

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Diseño de placa de expansión para control de impresora 3D

Autor: Carlos Lima López

Tutor: Fernando Muñoz Chavero

Dep. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Diseño de placa de expansión para control de impresora 3D

Autor:

Carlos Lima López

Tutor:

Fernando Muñoz Chavero

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Diseño de placa de expansión para control de impresora 3D

Autor: Carlos Lima López

Tutor: Fernando Muñoz Chavero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis compis del laboratorio

AGRADECIMIENTOS

Un día del mes de Julio andaba un poco perdido por el laboratorio de electrónica. Casi de casualidad mi tutor me presentó a José María, investigador en el laboratorio de electrónico. Desde entonces, y casi siempre de forma voluntaria, él y su compañero Jorge me transmitieron su forma de trabajar y me mostraron todo su apoyo en forma de favores, consejos y opiniones. Porque me han tratado como uno más de aquella sala y me han regalado una lección de vida. José María y Jorge, excelentes profesionales y mejores personas, este trabajo no estaría hoy sin vuestro apoyo.

Por supuesto, este trabajo va dedicado a mi madre, a mi padre y a mi hermano que me han ayudado en todo lo que se puede y me apoyaron en los momentos más duros de mi paso por la escuela.

Agradecer también a mi pareja y a todos mis amigos el apoyo que me han transmitido durante todo este tiempo.

Carlos Lima López

Sevilla, 2017

Resumen

Hoy en día, la tecnología de impresión 3D está en pleno desarrollo y ya es una herramienta fundamental en multitud de profesiones y ámbitos. Todo el mundo espera grandes proezas de esta tecnología a corto plazo.

Por ello, este trabajo de fin de grado trata de desarrollar una placa de expansión para impresora 3D donde sus circuitos de control sean modulares y, por tanto, cambiables, reparables y mejorables.

Esta placa tiene que servir de interprete entre el software de impresión 3D y los motores que mueven los ejes de la impresora. Además de, ser capaz de controlar la temperatura del extrusor.

En este documento se detallan todos los pasos seguidos desde las especificaciones a cumplir hasta el resultado del diseño de la placa completa.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xix
1 Introducción	1
<i>Tipos de impresoras 3D</i>	2
1.1.1 Impresión 3D con láser	2
1.1.2 Impresoras 3D por deposición de material plástico	3
1.3 Motivación	4
1.4 Objetivos	4
1.5 Metodología aplicada	4
2 Descripción General	5
<i>Especificaciones</i>	5
2.1.1 Especificaciones de los motores paso a paso	5
2.1.2 Especificaciones del control de temperatura	5
2.1.3 Especificaciones del microcontrolador	6
<i>Esquema general</i>	8
<i>Descripción por bloques</i>	8
2.1.4 Bloque Driver	8
2.1.5 Bloque Heater	9
2.1.6 Bloque Nucleo	10
3 Bloque Driver	11
<i>Esquemático. 1ª propuesta</i>	11
<i>Resultados en PCB de prueba</i>	13
3.1.1 Problemas encontrados	13
3.1.2 Soluciones adoptadas	14
<i>Esquemático versión final</i>	15
<i>PCB versión final</i>	16
4 Bloque Heater	21
<i>Esquemático. 1ª propuesta</i>	21
<i>Resultados en PCB de prueba</i>	25
4.1.1 Problemas encontrados	26
4.1.2 Soluciones adoptadas	26
<i>Esquemática versión final</i>	29
<i>PCB versión final</i>	30
5 Bloque Nucleo	35
<i>Control bloque Driver</i>	35
<i>Control bloque Heater</i>	37
5.1.1 Característica estática	37
5.1.2 Identificación con escalón del sistema	39
5.1.3 Identificación frecuencial con escalón del sistema	40
5.1.4 Diseño de controlador PID por método de bucle cerrado.	41

6	Pcb de interconexionado general	45
	<i>Esquemático de interconexionado general</i>	<i>45</i>
	<i>PCB interconexionado general</i>	<i>46</i>
7	Presupuesto	51
8	Conclusión	53
ANEXO A		55
	<i>Ensayo bloque Driver</i>	<i>57</i>
	<i>Ensayo de control PID</i>	<i>58</i>
ANEXO B		61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Modos de configuración de paso

12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Impresora 3D	1
Figura 1-2. Estereolitografía(SLA)	2
Figura 1-3. Sinterizado selectivo por láser(SLS)	3
Figura 1-4. Impresión por deposición de material fundido	3
Figura 2-1. Motor paso a paso	5
Figura 2-2. Esquema motor paso a paso	5
Figura 2-3. Extrusor MK8	6
Figura 2-4. Microcontrolador STM32 F103RB	6
Figura 2-5. Pin-out microprocesador STM32 F103RB	7
Figura 2-6. Esquema general	8
Figura 2-7. Bloque Driver	9
Figura 2-8. Bloque Heater	9
Figura 2-9. Bloque Nucleo	10
Figura 3-1. Primer esquemático propuesto. Bloque Driver	11
Figura 3-2. PCB Driver para pruebas (Vista 1)	13
Figura 3-3. PCB Driver para pruebas (Vista 2)	13
Figura 3-4. Rizado de la tensión de alimentación	14
Figura 3-5. Rizado de alimentación Vcc antes(izquierda) y después(derecha)	14
Figura 3-6. Versión final del esquemático del bloque Driver	15
Figura 3-7. Bottom bloque Driver	16
Figura 3-8. Top bloque Driver	16
Figura 3-9. Vista 3D bloque Driver 1	17
Figura 3-10. Vista 3D bloque Driver 2	17
Figura 3-11. Vista TOP bloque Driver	18
Figura 3-12. Vista BOTTOM bloque Driver	18
Figura 3-13. Vista lateral bloque Driver	19
Figura 4-1. Primer esquemático propuesto. Bloque Heater	21
Figura 4-2. Amplificación del pwm de 3.3V a 5V	22
Figura 4-3. Amplificación del pwm de 3.3V a 12V	23
Figura 4-4. Curva teórica de resistencia en función de la temperatura del termistor NTC 100K 3950	24
Figura 4-5. Caída de tensión Vterm en función de la temperatura T	25
Figura 4-6. PCB HEATER para pruebas (Vista 1)	25
Figura 4-7. PCB HEATER para pruebas (Vista 2)	25
Figura 4-8. Sobreoscilación en el disparo del Mosfet	26
Figura 4-9. Red Snubber	27
Figura 4-10. Oscilación en el disparo del Mosfet con Co (100 nF) en paralelo	27
Figura 4-11. Amortiguación en la conmutación del MOSFET con red Snubber	28

Figura 4-12. Versión final del esquemático del bloque HEATER	29
Figura 4-13. Bottom bloque Heater	30
Figura 4-14. Top bloque Heater	30
Figura 4-15. Vista 3D bloque Heater 1	31
Figura 4-16. Vista 3D bloque Heater 2	31
Figura 4-17. Vista Top bloque Heater	32
Figura 4-18. Vista 3D Bottom bloque Heater	32
Figura 4-19. Vista lateral bloque Heater	33
Figura 5-1. Microcontrolador STM32 F103RB	35
Figura 5-2. Ensayos de control del bloque Driver	35
Figura 5-3. Diagrama de flujo Driver	36
Figura 5-4. Ensayos de control del bloque Heater	37
Figura 5-5 Característica estática $V_{TERM}(V)$ -PWM(%)	38
Figura 5-6 Característica estática $V_{TERM}(^{\circ}C)$ -PWM(%)	38
Figura 5-7 Identificación ensayo escalón	39
Figura 5-8 Identificación frecuencial	40
Figura 5-9 Identificación frecuencial ampliada	40
Figura 5-10. Diagrama de control PID	41
Figura 5-11. Ensayo del controlador PID	42
Figura 5-12. Ensayo del controlador PID ajustado empíricamente	42
Figura 5-13. Ensayo del controlador PID ajustado empíricamente (ampliada)	43
Figura 5-14. Índice de desempeño ISE	43
Figura 6-1. Esquemático de interconexionado general	45
Figura 6-2. Top PCB conexionado general	46
Figura 6-3. Bottom PCB conexionado general	47
Figura 6-4. Vista 3D PCB conexionado general 1	48
Figura 6-5. Vista 3D PCB conexionado general 2	48
Figura 6-6. Vista 3D PCB conexionado Bottom	49
Figura 6-7. Vista 3D PCB conexionado top	49
Figura 7-1. Vista 3D placa completa 1	51
Figura 7-2. Vista 3D placa completa 2	52

Notación

PCB	Printed Circuit Board (en español, placa de circuito impreso)
PWM	Modulación de ancho de pulso
SLA	Estereolitografía
SLS	Sinterizado selectivo por láser
FDM	Deposición de material plástico
TSD	Apagado por sobrecalentamiento
ISD	Detección de sobrecorriente
UVLO	Bloqueo por bajo voltage

1 INTRODUCCIÓN

“Hagalo usted mismo”

Una novedosa y revolucionaria tecnología ha llegado para quedarse, eso es indudable, la impresión 3D. Es innegable que esta revolucionaria tecnología tiene un potencial enorme y que es capaz de fabricar objetos que con los métodos convencionales sería difícil y/o muy costoso.

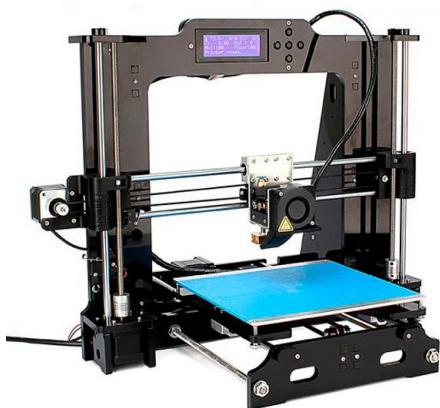


Figura 1-1. Impresora 3D

Entre la multitud de usos que tienen las impresoras 3D actualmente destacan el uso medicinal, fabricando prótesis, en la industria, elaborando piezas de sustitución o prototipos de forma rápida y barata, e incluso repostero, al fin y al cabo, una impresora 3D es como una manga pastelera.

Dejando las aplicaciones más comunes atrás, se está trabajando en aplicaciones mucho más revolucionarias e inverosímiles que podrían cambiar la vida de millones de personas. Aplicaciones que pueden ser, por ejemplo, la fabricación de órganos usando células vivas como material para imprimir con los que sustituir un órgano enfermo por uno sano y, de esta forma, alargar la vida del paciente.

Es por esta multitud de aplicaciones y enorme potencial, la necesidad de invertir tiempo, dinero y esfuerzo en el desarrollo de esta tecnología. Siguiendo esta línea, en este trabajo se trata de desarrollar una placa compacta que unifique toda la circuitería necesaria para poder transformar las ordenes digitales de un software de impresión 3D en ordenes de movimiento de los motores y extrusión del plástico.

Tipos de impresoras 3D

Los dos tipos de impresora 3D que predominan en el mercado son las impresoras 3D láser y las impresoras 3D por deposición de material plástico o FDM, la cual es el tipo de impresora para la que se ha diseñado la placa.

1.1.1 Impresión 3D con láser

Dentro de la impresión 3D laser se pueden distinguir a su vez dos tipos de impresoras. Las tipo SLA o estereolitográfica y las SLS, del inglés, “Selective Laser Sintering” (“Sinterizado selectivo por láser”, en español).

1.1.1.1 Impresoras 3D estereolitográfica(SLA)

La estereolitografía es un proceso de fabricación por adición que emplea resina que cura mediante luz ultravioleta en un tanque, y un láser ultravioleta para construir los objetos. Los objetos tridimensionales son obtenidos mediante la adición de finas capas, impresas una encima de otra. Cada capa es una sección transversal del objeto que el láser traza en la superficie de la resina, que es el material consumible. La resina líquida cura y se solidifica mediante la exposición al láser de luz ultravioleta, quedando así la capa recién solidificada pegada a la capa previa que existía debajo suya.

