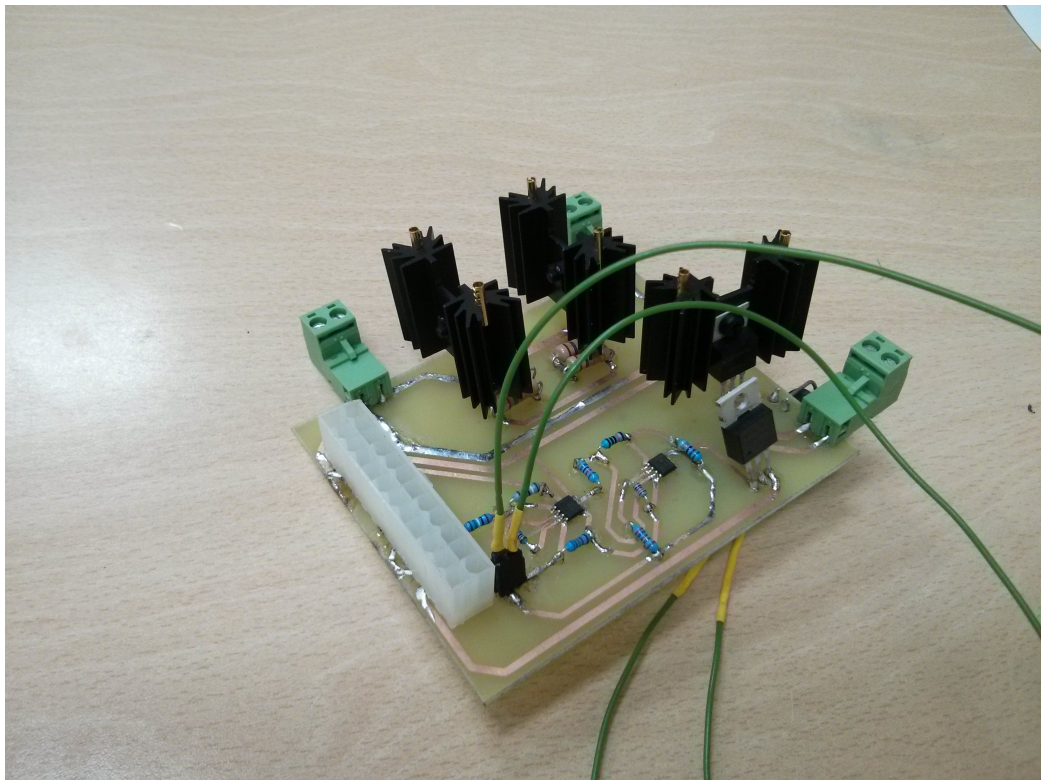


Figura 4.12: Placa de circuito impreso con sus componentes

Capítulo 5

Firmware y Software usados

5.1. Firmware

El *firmware* es un tipo de software para propósitos específicos que establece una lógica de control sobre sistemas electrónicos. El *firmware* podría decirse que es un *software* que tiene interacción directa con el *hardware* siendo el encargado de controlarlo para ejecutar correctamente las instrucciones externas.

En nuestro prototipo el *firmware* se encargará entre otras cosas de la recepción o la lectura de las instrucciones de código G, su interpretación, y la transformación de las mismas a señales eléctricas que controlarán los sistemas de la máquina.

Utilizaremos el *firmware* **Marlin** que es compatible con desarrollos basados en Arduino. Marlin se distribuye bajo licencia GNU GPL v3 y está en su versión 1.0.2. Y está enfocado al control de máquinas de control numérico computerizado como impresoras 3D, fresadoras, cortadoras láser...

5.1.1. Características de Marlin Firmware

Las características que hacen de Marlin uno de los más usados en el mundo de la impresión 3D son:

- Planificación por previsión (look-ahead planning). *Marlin* por defecto no ejecutará las instrucciones según aparezcan en su memoria, si no que cargará varias instrucciones en la memoria y según el trazado de las mismas calculará la aceleración para no realizar cambios de velocidad o

sentido bruscos. Con este comportamiento se eliminan vibraciones que podrían afectar al funcionamiento correcto de la maquinaria.

- En el código G se describen varios tipos de movimientos, los movimiento lineales y los movimientos en forma de arco por ejemplo. Otros firmware no soportan el movimiento en curvas y lo simplifican haciendo multitud de pequeñas esquinas que aunque pueden llegar a ser imperceptibles aumentan el tiempo del trabajo. Marlin tiene soporte para este tipo de instrucciones de manera nativa.
- Configuración guardada en el memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory). Marlin permite guardar configuraciones de trabajo en la memoria EEPROM del sistema y se cargarán en la secuencia de arranque. En otros firmware es necesario introducir la configuración cada vez antes de empezar a trabajar.
- Soporte para menú en la LCD. Marlin soporta su manejo a través de un módulo de LCD con lector de tarjetas y codificador rotatorio. De esta manera se puede introducir el archivo de trabajo en una tarjeta SD y se elimina la necesidad de conectar la maquina a un ordenador mediante un cable USB.
- Reconoce una multitud de códigos G no estandar y permite un mayor nivel de personalización de las dispositivos que utilizará la máquina. Gracias a esto somos capaces de programarlo para interpretar la instrucción M106 SXXX como la activación con ciclo de trabajo XXX(0-255) de uno de los pines con PWM del Atmega 2560.
- Programación modular. Marlin está dividido en *bloques temáticos* que se encargan de tareas concretas dentro del sistema. Está pensado para hacer la interacción entre módulos más clara y conseguir un mayor nivel de encapsulado.

5.2. Software

Para la realización de este trabajo se han utilizado una gran variedad de programas.

LTSpice ha sido usado para realizar las simulaciones sobre las que hemos basado posteriormente nuestro diseño. Las simulaciones se han realizado de manera modular, es decir, se ha simulado el comportamiento de cada uno de los componentes por separado. El INA826 se ha sido simulado para observar

que la salida nos daba valores relacionados correctamente con la temperatura. Para simular la temperatura fue necesario la utilización de un modelo de una NTC descargado que con la directiva de simulación `.TEMP XX`, siendo `XX` la temperatura, cambiaba su resistencia. El LM2903 se ha simulado para comprobar que los valores de voltaje umbral superior e inferior fueran correctos con la configuración adecuada y que la salida fuera coherente. También se simuló la salida que se iba a obtener con los reguladores de voltaje LM350 en configuración de limitación de intensidad para obtener el valor óptimo de las resistencias.

También se ha usado *EAGLE* para la realización de los esquemas y el diseño de las placas de circuito impreso como se ha visto en el capítulo Construcción.

Para el diseño en 3D se ha utilizado *Autodesk Inventor 2015* el cual, aunque sencillo de usar, tiene un periodo de aprendizaje bastante extenso. En general las piezas 3D que se han diseñado deben pasar después por un generador de código para la impresora 3D. Para generar este código se ha usado el software *Cura* en su versión 15.02 que es el recomendado para las impresoras de las que se dispone en Smart Open Lab.

OpensCam es un emulador de código G que nos permite visualizar el recorrido que realizará nuestra máquina para asegurarnos que no se produzcan errores que puedan forzar a la máquina a moverse a puntos fuera de su espacio de trabajo.

Para la obtención del código G a partir de las imágenes se ha usado el lenguaje *Python 2.7.10* en particular la interfaz gráfica de ésta versión de *Python* se denomina *IDLE*. Además se han utilizado las librerías PIL (Python Imaging Library) y NumPy (Numerical Python). PIL es una librería que añade capacidades de procesamiento de imágenes a Python. Soporta muchos formatos de imagen y aporta capacidades de procesamiento de imagen y gráficos. NumPy sin embargo es un paquete que es fundamental para la computación científica con Python. Se ha usado sobre todo porque provee a Python de un vector objeto n-dimensional en el cual se han cargado los píxeles y sus valores RGB.

El editor de $\text{\LaTeX}$ *Texmaker* ha sido el software con el que se ha confeccionado la memoria.

Capítulo 6

Procesamiento de imágenes

6.1. Script de Python

Para la obtención del código G a partir de una imagen se ha utilizado un pequeño programa en *Python* utilizando la librería *PIL* (*Python Imaging Library*) y *NumPy* que es un paquete de computación científica que entre otras cosas nos añade un vector objeto en el que guardar la información de cada pixel.

Lo primero que se hace es importar desde el paquete PIL la libreria Image y cargaremos numpy con el alias np.

```
from PIL import Image
import numpy as np
```

Definiremos dos funciones: La primera para crear un archivo en el que guardar el código resultante de nuestros programa. Y otra para escribir al final de ese archivo que hemos creado.

```
def creartxt():
    archi=open(path, 'w')
    archi.close()
creartxt()

def escribirtxt():
    archi=open(path, 'a')
    archi.write(linea1+'\n')
    archi.write(linea2+'\n')
    archi.close()
```

El argumento de entrada path, será la dirección donde está o queremos

donde crear nuestro archivo. Será del tipo "D:/Python/archivo.txt"

Después cargaremos la imagen con la función Image.open y la guardaremos en un array de los que nos proporciona NumPy que será np.array.

```
im = Image.open(path)
p = np.array(im)
p_byn = np.zeros((len(p), len(p[0])))
```

Además de eso lo que hemos hecho con la última instrucción es crear otro array del mismo tamaño(len(p)) y len(p[0])) pero que contendrá ceros. Este último array lo usaremos para guardar el nivel en blanco y negro.

Ahora definimos el área de trabajo que vamos a usar en milímetros. Por ejemplo 420.0 y 297.0, es demasiado grande para grabar una imagen pero como ejemplo puede ser valido. Después calcularemos la separación entre los pixeles, que dependerá de la resolución de la imagen.

```
x_trabajo=420.0
y_trabajo=297.0
tam_pix=x_trabajo/len(p[0])
tam_pix=round(tam_pix,3)
linea1=''
linea2=''
```

La variable tam pix que es la que guarda la distancia entre pixeles, la redondearemos hasta los 3 decimales. Con 3 decimales el error que se producirá será muy pequeño. Además creamos las cadenas de caracteres linea1 y linea2 vacías.

Ahora iremos recorriendo la imagen que hemos guardado e iremos calculando sus valores en blanco y negro y escribiendo dos instrucciones en el archivo. La primera instrucción modulará la intensidad del láser M106 SXXX y la segunda instrucción recorrerá el camino hasta el siguiente pixel. Con lo que se creará una pequeña área quemada con la intensidad que tenga el pixel. Para no volver una y otra vez a X=0.0mm cada vez que terminemos una línea, si estamos en línea par empezamos con un contador j=0 y vamos sumando y si es impar ponemos el contador a el número de pixeles en X y vamos restando.

```
i=0
j=0
while i<len(p):
    if i%2==0:##en caso de que sea linea par la
```

```

                                ##recorremos hacia un sentido , j=j+1
j=0
while j<len(p[0]):
    p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
    linea1='M106 S'+str(int(p_byn[i,j]))
    linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
    escribirtxt()
    j=j+1
else:##en caso de que sea linea impar la
    ##recorremos hacia el otro sentido , j=j-1
j=len(p)
while j>=0:
    p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
    linea1='M106 S'+str(int(p_byn[i,j]))
    linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
    escribirtxt()
    j=j-1
i=i+1

```

Como vemos cada vez que recorremos un pixel de la imagen guardamos la información al final del archivo. Así cuando termine de ejecutarse se obtendrá un archivo de texto con todas las instrucciones que deberá realizar la maquina para grabar esa imagen.