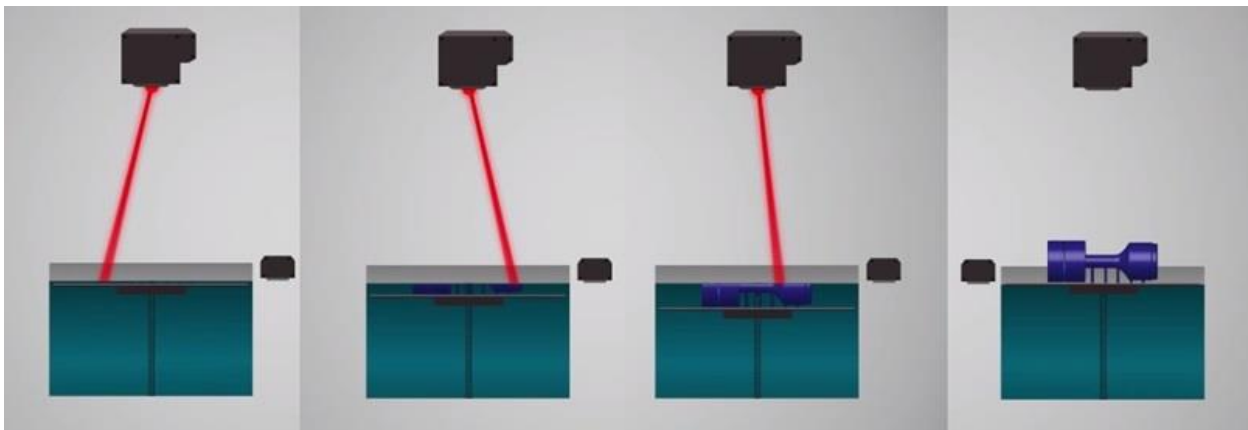


Figura 1-2. Estereolitografía(SLA)

Una vez que la capa a imprimir ha sido creada, la plataforma de elevación del equipo desciende una distancia equivalente al grosor de una capa de resina solidificada (típicamente entre 0.05 y 0.15 mm). Una hoja barre la pieza dejando una nueva capa de resina líquida en la superficie de la cubeta, lista para la siguiente impresión del láser. De esta manera, se va creando capa a capa una pieza tridimensional. Una vez que la pieza tridimensional se ha completado, ésta se sumerge en un baño químico que retira el exceso de resina y, posteriormente, curada en un horno de luz ultravioleta.

La estereolitografía necesita de estructuras para soportar la pieza a la plataforma de elevación de forma que se evite la deflexión de la pieza por gravedad. También requiere de sujeción en la sección transversal para que no se deslice cuando pasa la hoja de re-aplicación de resina.

1.1.1.2 Impresoras 3D tipo SLS

La producción de objetos mediante SLS requiere el uso de un láser de alta potencia (por ejemplo, un láser de CO₂) para fusionar pequeñas partículas de plástico, metal, cerámica o cristal en una forma tridimensional deseada.

El láser fusiona de forma selectiva material en forma de polvo en una cubeta mediante el barrido de finas capas transversales generando el objeto tridimensional. La información dimensional de la pieza a imprimir proviene de un archivo informático que ha sido generado o previamente escaneado. Una vez que la sección transversal, o capa, se va formando, la cubeta de polvo desciende una distancia equivalente al espesor de la capa formada, y una nueva capa de material base es añadida a la superficie. El proceso es repetido tantas veces como capas se necesiten fundir hasta crear el objeto tridimensional.

Las piezas terminadas tendrán una densidad que depende de la potencia pico del láser más que de su duración, los equipos SLS usan un láser de pulso. El equipo SLS precalienta el material polvo base en la cubeta a una temperatura ligeramente inferior a la de fusión de dicho material. De esta forma hace que la fusión del material por calentamiento sea más sencilla.

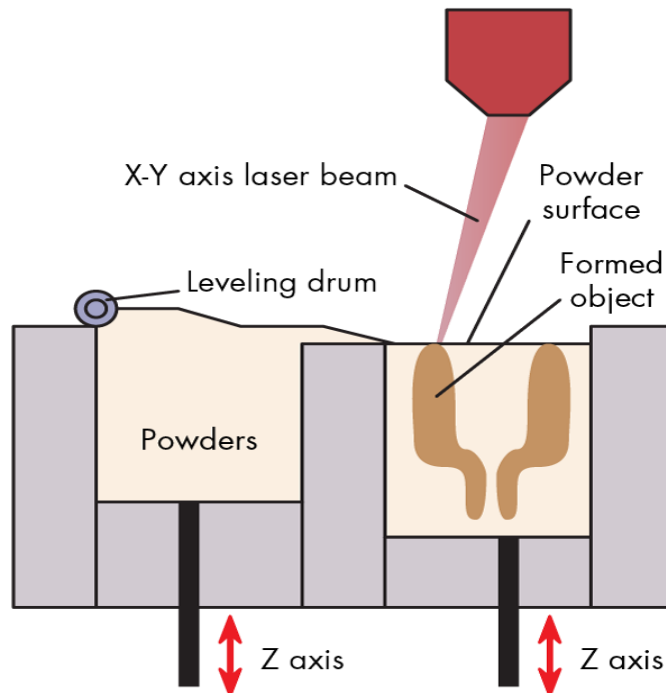


Figura 1-3. Sinterizado selectivo por láser(SLS)

Al contrario que en otros procesos de fabricación por adición, como la estereolitografía (SLA) y deposición de material plástico (FDM), la sinterización selectiva por láser no necesita de soportes ya que la parte sinterizada está todo el tiempo rodeada de polvo sin sinterizar que actúa de soporte.

1.1.2 Impresoras 3D por deposición de material plástico

La tecnología de impresión por deposición de material plástico es una técnica aditiva, un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla llamada extrusor. El extrusor se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material plástico y puede desplazarse en tres ejes controlados electrónicamente. El extrusor normalmente lo mueven motores paso a paso o servomotores.



Figura1-4. Impresión por deposición de material fundido

El modelado por deposición fundida comienza con un proceso de software, que parte de un fichero estereolitográfico (stl). El fichero es orientado para poder ser impreso, dividido en capas y se calculan las trayectorias que la boquilla deberá seguir para depositar el material, capa a capa, para conformar la pieza. Si son necesarias, se pueden generar estructuras de soporte que, si la máquina es capaz, imprimirá en otro material que, tras finalizar la creación de la pieza, será retirado.

El termoplástico es fundido y depositado por la boquilla en capas del grosor requerido (capas más finas implican mejor calidad en la pieza final) una a una. Las capas se depositan de abajo hacia arriba.

A pesar de que el modelado por deposición fundida es una tecnología muy flexible, y es capaz de realizar piezas muy diversas, existen algunas restricciones sobre las características de lo que se puede fabricar con esta técnica, especialmente en lo referente a la pendiente de los voladizos.

1.3 Motivación

La motivación de este proyecto viene dada por el deseo de hacer un trabajo multidisciplinar que aúne los conocimientos y aptitudes más relevantes para mí, obtenidos durante mi paso por este grado, como pueden ser, el diseño de circuitos a nivel esquemático y de pcb, la programación de microcontroladores y el control de un sistema real como puede ser la temperatura del extrusor.

Como incentivo a todo esto, también me ha motivado la curiosidad por trabajar en un campo tan prometedor y abierto como es la impresión 3D.

1.4 Objetivos

El objetivo de este trabajo es diseñar una placa controlada por un microcontrolador de la serie STM32, en concreto el modelo F103RB, que sirva de intérprete entre el software que calcula y genera la trayectoria de la punta del extrusor, y los motores paso a paso de una impresora 3D tipo FDM. También debe ser capaz de controlar la temperatura del sistema de calentamiento del extrusor de plástico.

1.5 Metodología aplicada

Aunque se comentará durante todo el documento, para servir de aclaración se muestra en la siguiente lista los pasos seguidos en la elaboración de cada circuito:

1. Estudio de circuitos que cumplan, a priori, las especificaciones dadas.
2. Primera propuesta de esquemático y testeo de la misma en pcb de prueba.
3. Depuración de errores.
4. Impresión y testeo de pcb depurada.

Todos los diseños de circuitos se han realizado utilizando la herramienta Altium. La programación del microcontrolador se ha realizado utilizando el compilador online Mbed cuyos códigos se encuentran en el anexo A.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL

A continuación, se detallarán las especificaciones que tenía este proyecto antes de su ejecución. Seguidamente se mostrará el esquema general de la placa con los distintos bloques que la forman, para finalmente explicar en que consiste cada bloque.

Especificaciones

La placa diseñada debe incorporar la circuitería necesaria para poder controlar con el microcontrolador STM32 F103RB el movimiento de los 6 motores paso a paso de la impresora 3D, además de, la temperatura del extrusor y la cama, cuyo control se realiza con un sensor de temperatura y un calentador integrados en ambas partes.

2.1.1 Especificaciones de los motores paso a paso

En ausencia del modelo exacto de motor paso a paso incorporado en la impresora 3D, se ha utilizado para los ensayos el modelo 42STH7-1684A, un modelo enormemente estandarizado, utilizado en la mayoría de modelos de impresoras 3D, cuyo datasheet se puede encontrar en el anexo B.



Figura 2-1. Motor paso a paso

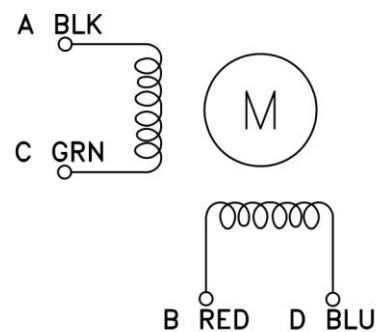


Figura 2-2. Esquema motor paso a paso

Este motor consta de dos fases. Cada fase incluye una bobina, dependiendo de como varíe su energización el motor se moverá a una posición u otra.

Las especificaciones de la placa respecto a los motores son, ser capaz de ejecutar movimientos controlados del motor usando tres señales digitales explicadas en la siguiente sección. La placa debe ser capaz de transformar estas señales digitales del microcontrolador a señales en corriente en las bobinas de los motores.

Hay que recalcar que entre las especificaciones no consta que se controle la posición del eje de los motores. Esta labor está reservada al software de impresión 3D que no forma parte de este proyecto.

2.1.2 Especificaciones del control de temperatura

La placa debe ser capaz de controlar la temperatura de forma estable, mientras más estable sea esta mas uniforme será la deposición del plástico y, por tanto, mayor será la calidad del resultado.

Para el control de temperatura se dispone de un calentador que consume 25W si se alimenta a 12V y un Termistor de 100K NTC 3950 integrados en el extrusor y la cama. Los datasheets de ambos componentes se encuentran en el Anexo B.

El tipo de extrusor utilizado se puede ver en la siguiente figura, corresponde al modelo de extrusor MK8, utilizado, generalmente en impresoras 3D tipo PRUSA.

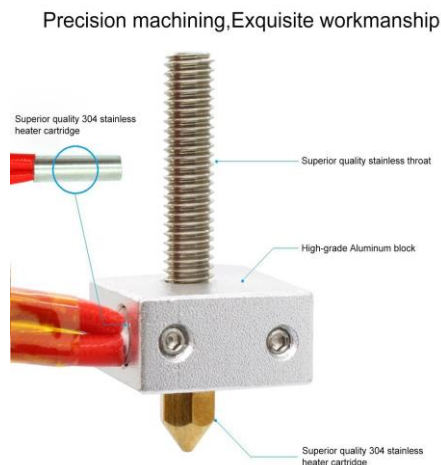


Figura 2-3. Extrusor MK8

2.1.3 Especificaciones del microcontrolador

El microcontrolador usado será el modelo ya mencionado STM32 F103RB, mostrado en la siguiente figura, el cual debe ser capaz de controlar los movimientos de los motores y la temperatura del extrusor. Debido a la gran extensión del documento no se adjunta el datasheet del mismo, este se puede encontrar en la dirección web: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f103rb.html>.

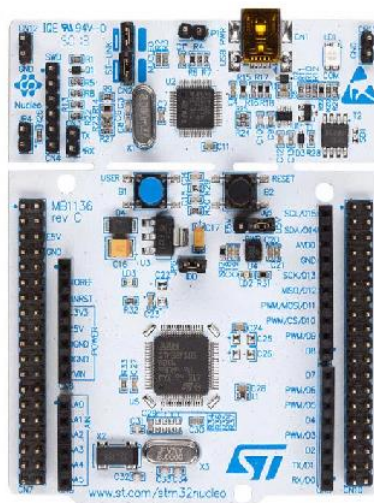


Figura 2-4. Microcontrolador STM32 F103RB

Para introducir al lector este microcontrolador, seguidamente, se muestran las características más importantes a tener en cuenta:

- CPU ARM de 32 bits a frecuencia máxima de 72 MHz.
- 51 puertos de entrada y salida.
- 4 Timers.
- 3 UARTs.
- 2 I2C.
- Pines ST MORFO. 2 columnas de 18x2 pines.
- 6 entradas/salidas analógicas

En la siguiente imagen, todos los pines del microprocesador con sus configuraciones posibles:

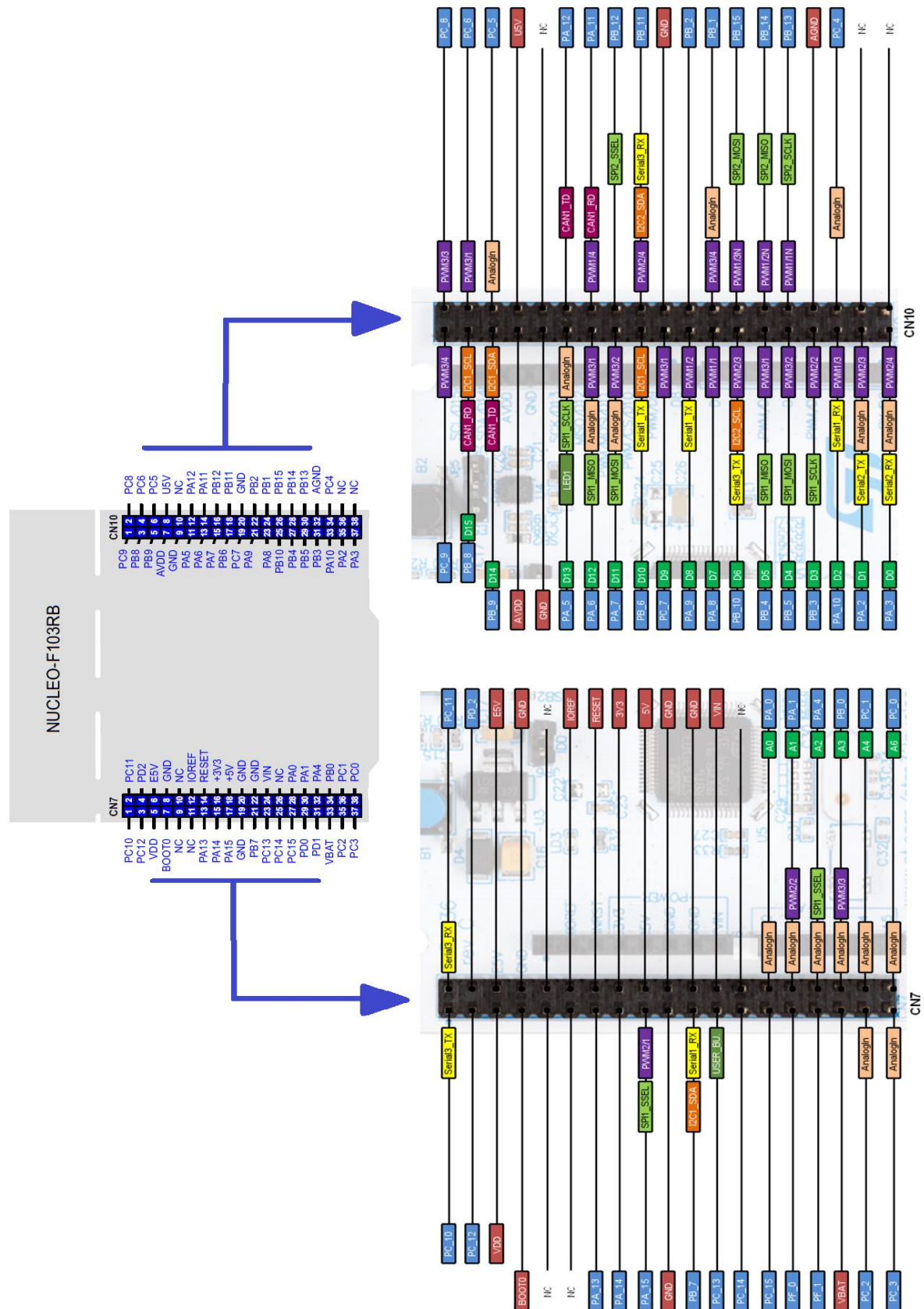


Figura 2-5. Pin-out microprocesador STM32 F103RB

Esquema general

El diseño de la placa se ha dividido en tres tipos de bloques para facilitar su estudio y su diseño:

1. El bloque Nucleo, es el microcontrolador antes mencionado STM32 F103RB, donde residen los algoritmos de control de los motores y de la temperatura del extrusor.
2. El bloque Driver, cual finalidad es transformar las señales digitales de control del micro en corrientes que energizan las bobinas de los motores paso a paso de forma adecuada para permitir controlar los movimientos del motor.
3. El bloque Heater, acondiciona las señales del calentador y del sensor de temperatura para poder controlar la temperatura del extrusor con el microprocesador.

Conociendo estos tres tipos de bloques, la placa está pensada para controlar 6 motores paso a paso y 2 sistemas de control de temperatura, uno de la cama y otro del extrusor, con el microprocesador.

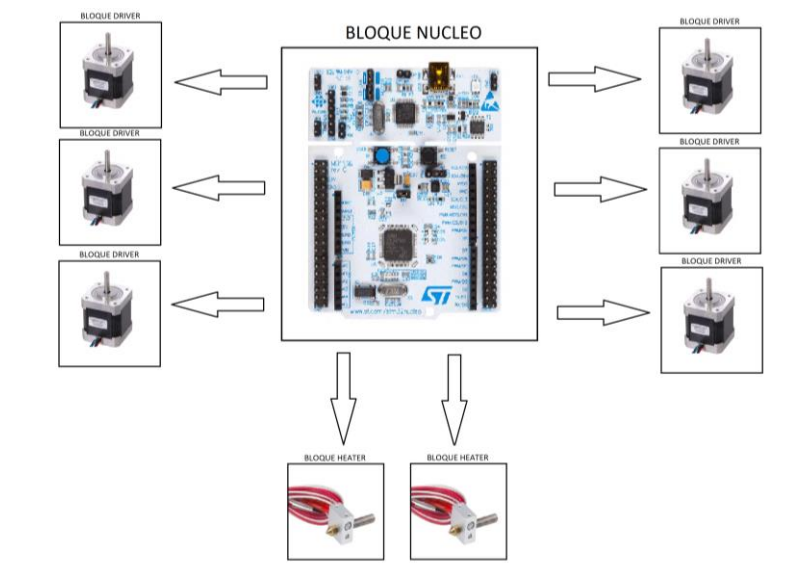


Figura 2-6. Esquema general

Descripción por bloques

A continuación, describiremos en detalle la funcionalidad de cada bloque:

2.1.4 Bloque Driver

El bloque driver tiene que transformar las señales digitales de control del microprocesador en movimientos del eje del motor paso a paso energizando sus bobinas de una manera concreta. Para ello se han definido las siguientes entradas y salidas:

Entradas:

- **ENABLE:** Señal digital activa a nivel alto, que habilita y deshabilita los motores, es decir, si ENABLE está a nivel bajo el eje de los motores estará libre, si está a nivel alto las bobinas estarán energizadas, el eje estará duro y podrá controlarse.
- **DIR:** Señal digital con la que se controla la dirección del giro del motor. Si está a nivel alto el motor girará hacia una dirección, si está a nivel bajo girará en la otra.
- **CLK:** Señal digital que ejecuta el giro del eje del motor en cada flanco de subida.

Salidas:

- OUT1A, OUT2A, OUT1B Y OUT2B son las salidas de este bloque. Salidas en corriente que son la conexión a las fases de los motores paso a paso. Las letras A y B diferencian las dos fases. Estas salidas son gestionadas gracias al driver incorporado en el bloque para conseguir el movimiento solicitado.

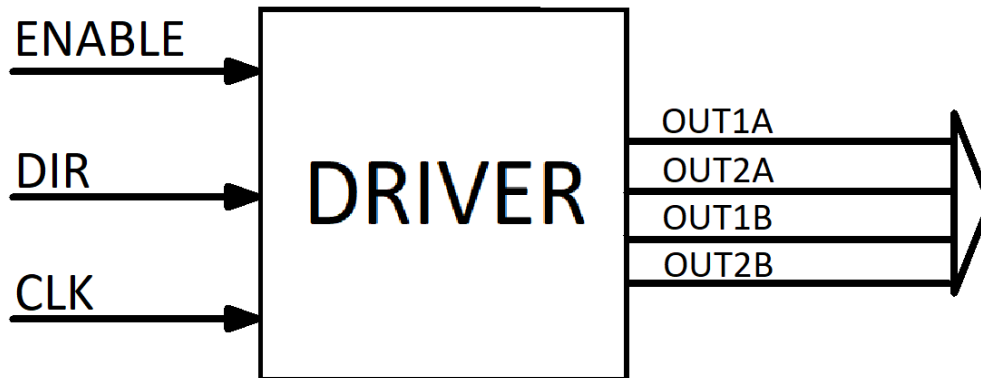


Figura 2-7. Bloque Driver

Este bloque será individual para cada motor, por tanto, las señales DIR y CLK serán diferentes a cada motor. En cambio, la señal ENABLE es común a todos los motores.

2.1.5 Bloque Heater

A diferencia del bloque driver, que era unidireccional, es decir, las entradas digitales del microcontrolador producen un cambio en los motores y los motores no envían información al microcontrolador. Este bloque es bidireccional, señales de control van del micro al extrusor y del extrusor al micro.

Básicamente, este bloque transforma la entrada digital PWM de 0 a 3.3 voltios en un mismo pwm aplicado al calentador de 0 a 12 voltios, de esta forma se puede controlar la potencia suministrada. En respuesta al calentamiento del extrusor el sensor de temperatura reflejará la temperatura del extrusor en una señal analógica VTERM de 0 a 3.3 v.

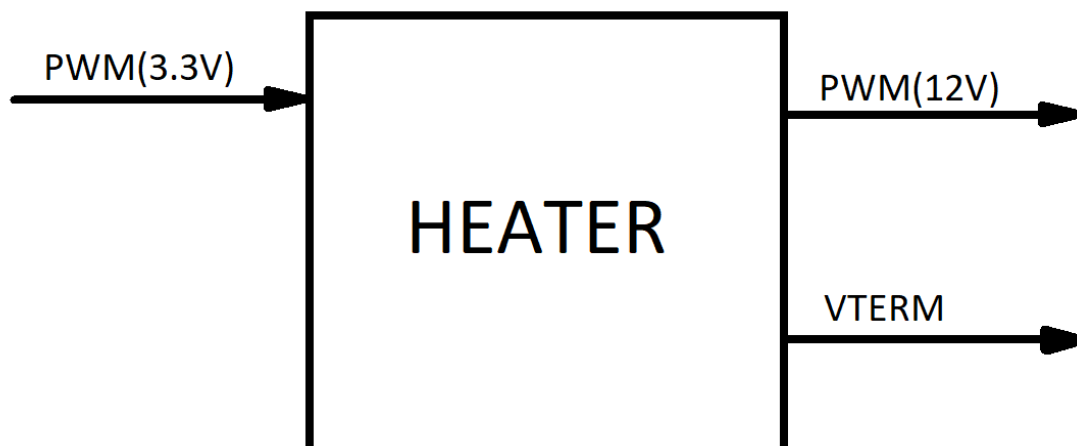


Figura 2-8. Bloque Heater

2.1.6 Bloque Nucleo

El bloque nucleo es el encargado de controlar el resto de bloques. Tiene una salida digital comun a todos los bloques DRIVER, la señal ENABLE, y dos salidas digitales a cada bloque DRIVER independientemente, las salidas DIR y CLK.

Para poder controlar los dos bloques HEATER tiene una entrada analógica que refleja la temperatura, y una salida en pwm que controla la potencia suministrada al calentador, ambas correspondientes a cada bloque.