También hemos implementado otra versión del script que reduce el número de niveles de una imagen y los agrupa según donde se encuentren. Esto se ha implementado ya que al hacer las pruebas de funcionamiento se ha visto que al dividir la potencia en 256 pasos no se distinguían muy bien unos de otros. La última parte del script cambiaría y quedaría:

```

i=0
j=0
while i<len(p):
    if i%2==0:##en caso de que sea linea par
        ##la recorremos hacia un sentido j=j+1
        j=0
        while j<len(p[0]):
            p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
            p_byn_raster[i,j]=(int(p_byn[i,j])/32)*32
            linea1='M106 S'+str(p_byn_raster[i,j])
            linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
            escribirtxt()

```

```

        j=j+1
    else:##en caso de que sea linea impar
        ##la recorremos hacia el otro sentido j=j-1
        j=len(p)
        while j>=0:
            p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
            p_byn_raster[i,j]=(int(p_byn[i,j])/32)*32
            linea1='M106 S'+str(p_byn_raster[i,j])
            linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
            escribirtxt()
            j=j-1
        i=i+1

```

Al convertir el valor a un entero y dividirlo entre 32 estamos obteniendo un resultado entero entre 0 y 7 al multiplicarlo por 32 nuevamente recuperamos los valores en el rango original pero sólo tomarán los valores 0, 32, 64, 96, 128, 160, 192 y 228. Por ejemplo si son enteros $174/32=5$ y ahora $5*32=160$. De esta manera hemos reducido el número de niveles y se notará más la diferencia entre cada uno de ellos.

Se puede consultar el código completo en el apéndice C.

Capítulo 7

Resultados

La maquina lleva a cabo los movimientos con precisión bien sea recibiendo instrucciones desde un puerto serie del ordenador o desde la tarjeta SD (Figura 7.1). No se han observado saltos de paso, vibraciones o rozamientos inesperados durante las pruebas de funcionamiento. Las piezas impresas en 3D cumplen su función y aguantan el estrés que les puede producir el peso de las diferentes partes de la maquina.

Desgraciadamente la potencia de este modelo de diodo láser no es suficiente para realizar con soltura las tareas de corte que se tenían marcadas como objetivo. Sin embargo dependiendo del tipo del material si que se consiguen cortes con varias pasadas sucesivas. En materiales como papel y plásticos opacos finos se pueden hacer cortes fácilmente y en una sola pasada. Podría entenderse que no se ha conseguido el objetivo de corte pero la solución es sencilla y sólo presenta un problema económico. Esta solución sería comprar un diodo láser más potente y sustituir los componentes que constituyen su fuente de alimentación por otros adecuados.

Sin embargo si que se ha conseguido realizar grabados en escala de grises, es decir niveles de quemado. Utilizando las instrucciones que se generan con el *script* de Python que se explicó en el capítulo anterior. Debido a la potencia del láser la escala de grises será visible si agrupamos su salida en 7 niveles de quemado y el 0. Esto último corresponderá a reducir el número de niveles que tendría la imagen de 8 bits a 3 bits. De esta manera habrá más diferencia entre los niveles de consecutivos de potencia y se apreciará mejor la imagen grabada.

Además como se puede apreciar en la figura 7.2 se ha conseguido un ancho de haz tan estrecho cuando está enfocado al pasar de una fila de la imagen a

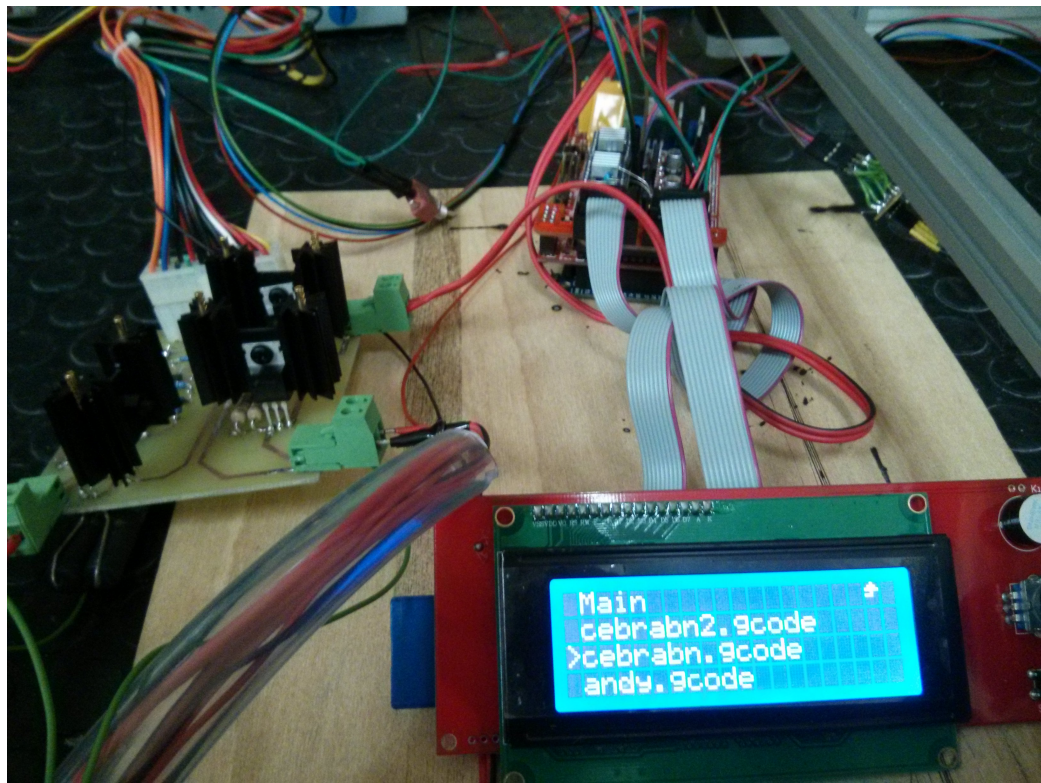


Figura 7.1: Selección de trabajo en el menú de la LCD

otra, que es una distancia de décimas de milímetro, es posible que no se lleguen a juntar las filas. Esto no ocurre con imágenes con una resolución muy grande, ya que el tamaño de pixel resultante en el procesamiento será todavía más pequeño si se mantiene el mismo tamaño de trabajo.



Figura 7.2: Grabado de una imagen

Capítulo 8

Conclusiones y futuras mejoras

8.1. Conclusiones

La realización de este proyecto ha resultado ser más compleja de lo que se esperaba. Sobre todo porque al ser un proyecto que se ha desarrollado en el mundo real ha tenido problemas reales... componentes que no funcionaban correctamente o estropeados, tolerancias de los componentes o las piezas, falta de experiencia en la realización de algunas tareas manuales...

Por otro lado, el prototipo construido es fácilmente adaptable para convertirlo en una fresadora y es totalmente compatible con el software de impresión 3D. En ambos casos solamente haría falta cambiar soporte de la herramienta y conexionar adecuadamente la misma.

El sistema de refrigeración funciona de manera correcta, y durante todas las pruebas de funcionamiento se ha comportado como se esperaba sin permitir que el láser adquiriera una temperatura peligrosa y manteniendolo frío.

Es compatible con el código G estándar gracias a que se ha instalado el *firmware* Marlin con ciertas modificaciones en su configuración.

Se ha elaborado un programa en Python que procesa las imágenes y devuelve un archivo con las instrucciones de código G que debe realizar la máquina.

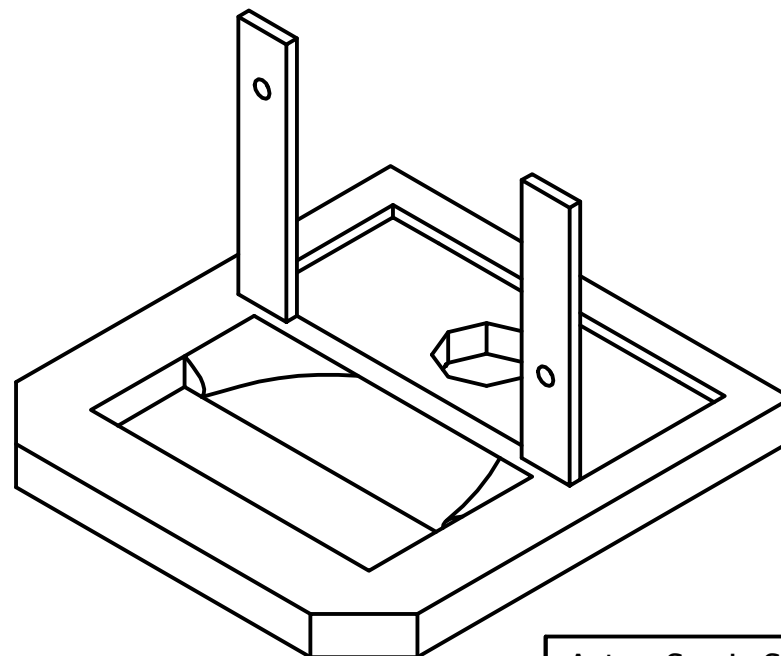
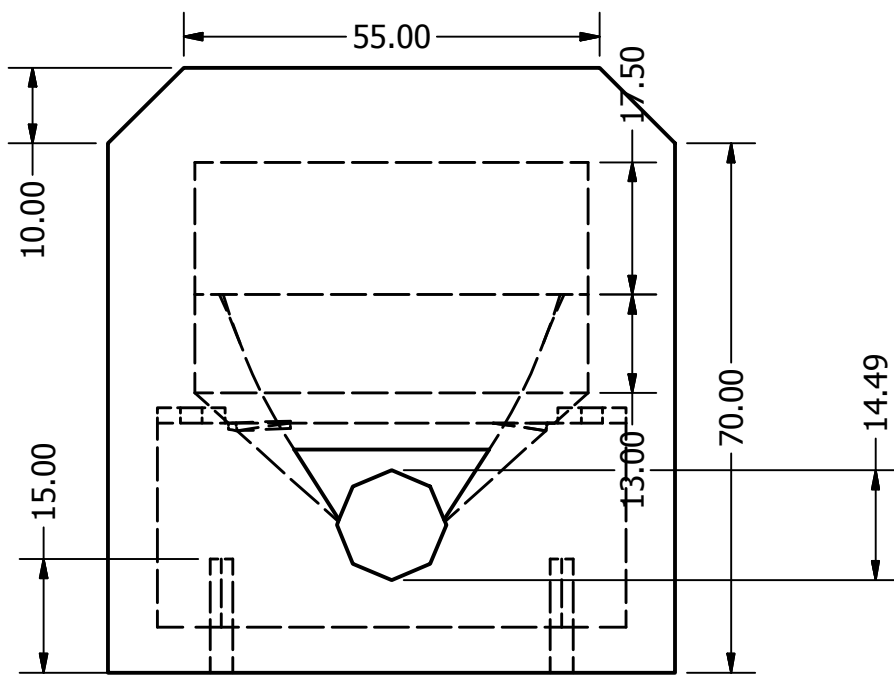
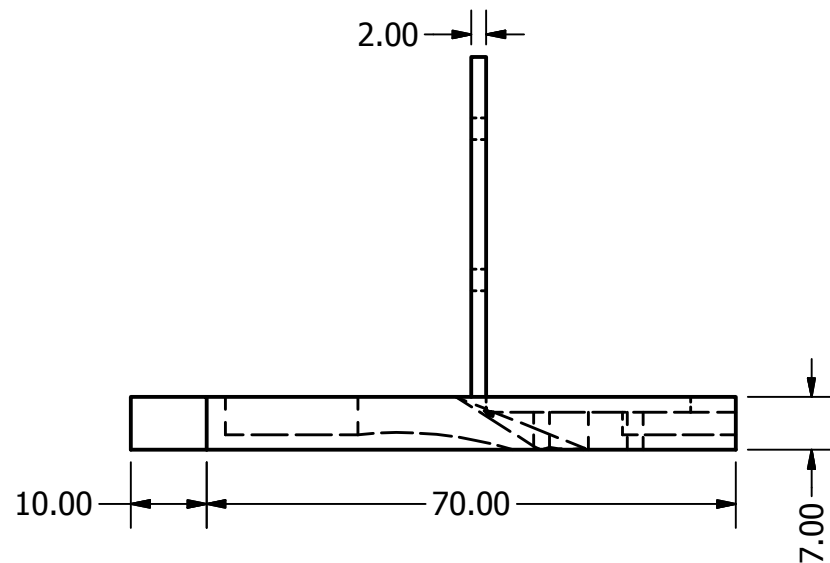
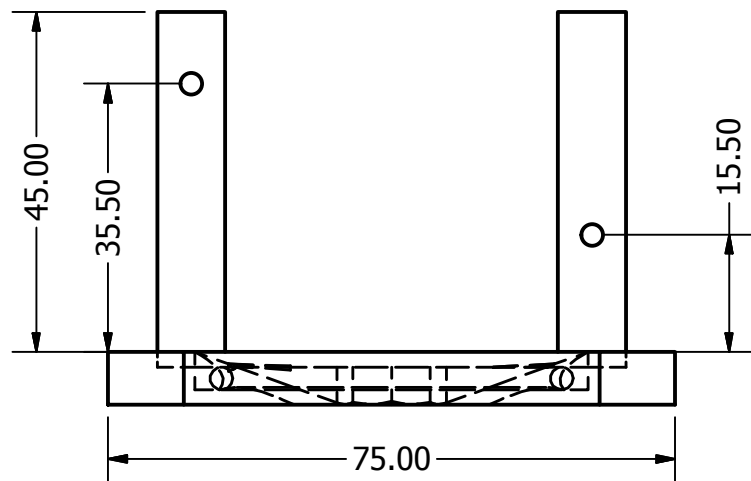
8.2. Futuras mejoras