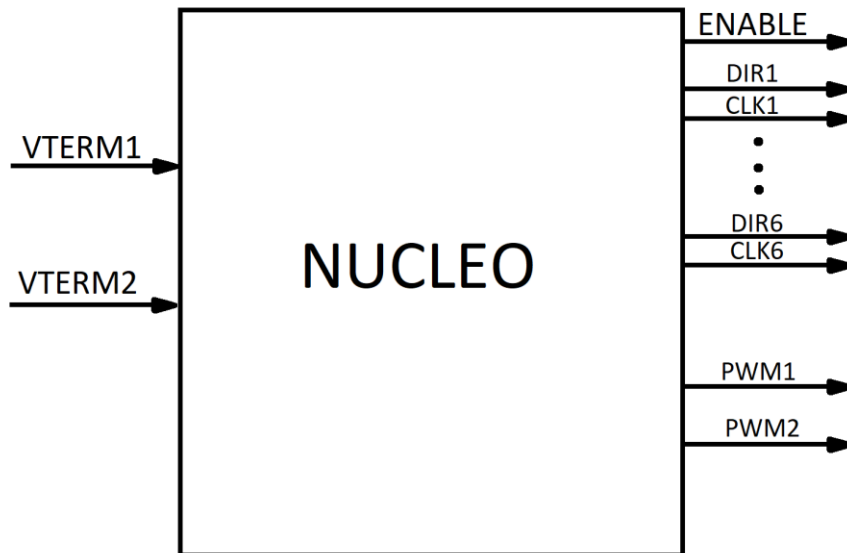


Figura 2-9. Bloque Nucleo

3 BLOQUE DRIVER

Esta sección está destinada a explicar en detalle la topología y fundamento de funcionamiento del bloque Driver, desde el esquemático hasta su modelo en PCB. Para ello, se explica la primera propuesta de esquemático, y sus resultados en las pruebas realizadas en PCB de prueba. Seguidamente se explica las soluciones adoptadas a los problemas encontrados y se muestra el resultado final del circuito tanto a nivel esquemático como a nivel real con una simulación en 3D.

Esquemático. 1ª propuesta

A continuación, se puede observar el primer esquemático diseñado. En este se configura un driver de motores paso a paso de la marca Toshiba, modelo TB6600HG, cuyo datacheet se encuentra adjunto en el anexo B. Este driver es un circuito integrado diseñado para controlar motores de paso a paso.

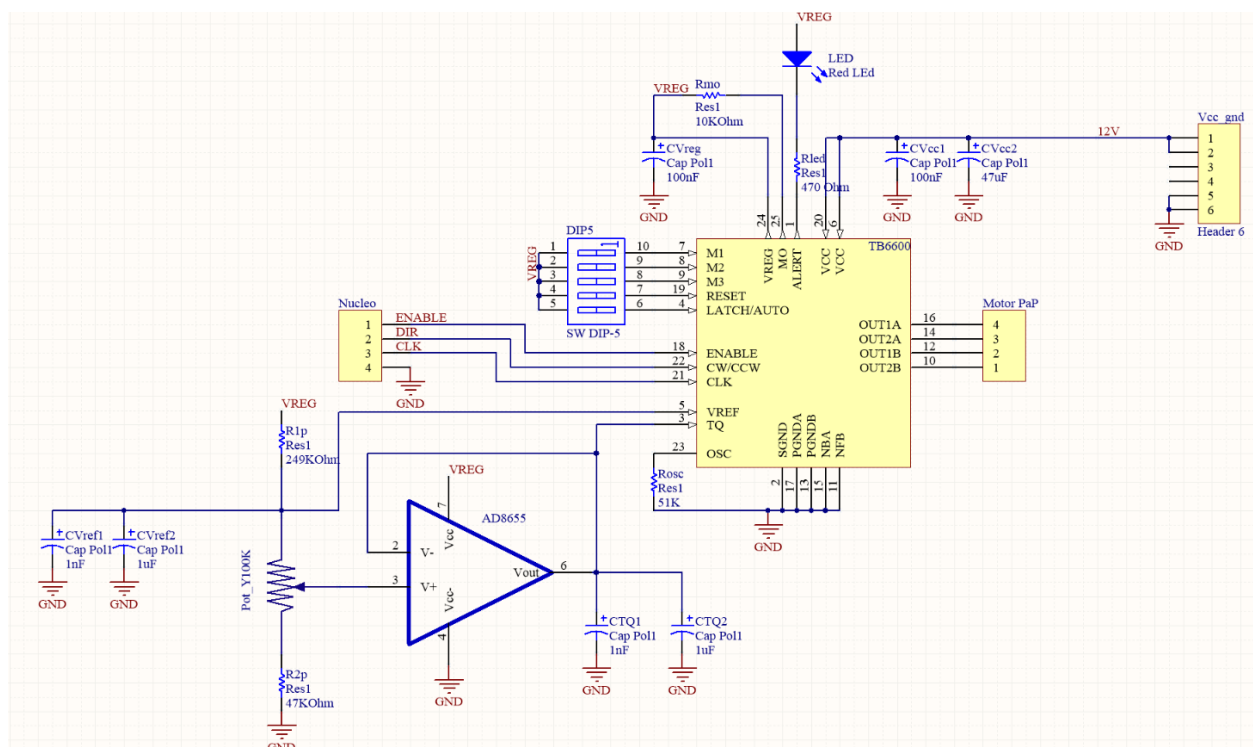


Figura 3-1. Primer esquemático propuesto. Bloque Driver

Las decisiones tomadas a nivel esquemático son las siguientes:

- El driver está alimentado a 12V por las entradas VCC (20 y 26), en cuyo nodo se han colocado dos capacidades CVcc1 y CVcc2. La finalidad de ambas capacidades es estabilizar dicho nodo, disminuyendo las componentes en alta frecuencia.
- Los terminales SGND (2), PGND (17), PGND (13) es la referencia de tensión del driver, evidentemente, conectadas a tierra.
- NFA (15) y NFB (11) se utilizan para monitorizar la corriente que circula por las fases del motor. Típicamente, se conectan a resistencias conectadas a tierra de muy bajo valor (0,2 Ohm) para que el consumo de esta sea despreciable. Hay que tener en cuenta que la corriente por esta rama puede llegar

a los 1.68 A. En nuestro caso, se han omitido estas resistencias, ya que, en la práctica no se va a monitorizar la corriente por las fases de los motores.

- El terminal OSC (23) configura el oscilador interno del driver, el cual controla la frecuencia de reloj de este. Para el valor elegido de $R_{osc}=51\text{ KOHm}$ la frecuencia de reloj del driver es 4 MHz.
- VREG (24) es la salida de un regulador de tensión interno del driver a 5v. Este pin es el encargado de alimentar a gran parte de la circuitería externa del driver que comentaremos a continuación. La capacidad C_{Vreg} tiene solo la misión de estabilizar esta tensión.
- El driver incorpora un triple sistema de protección que proporciona apagado por sobrecalentamiento (TSD), detección de sobrecorriente (ISD) y bloqueo por bajo voltaje (UVLO). Si el driver es sometido a alguno de estos casos el terminal ALERT (1) pasará de nivel alto (5V) a nivel bajo (0V). Por esto, se ha colocado un led rojo conectado VREG (5V), es decir, si se da algún tipo de alerta, el led y su correspondiente resistencia estaría sometido a una diferencia de tensión de 5v. De esta forma, el led quedaría iluminado y el usuario puede saber que se está produciendo alguna de las alertas antes comentadas.
- El terminal MO (25) es un pin de pull-up conectado a la resistencia R_{mo} y tiene la finalidad de poder monitorizar cuando el ángulo del eje se encuentra en la posición para la que la corriente por la fase es máxima.
- El conjunto de interruptores DIP5 permite al usuario configurar el driver dependiendo del uso que necesite. Los terminales conectados a M1 (7), M2 (8) y M3 (9) configuran el tipo de paso:

M1	M2	M3	MODE
L	L	L	OFF
L	L	H	1/1 PASO
L	H	L	1/2 paso con excitación en la fase A
L	H	H	1/2 paso con excitación en la fase B
H	L	L	1/4 PASO
H	L	H	1/8 PASO
H	H	L	1/16 PASO
H	H	H	OFF

Tabla 3-1. Modos de configuración de paso

De esta manera, si el usuario necesita mucha precisión puede configurar el paso en 1/16 que es el que aporta mayor precisión al movimiento del motor.

- En el DIP 5 también están conectados los terminales de RESET (19) y LATCH/AUTO (4). El terminal RESET permite el movimiento del motor si está activo. Si esta deshabilitado, las bobinas pueden estar energizadas o no, pero no puede moverse. La señal ENABLE tiene prioridad sobre RESET. ENABLE energiza o no las bobinas de los motores. Por esto, normalmente el pin de RESET

se deja activado y el control del encendido o apagado de los motores se hace con la señal ENABLE. El terminal LATCH/AUTO configura el modo de retorno en caso de que se produzca una alerta TSD.

- VREF (5) y TQ (3) están relacionados de forma que VREF es el máximo posible de TQ. TQ configura el par aplicado al motor de forma que para $TQ=VREF$ el par (o corriente) aplicado será del 100%. El valor de TQ se configura con el potenciómetro POT_Y100K, y este es copiado al terminal TQ con el amplificador operacional AD8655, configurado en modo de seguidor tensión. Las resistencias R1P y R2P están diseñadas para que el valor del pin del potenciómetro que se copia en TQ solo se pueda desplazar entre los valores 1.95V y 0,6 V. De esta manera acotamos el valor de TQ entre $VREF=1.95V$ y $VREF \cdot 0,3=0,6V$. Es decir, se acota TQ en el rango posible permitido. Las capacidades CVREF1, CVREF2, CTQ1 y CTQ2 se utilizan para estabilizar los nodos VREF y TQ.
- Los terminales ENABLE (18), CW/CCW (22) y CLK (21) corresponden a las entradas del bloque explicados en la sección 2.3.1. ENABLE es la señal de habilitar y deshabilitar los motores. CW/CCW conectado a la señal DIR controla la dirección del giro y CLK ejecuta el movimiento del eje en cada flanco de subida.
- OUT1A (16), OUT2A (14), OUT1B (12) y OUT2B (10) son las salidas en corriente a las fases del motor. Estas salidas son gestionadas automáticamente por el driver. Dependiendo de la configuración que haya elegido el usuario del driver el movimiento del motor se realiza de una forma u otra.

Tras la configuración de todos los pines, se realiza una PCB de pruebas en la que estudiar el comportamiento del circuito. En el siguiente apartado se exponen los problemas encontrados al realizar dichas pruebas y la solución que se ha adoptado para subsanarlos en la medida de lo posible.

Resultados en PCB de prueba

En este apartado se muestra el problema más relevante encontrado en el diseño del esquemático, mostrado en la sección anterior. Para realizar los ensayos se ha diseñado en Altium una PCB de pruebas ideada para conectarla de forma sencilla a las fuentes del laboratorio y al microcontrolador.

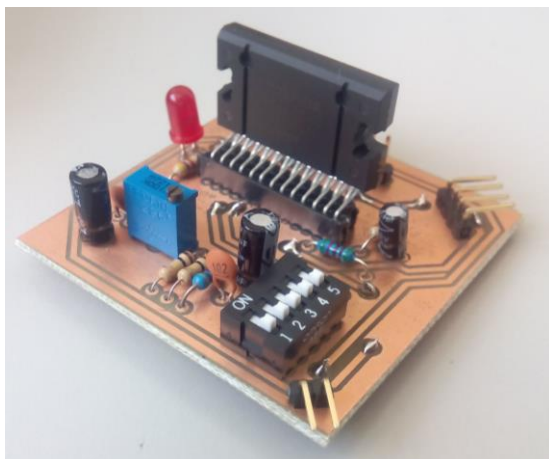


Figura 3-2. PCB Driver para pruebas (Vista 1)

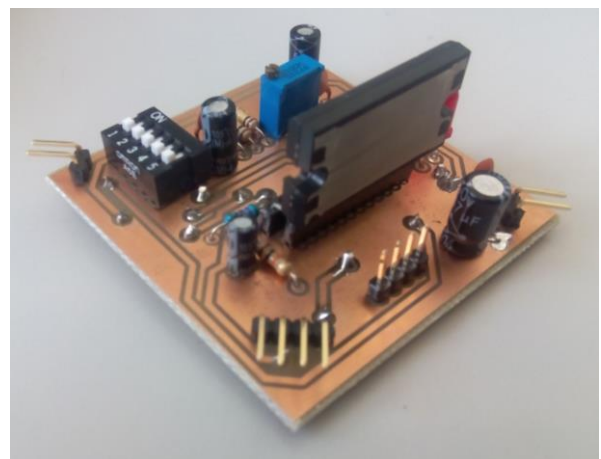


Figura 3-3. PCB Driver para pruebas (Vista 2)

3.1.1 Problemas encontrados

Las pruebas sobre el circuito reflejaron un fenómeno que aparecía cuando se lleva el paso del driver a los valores más precisos. Para la configuración de 1/8 y 1/16 de paso el driver demanda gran corriente, como consecuencia, la fuente se ve obligada a elevar la tensión de alimentación, produciendo un rizado como el que se observa en la siguiente captura del osciloscopio.