- Cambio del diodo láser por uno de mayor potencia o por otro tipo de láser.
- Aumentar la velocidad máxima de movimiento cambiando los motores por otros de mejores prestaciones.
- Implementar un sistema de cambio rápido de cabezales. Para cambiar las herramientas de trabajo de manera sencilla.
- Refinamiento del diseño de la placa de circuito impreso.
- Implementar una interfaz gráfica para el programa de procesamiento de imágenes.

Bibliografía

- [1] GOULD, R. GORDON. ,«The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation». In Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan, 15 June through 18 June 1959. p. 128
- [2] ROBINSON, CLARENCE A. ,«Advance made on high-energy laser». Aviation Week & Space Technology, February 23, 1981: p. 25–27.
- [3] SCIENTIFIC AMERICAN. ,«Nitrogen Laser. Light and Its Uses.» Scientific American. June 1974. pp. 40–43.
- [4] ALBERT EINSTEIN. ,«Zur Quantentheorie der Strahlung (On the Quantum Theory of Radiation)», 1917.
- [5] STEEN W. M. ,«Laser Materials Processing, 2nd Ed.» 1998.
- [6] PREMIO NOBEL 1966 «Presentation Speech by Professor Ivar Waller.»
- [7] TOWNES, CHARLES H ,«How the Laser Happened: Adventures of a Scientist.» Oxford University Press. pp. 69-70. 1999.
- [8] JOAN LISA BROMBERG , «The Laser in America, 1950–1970» (1991), pp. 74–77
- [9] MAIMAN, T. H. , «Stimulated optical radiation in ruby». Nature 187 (4736): 493–494.
- [10] FRANCO, SERGIO, «Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos, 3ª Edición». Mc Graw Hill.

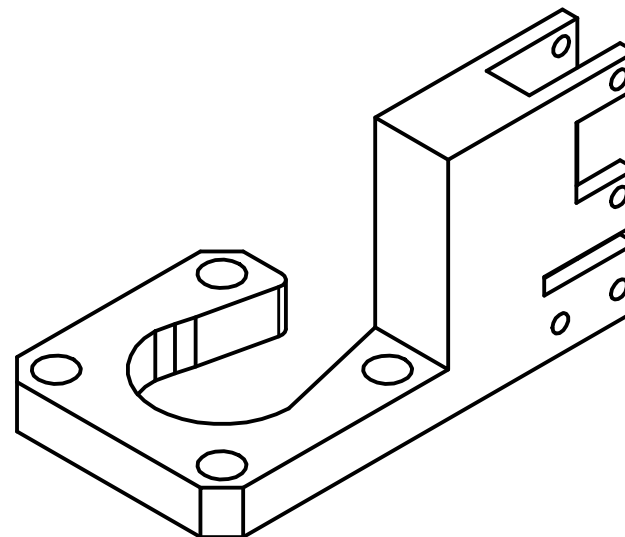
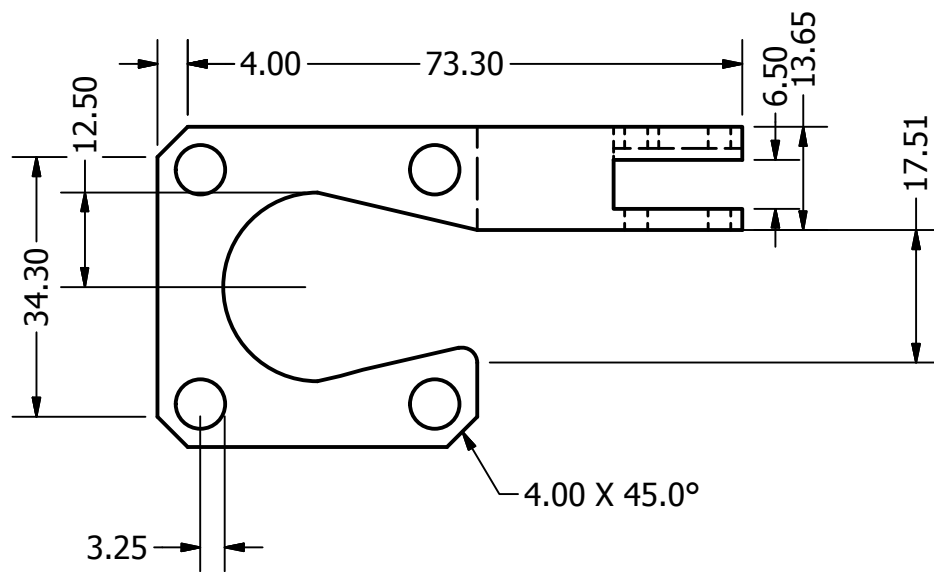
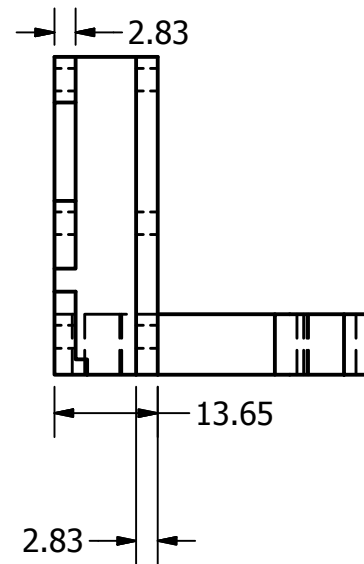
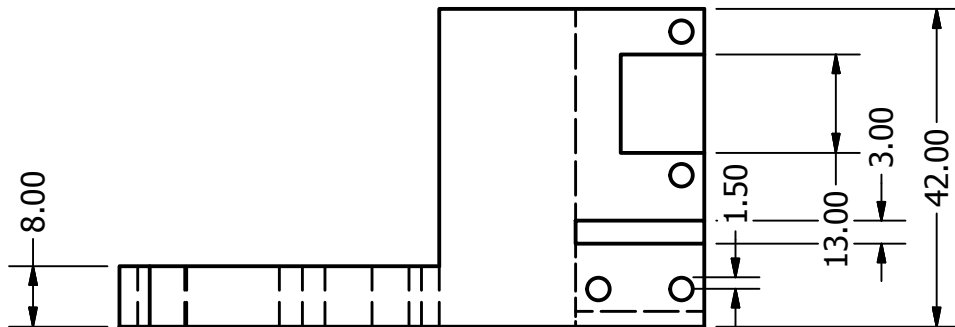
Apéndice A.
Diseños en 3D de las piezas.



Autor: Sergio Sánchez Herranz

Diseño: Soporte del bloque láser

Proyecto: Cortadora y grabadora láser

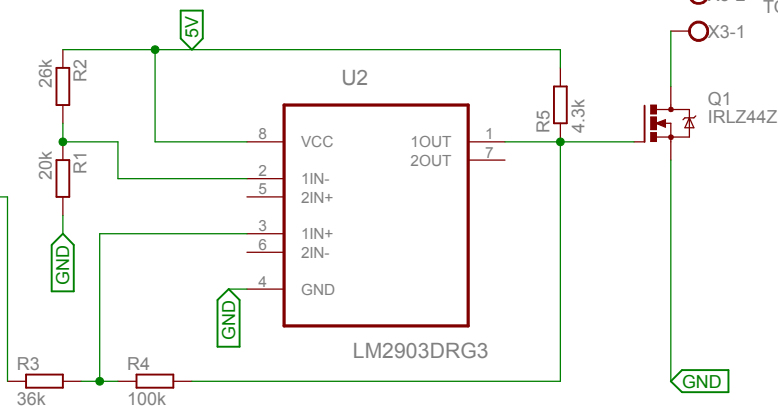
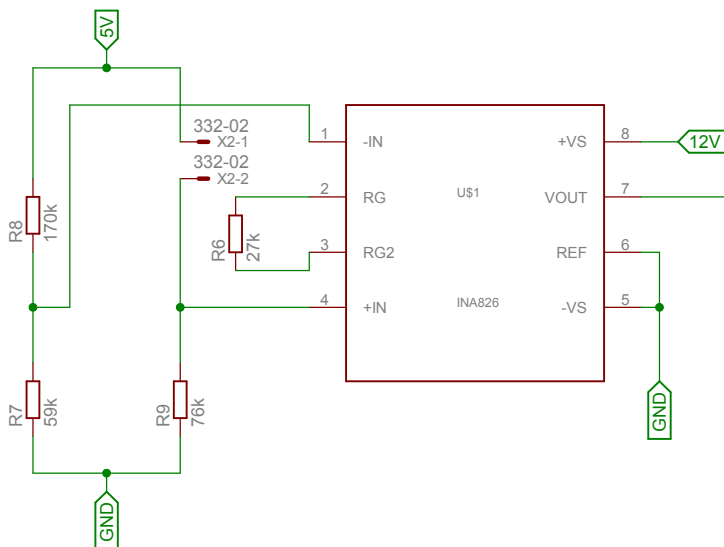
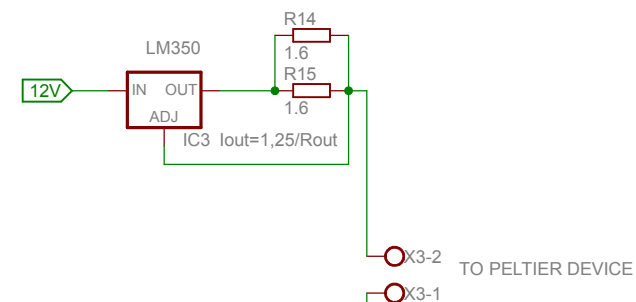
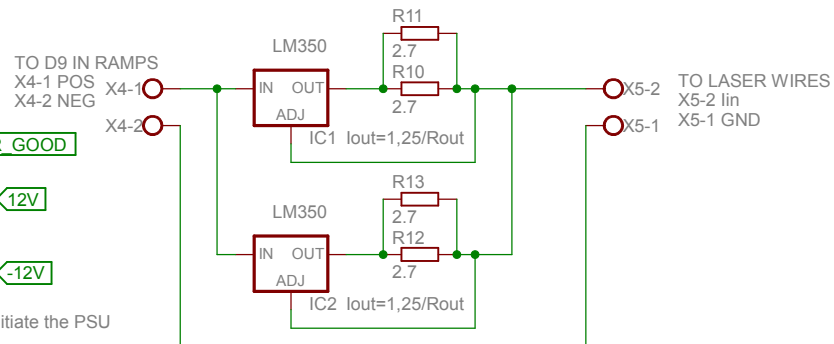
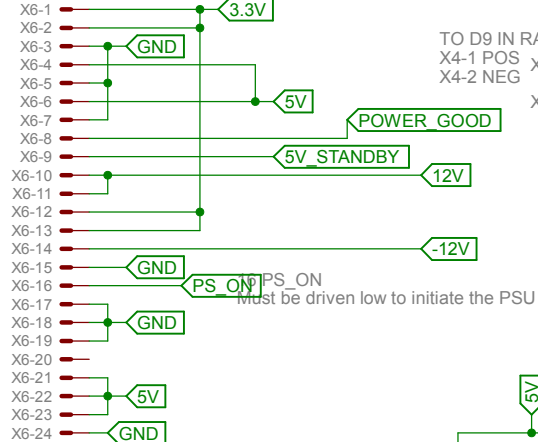