En la parte superior, en amarillo, se puede ver la señal CLK que ordena al motor que se mueva un paso en cada flanco de subida. En la parte inferior, en verde, la tensión de alimentación VCC a 12V.

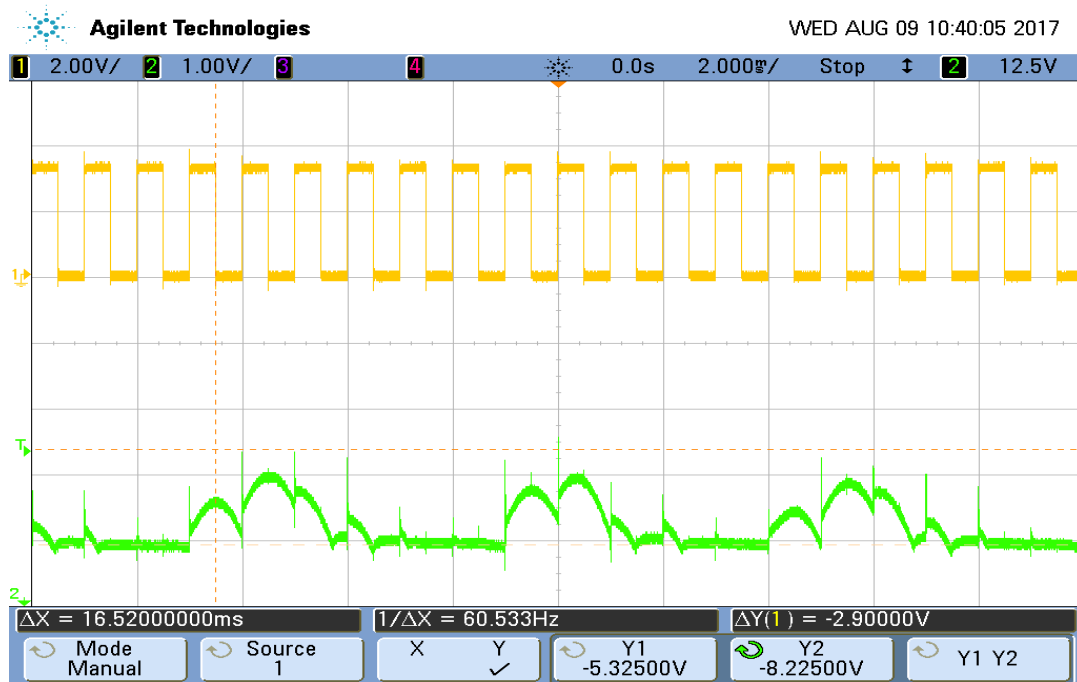


Figura 3-4. Rizado de la tensión de alimentación

El rizado en la tensión de alimentación Vcc es algo mayor de 2V y las componentes de alta frecuencia se acercan a los 3 V, en la Figura 3-4 se muestra el rizado como $\Delta Y(1) = 2.9V$.

3.1.2 Soluciones adoptadas

Para reducir este comportamiento, se ha incrementado la capacidad CVCC2 de 47uF a 470uF, de tal forma que, al tener más capacidad puede almacenar más carga y proveer al circuito de corriente en los momentos de mayor demanda. Al elevar dicha capacidad, el rizado de la tensión de alimentación VCC se ve reducido a prácticamente a la tercera parte, como se muestra en la Figura 3-5. Este valor de rizado, aunque no ideal, si es más que suficiente para que el circuito sea estable y el motor se mueva de forma fluida.



Figura 3-5. Rizado de alimentación Vcc antes(izquierda) y después(derecha)

Con esto, y en ausencia de comportamientos no esperados en las pruebas, se da por depurado el esquema que se expone en el siguiente apartado.

PCB versión final

La huella generada del circuito, de dimensiones 48.9x66,04 mm², correspondiente al bloque Driver son las siguientes:

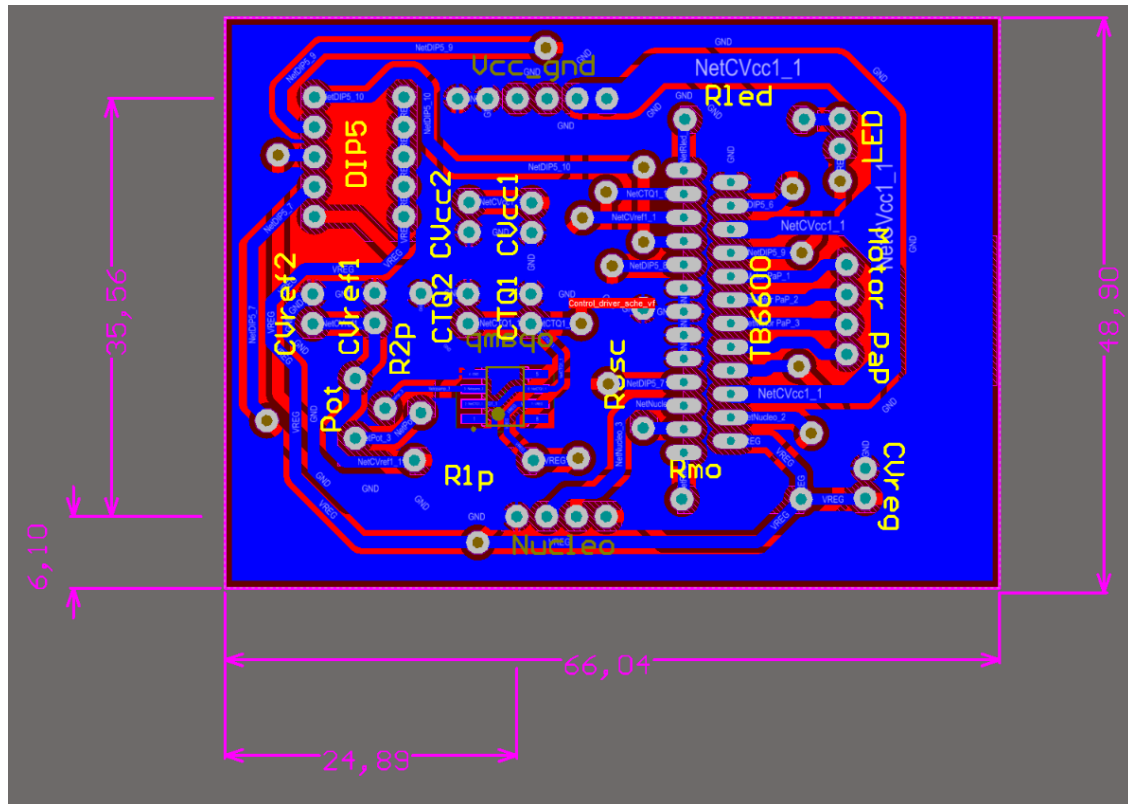


Figura 3-7. Bottom bloque Driver

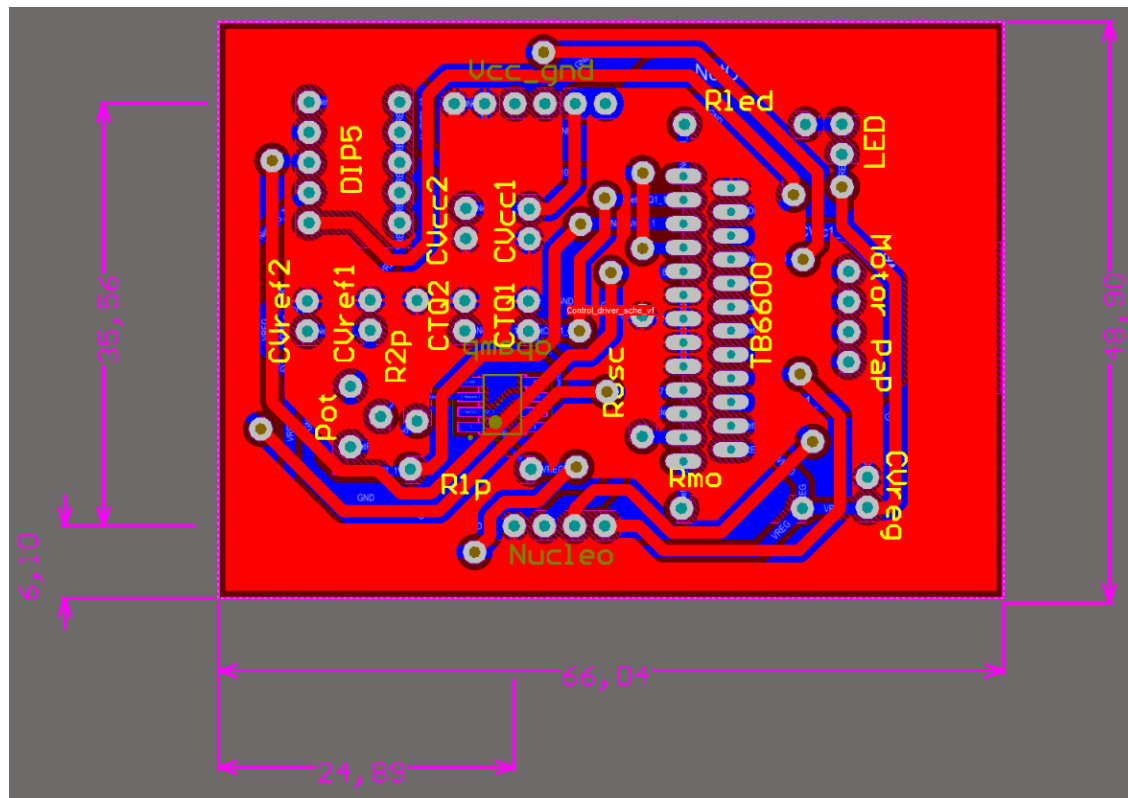


Figura 3-8. Top bloque Driver

Como se puede observar en la vista 3D de las siguientes figuras, la placa dispone de pines en su parte inferior, con los que obtiene la alimentación y las señales digitales controladas por el microcontrolador. Estos pines se han colocado de esta manera para que esta placa, que va clavada en un zócalo de la placa general, sea sustituible en caso de que el circuito tenga algún defecto o se estropee, o para dar pie a posibles mejoras.

La disposición del driver integrado TB6600HG ha sido ideada para facilitar la sustitución del driver en caso de que se estropee alguno. Por estos drivers fluyen corrientes importantes, llegando en nuestro caso, a 2.4 amperios como máximo, luego el calentamiento del driver puede acortar su vida con gran facilidad. En vez de soldar el driver directamente a la placa se ha colocado un zócalo que permita su sustitución con facilidad. El zócalo del driver se ha omitido de la vista 3D para dar mayor claridad.

A continuación, y para finalizar esta sección, diferentes vistas de la pcb diseñada en el modelo 3D de Altium.