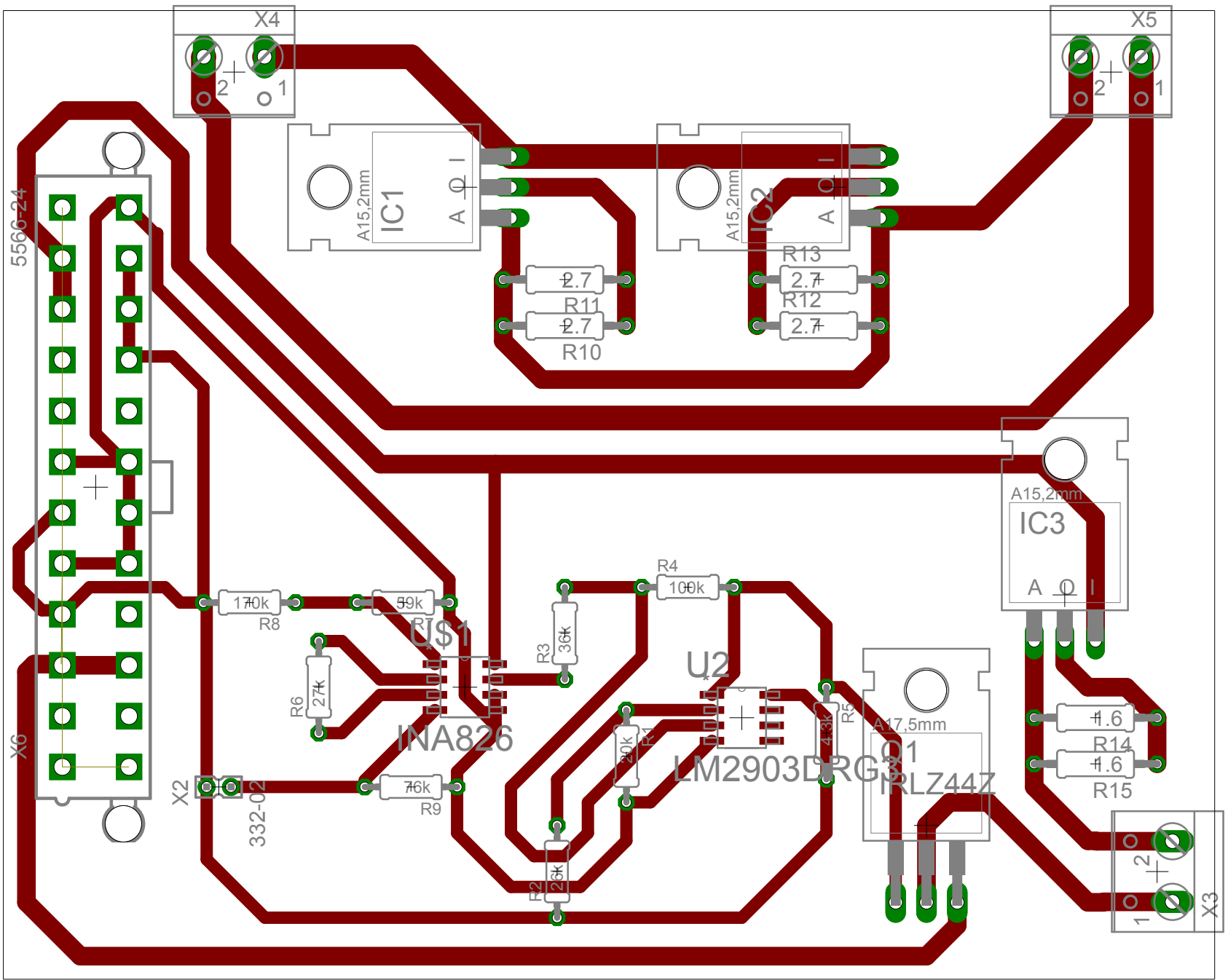
Autor: Sergio Sánchez Herranz
Diseño: Separador motores y soporte finales de carrera
Proyecto: Cortadora y grabadora láser

Apéndice B.