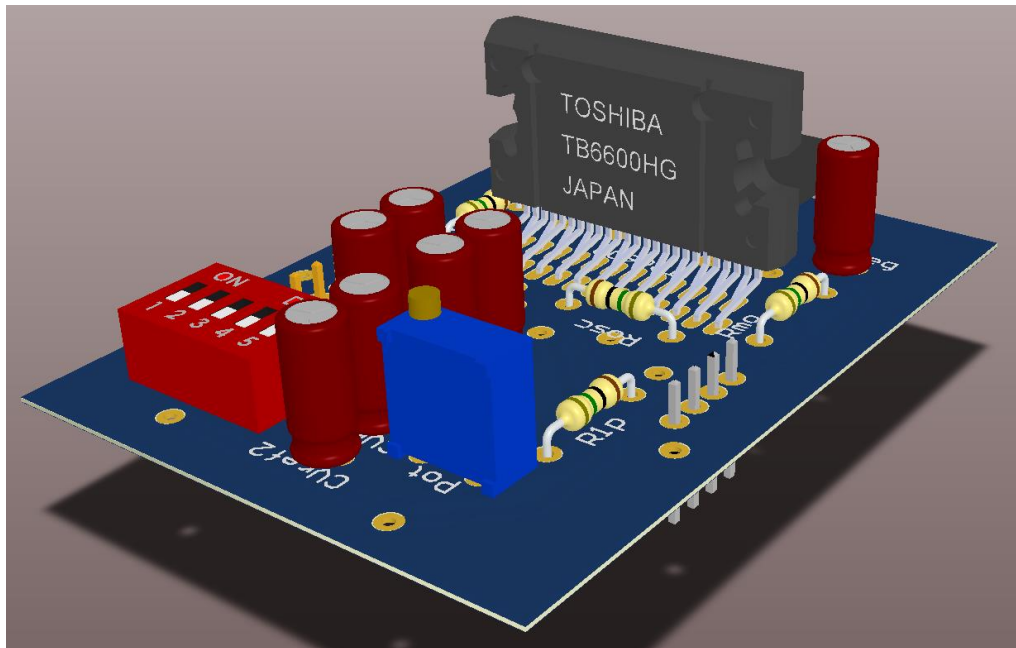


Figura 3-9. Vista 3D bloque Driver 1

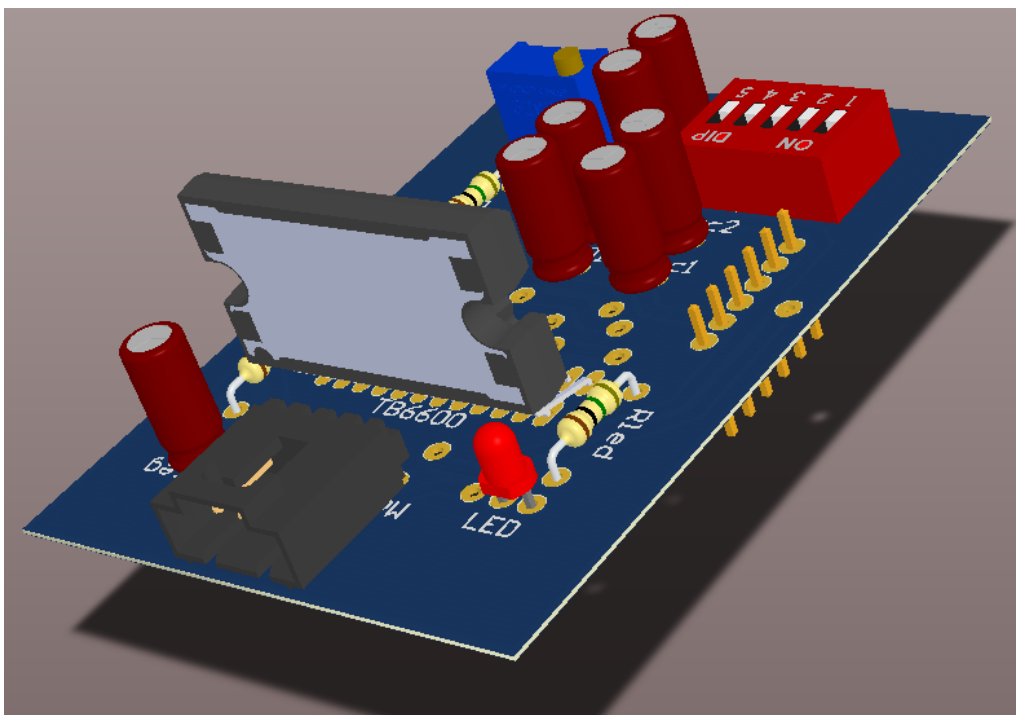


Figura 3-10. Vista 3D bloque Driver 2

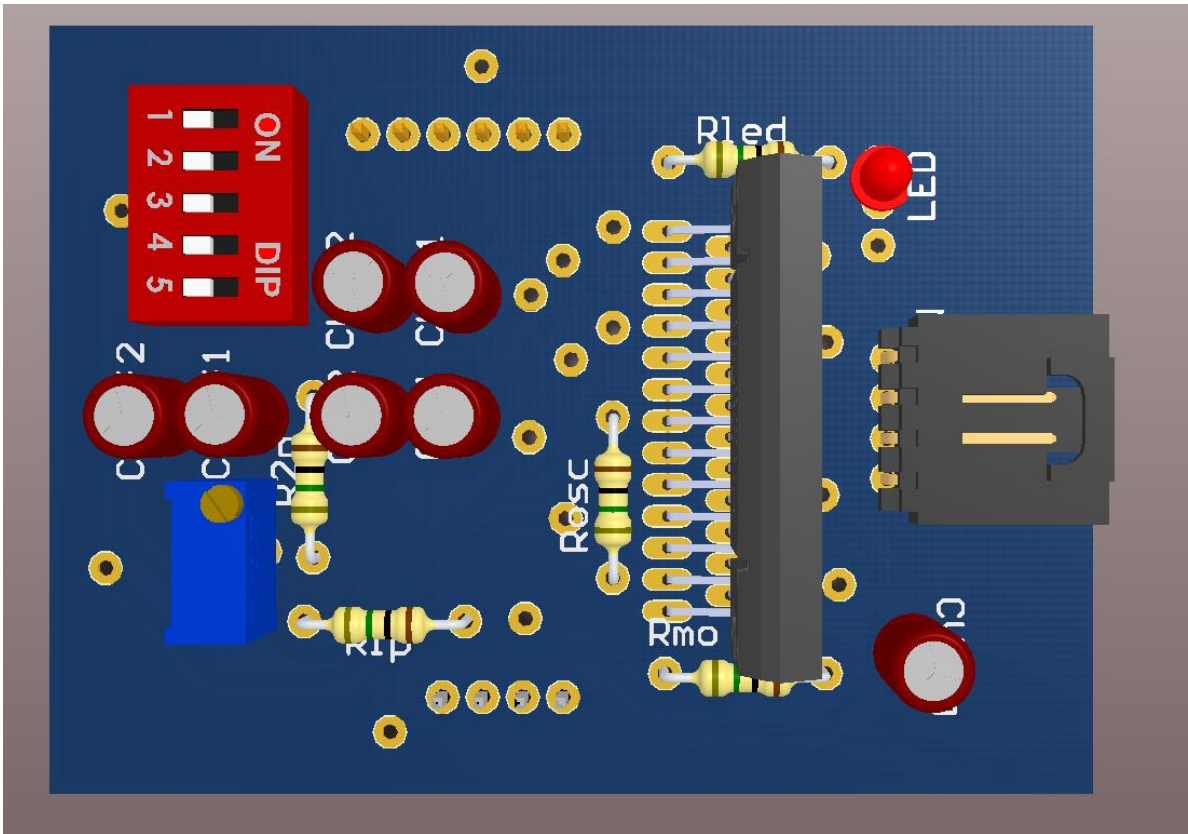


Figura 3-11. Vista TOP bloque Driver

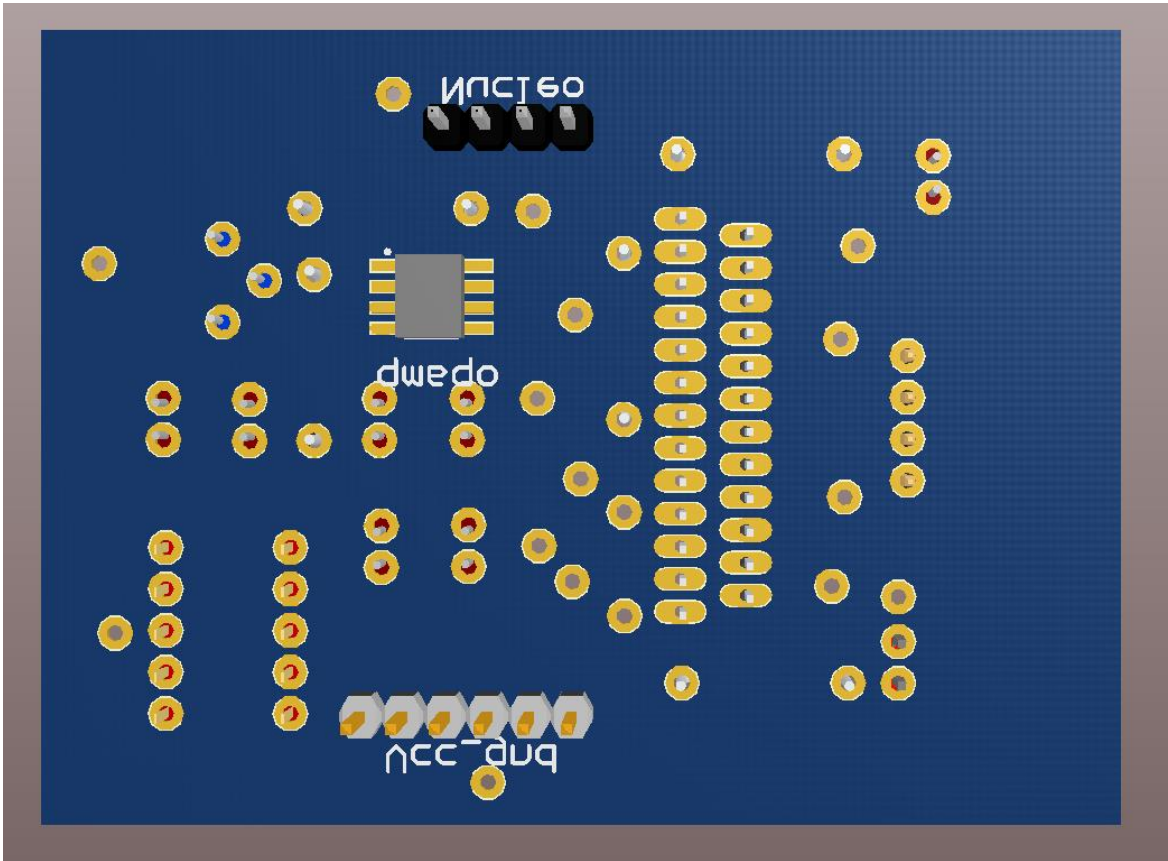


Figura 3-12. Vista BOTTOM bloque Driver

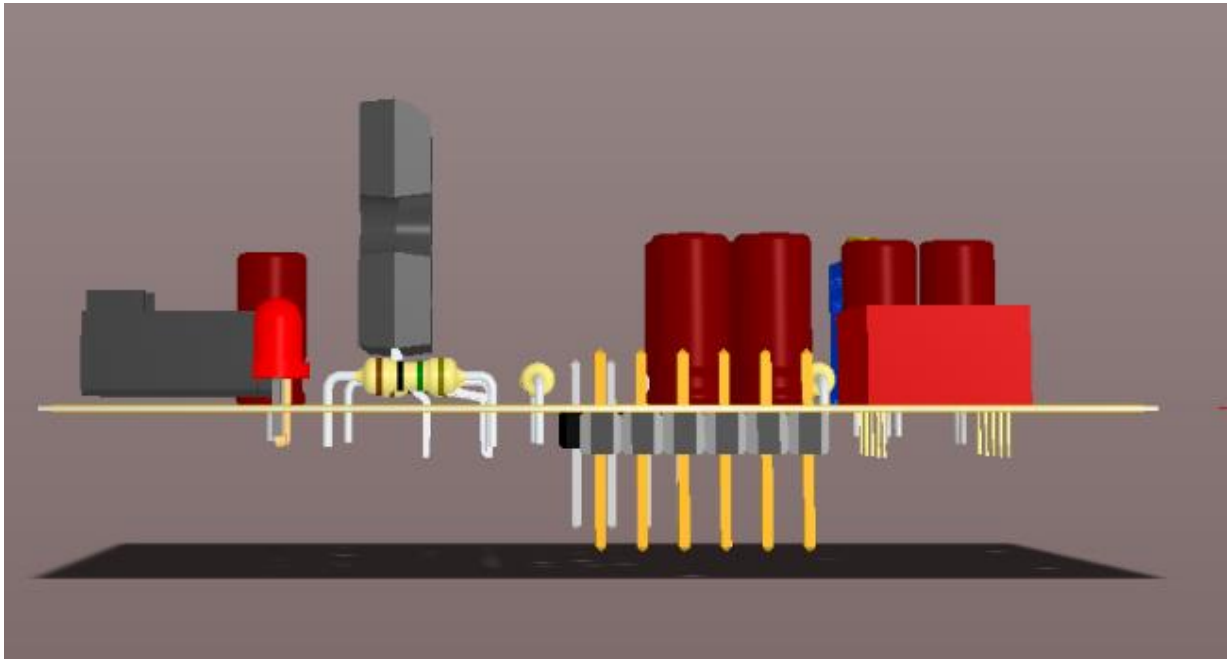


Figura 3-13. Vista lateral bloque Driver

4 BLOQUE HEATER

En esta sección, de la misma forma que en la anterior, se va a explicar en detalle la topología y fundamento de funcionamiento del bloque Heater, desde el esquemático hasta su modelo en PCB. Y en la misma línea, se comienza explicando la primera propuesta de esquemático, y sus resultados en las pruebas realizadas en una PCB de pruebas. Tras la descripción de los problemas encontrados se exponen las soluciones adoptadas. Finalmente, se mostrará el resultado final del circuito tanto a nivel esquemático como a nivel real con una simulación en 3D.

Esquemático. 1ª propuesta

El primer esquemático propuesto consta de dos circuitos separados entre sí.

El circuito de acondicionamiento del calentador se encuentra en la parte superior de la Figura 4-1. El calentador denotado por el nombre HEATER, en el esquemático, es nuestro actuador en el sistema de control de temperatura y se modela como una resistencia que consume 25W si se alimenta a 12 voltios. Este suministra energía al extrusor, disipando calor en su resistencia interna.

En la parte inferior de la figura se ve el circuito acondicionador del Termistor, el sensor de temperatura de este sistema.

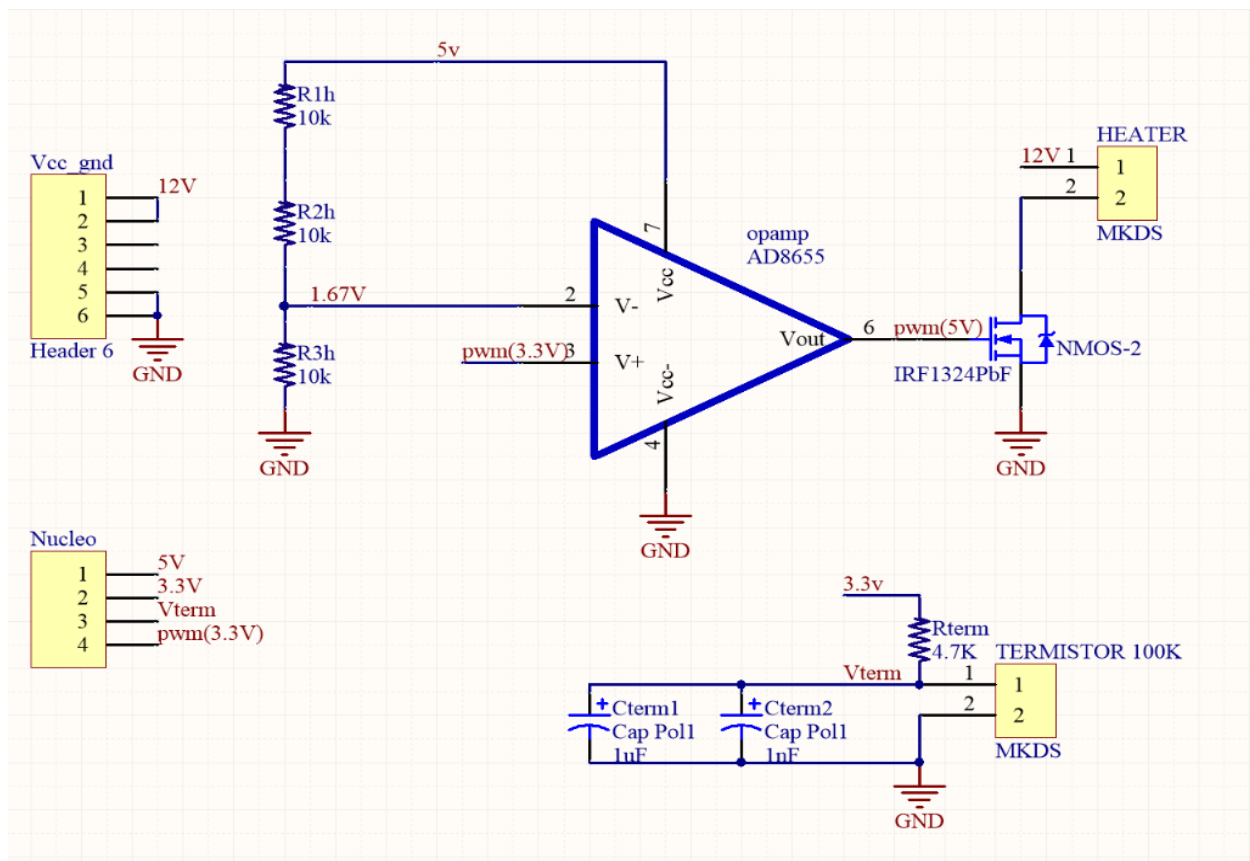


Figura 4-1. Primer esquemático propuesto. Bloque Heater

El funcionamiento de cada circuito se explica a continuación.

Acondicionamiento del calentador:

El calentador (HEATER) es esencialmente una resistencia muy baja diseñada para disipar calor, en concreto consume 25W si se le aplican 12V como podemos ver en su datasheet en el anexo B. Para controlar la energía

suministrada se va a utilizar una señal de pwm. De manera que controlando el Duty cycle de dicha señal, es decir, el tiempo que está en nivel alto con respecto a su periodo se controla la energía que se le proporciona al calentador.

Para permitir y denegar el paso de corriente por el calentador con la señal pwm se ha puesto un transistor Mosfet de potencia, modelo IRF1324PbF, como se ve en la figura 4-1.

De forma que:

- Si el Mosfet se encuentra en la zona activa la caída de tensión V_{ds} para el valor de V_{gs} de 5 voltios es muy pequeño comparado con los 12 voltios de alimentación, Entonces se puede suponer que, si el Mosfet esta polarizado en la región activa el calentador presenta una caída de potencial de 12 voltios entre sus dos terminales y, por tanto, circula la corriente a través de él.
- Si el Mosfet está en región de corte ($V_{gs} = 0$ V), el transistor no permite el paso de corriente por la rama y eleva la caída de tensión V_{ds} a 12V. En este caso el transistor equivaldría a un circuito abierto, denegando así el paso de corriente por la rama.

Como se puede comprobar en el datasheet del Mosfet (Anexo B), se necesita una caída de tensión V_{gs} mayor que 4V para llegar a la zona activa. Como el microcontrolador, que es el que aporta la señal de pwm, tiene limitada sus salidas de 0 a 3.3V se ha tenido que implementar un circuito de amplificación al rango 0 a 5V, que trabaja como driver de la puerta del Mosfet.

Se ha elegido el valor de 5 Voltios en la tensión de polarización de la puerta del Mosfet para aprovechar la regulación de tensión de 12 a 5 Voltios que es necesaria para alimentar el microcontrolador de forma externa, y teniendo en cuenta que, para $V_{gs}=5$ V la caída de tensión entre drenador y puerta del Mosfet es muy pequeña.

Básicamente, el driver de la puerta del Mosfet es un comparador que detectará cuando la señal pwm del micro sea mayor que 1.67 voltios, es decir, cuando el pwm este en nivel alto, y la amplificará hasta 5V. Si la señal pwm está a nivel bajo, el comparador detectará que es menor de 1.67V e impondrá 0 voltios a la puerta del transistor.

Este efecto se puede observar en la siguiente captura del osciloscopio donde la gráfica amarilla es el pwm a 3.3V y la gráfica verde es la salida del comparador, que es un pwm a 5V.

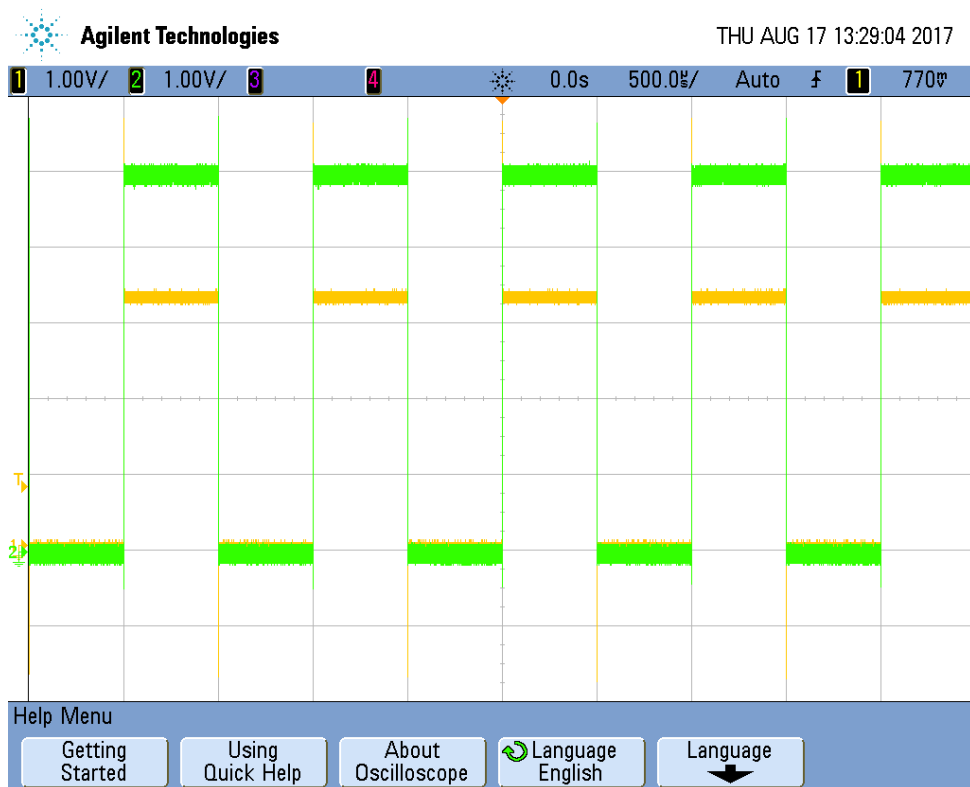


Figura 4-2. Amplificación del pwm de 3.3V a 5V

Este resultado se consigue por alimentar el amplificador operacional AD8655 entre 5 y 0 voltios. El punto de comparación 1.67V se ha conseguido con un divisor de tensión con las resistencias R1h, R2h y R3h que se han elegido de 10 KOhm cada una.

El efecto completo es la transformación de la señal pwm de 3.3V al pwm en 12V en el calentador se muestra en la siguiente captura del osciloscopio. En verde la señal pwm a 3.3V y en amarillo la señal pwm a 12V del transistor. Hay que tener en cuenta que cuando en el transistor caigan 0V en el calentador caerán 12V, es decir, lo que ve el calentador es el negado de la señal amarilla.