Esquema y diseño de la placa de circuito impreso

5566-24





Apéndice C.
Código de los scripts de Python
para procesar las imágenes.

ProcesadoConPILyNumPy_255

```
##Script que carga las imágenes las examina y devuelve las instrucciones
##Niveles de 0 a 255, necesario instalar PIL y NumPy. Para Python 2.7

from PIL import Image
import numpy as np

##Definimos las funciones de crear archivo de salida y escribir en el mismo
def creartxt():
    archi=open("D:/BoxSync/Teleco/4º/TFG/bmp pruebas/andy.txt",'w')
    archi.close()
creartxt()

def escribirtxt():
    archi=open("D:/BoxSync/Teleco/4º/TFG/bmp pruebas/andy.txt",'a')
    archi.write(linea1+'\n')
    archi.write(linea2+'\n')
    archi.close()

##Cargamos la imagen y creamos una vacia del mismo tamaño para guardar el blanco
y negro
im = Image.open("D:/BoxSync/Teleco/4º/TFG/bmp pruebas/andy.bmp")
p = np.array(im)
p_byn = np.zeros((len(p),len(p[0])))

##Definimos el tamaño de pixel e inicializamos la línea, usaremos tamaño de
fotografía 100x150mm
x_trabajo=420.0
y_trabajo=297.0

tam_pix=x_trabajo/len(p[0])
tam_pix=round(tam_pix,3)
##con dos decimales 0,01*420=4,2mm error maximo inaceptable
##con tres decimales es precisión suficiente 0,01*420=0,42mm

linea1=''
linea2=''

##Vamos recorriendo la matriz en blanco y negro y escribiendo los comandos en el
archivo de texto
i=0
j=0
while i<len(p):
    if i%2==0:##en caso de que sea linea par la recorremos hacia un sentido j=j+1
        j=0
        while j<len(p[0]):
            p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
            linea1='M106 S'+str(int(p_byn[i,j]))
            linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
            escribirtxt()
            j=j+1
        else:##en caso de que sea linea impar la recorremos hacia el otro sentido
            j=j-1
```

```

j=len(p)
while j>=0:
    p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
    linea1='M106 S'+str(int(p_byn[i,j]))
    linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
    escribirtxt()
    j=j-1

```

```

i=i+1

```

##G0 Xnn.nnn Ynn.nnn ó G1 corresponden a los códigos G de movimiento lineal. nn.n posicion absoluta en ese eje.

##M106 Snnn es el que modula la señal PWM del pin D9 que hemos usado para modular el láser

##M106 Snnn siendo nnn 0-255 el ciclo de trabajo de la señal PWM.

ProcesadoConPILyNumPy_Reduc_Nivel

```
##Script que carga las imágenes las examina y devuelve las instrucciones
##Niveles fijos 32*n, 0<=n<=7, necesario instalar PIL y NumPy. Para Python 2.7

from PIL import Image
import numpy as np

##Definimos las funciones de crear archivo de salida y escribir en el mismo
def creartxt():
    archi=open("D:/BoxSync/Teleco/4º/TFG/bmp pruebas/andy.txt",'w')
    archi.close()
creartxt()

def escribirtxt():
    archi=open("D:/BoxSync/Teleco/4º/TFG/bmp pruebas/andy.txt",'a')
    archi.write(linea1+'\n')
    archi.write(linea2+'\n')
    archi.close()

##Cargamos la imagen y creamos una vacia del mismo tamaño para guardar el blanco
y negro
im = Image.open("D:/BoxSync/Teleco/4º/TFG/bmp pruebas/andy.bmp")
p = np.array(im)
p_byn = np.zeros((len(p),len(p[0])))
p_byn_raster = np.zeros((len(p),len(p[0])))
##Definimos el tamaño de pixel e inicializamos la línea, usaremos tamaño de
fotografía 100x150mm
x_trabajo=420.0
y_trabajo=297.0

tam_pix=x_trabajo/len(p[0])
tam_pix=round(tam_pix,3)
##con dos decimales 0,01*420=4,2mm error maximo inaceptable
##con tres decimales es precisión suficiente 0,01*420=0,42mm

linea1=''
linea2=''

##Vamos recorriendo la matriz en blanco y negro y escribiendo los comandos en el
archivo de texto
i=0
j=0
while i<len(p):
    if i%2==0:##en caso de que sea linea par la recorremos hacia un sentido j=j+1
        j=0
        while j<len(p[0]):
            p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
            p_byn_raster[i,j]=(int(p_byn[i,j])/32)*32
            linea1='M106 S'+str(p_byn_raster[i,j])
            linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
            escribirtxt()
            j=j+1
        else:##en caso de que sea linea impar la recorremos hacia el otro sentido
```

```
j=j-1
```

```
    j=len(p)
```

```
    while j>=0:
```

```
        p_byn[i,j]=np.mean(p[i,j])
```

```
        p_byn_raster[i,j]=(int(p_byn[i,j])/32)*32
```

```
        linea1='M106 S'+str(p_byn_raster[i,j])
```

```
        linea2='G1 X'+str(j*tam_pix)+' Y'+str(i*tam_pix)
```

```
        escribirtxt()
```

```
        j=j-1
```

```
    i=i+1
```

##G0 Xnn.nnn Ynn.nnn ó G1 corresponden a los códigos G de movimiento lineal. nn.n posicion absoluta en ese eje.

##M106 Snnn es el que modula la señal PWM del pin D9 que hemos usado para modular el láser

##M106 Snnn siendo nnn 0-255 el ciclo de trabajo de la señal PWM.