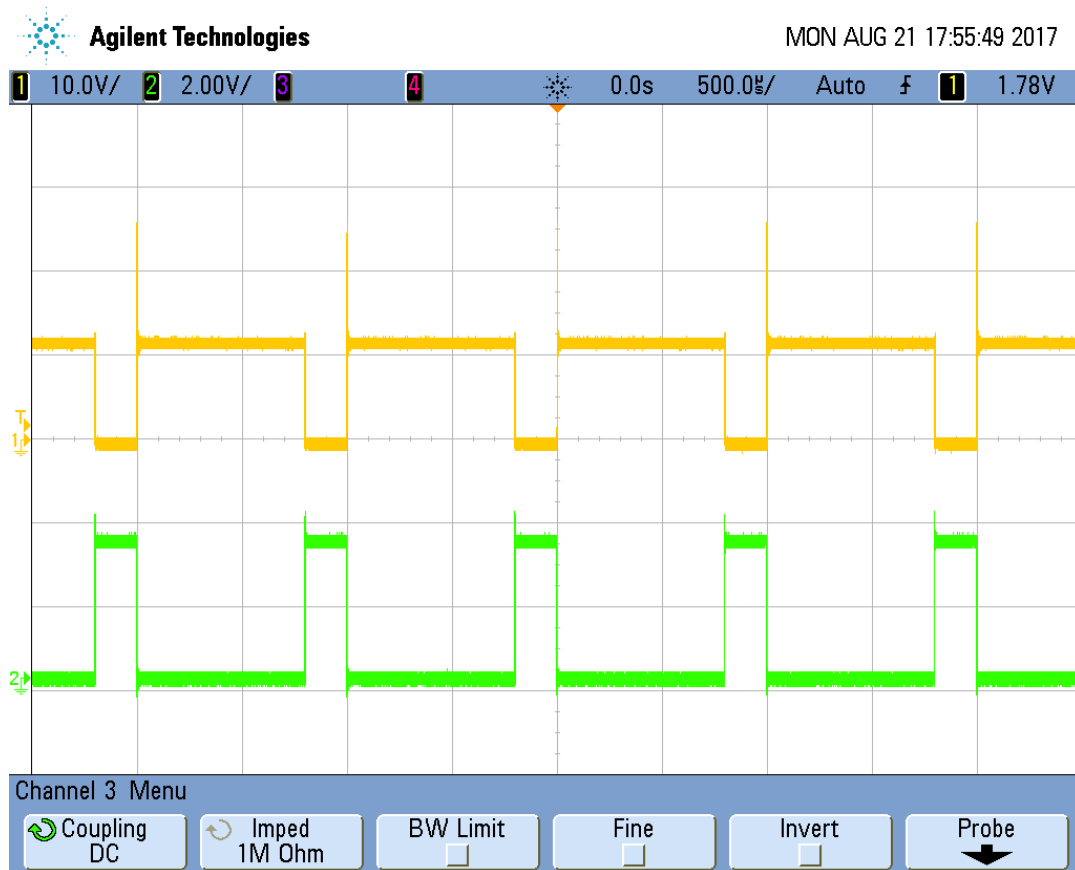


Figura 4-3. Amplificación del pwm de 3.3V a 12V

Acondicionamiento del Termistor:

El termistor disponible es de la familia NTC 100K 3950. NTC refleja el comportamiento del termistor con el aumento de temperatura, en nuestro caso la resistencia del termistor disminuye con la temperatura. Y la cifra 3950 define la temperatura característica del material y marca el modo de evolución exponencial de la resistencia del termistor.

El modelo teórico del termistor se rige por la ecuación:

$$R_t = R_o \cdot e^{-B \cdot (\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T})}$$

Ecuación 4-1. Resistencia del termistor en función de la temperatura (genérica)

Donde;

- $R_t(\text{Ohm})$ es la resistencia en ohmios del termistor a la temperatura actual.
- $B(\text{K})$ es la temperatura en grados Kelvin característica del material.
- $R_o(\text{Ohm})$ la resistencia en ohmios del material a la temperatura nominal.
- $T_o(\text{K})$ es la temperatura nominal en grados Kelvin.
- $T(\text{K})$ es la temperatura del termistor.

En nuestro caso, los parámetros constantes de la ecuación valen:

$$R_0 = 100 \text{ K}\Omega$$

$$T_0 = 298 \text{ K (25 °C)}$$

$$B = 3950 \text{ K}$$

Con lo que nos queda la ecuación que muestra el comportamiento de la resistencia con la temperatura.

$$R_t = 100 \cdot 10^3 \cdot e^{-3950 \cdot (\frac{1}{298} - \frac{1}{T})}$$

Ecuación 4-2. Resistencia del termistor en función de la temperatura para termistor NTC 100K 3950

Esta ecuación representa los valores de resistencia dependiendo de la temperatura, si se plasma esta ecuación en una gráfica resulta la siguiente gráfica.

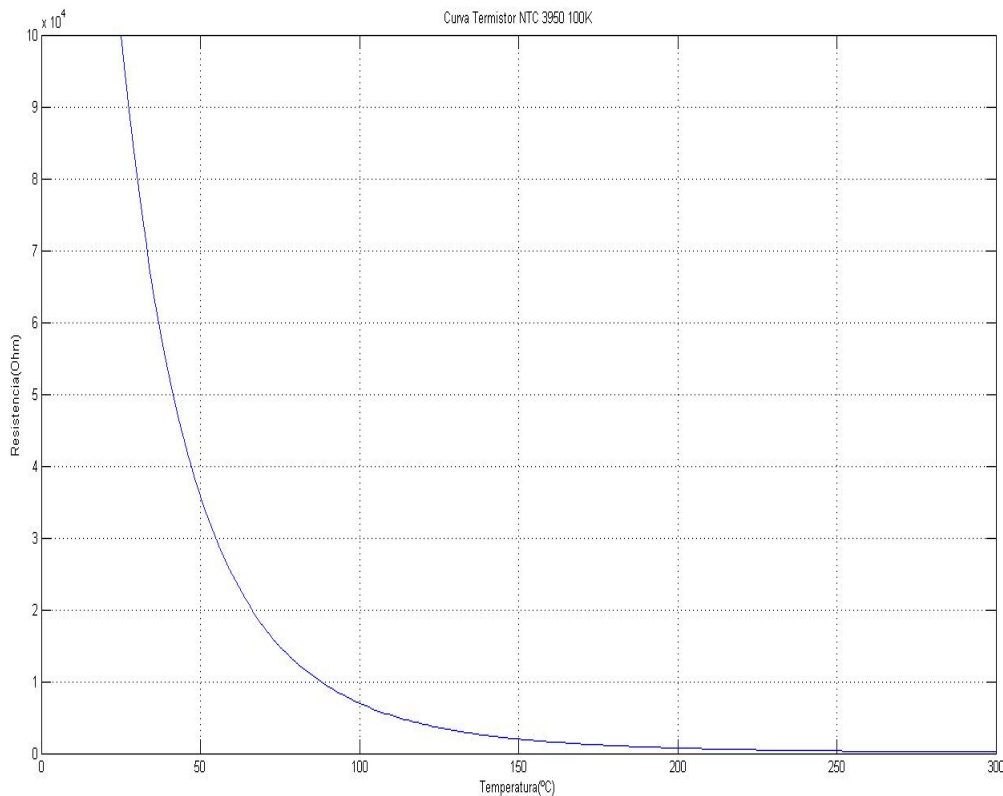


Figura 4-4. Curva teórica de resistencia en función de la temperatura del termistor NTC 100K 3950

La resistencia que acompaña al termistor es escogida para maximizar el rango en tensión V_{term} , además de, limitar la corriente para que el termistor no se sobrecaliente. La resistencia R_{term} de valor 4.7 K Ω limita la corriente a la escala del miliamperio, luego consigue que la corriente que atreviese el termistor no lo sobrecaliente, además de, conseguir un rango que abarque temperaturas de 200°C. Este rango de temperaturas comprende a la temperatura de fusión de plásticos como el PLA, entre 190°C y 200°C, ampliamente utilizado en impresoras 3D.

Con esta configuración la caída de tensión en el nodo V_{TERM} está regida por la ecuación:

$$V_{term} = \frac{R_t}{R_t + 4.7 \cdot 10^3} \cdot 3.3$$

Ecuación 4-3. Caída de tensión en el termistor en función de la resistencia del termistor

Dicha ecuación no es más que un divisor de tensión de la rama, que muestra la caída de tensión en el termistor. Esta rama se alimenta a 3.3V, esto se debe a que, la entrada analógica del microcontrolador solo permite valores de tensión de 0 a 3.3V.

Si incluimos la ecuación 4-1 en la ecuación 4-2, nos resulta una ecuación que muestra la caída de tensión en el nodo V_{TERM} en función de la temperatura T y tiene el comportamiento que se muestra en la Figura 4-3.

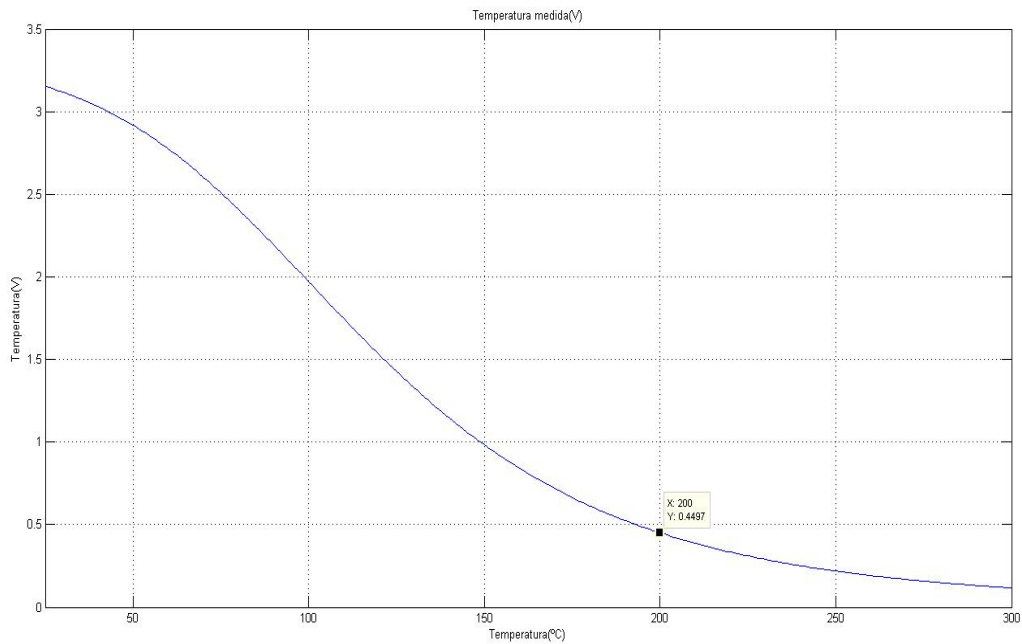


Figura 4-5. Caída de tensión V_{term} en función de la temperatura T

Como se puede observar en la gráfica, el rango de precisión está comprendido entre unos 50°C hasta 220°C, aproximadamente. Este rango comprende la temperatura de fusión del PLA.

Para terminar, las capacidades CVTERM1 y CVTERM2 tienen el fin de estabilizar el nodo VTERM disminuyendo las componentes de alta frecuencia.

Resultados en PCB de prueba

Como se hiciera en el capítulo anterior, en esta sección se explican los problemas más importantes encontrados en el diseño del esquemático del bloque Heater, mostrado en la sección anterior. Para realizar los ensayos se diseñó en Altium una PCB de pruebas pensada para conectarla de forma sencilla a las fuentes del laboratorio y al microcontrolador.

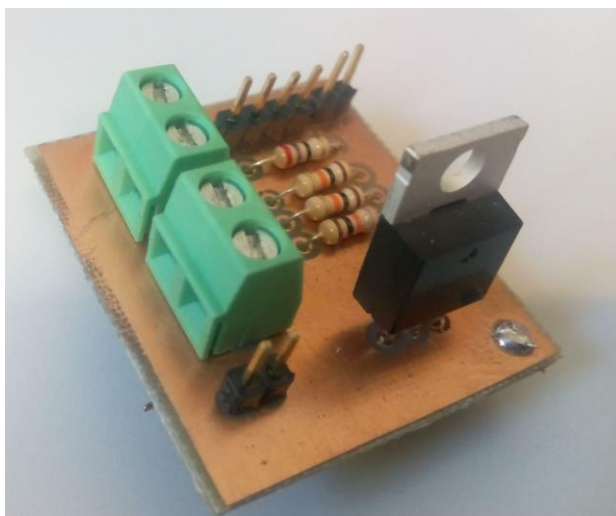


Figura 4-6. PCB HEATER para pruebas (Vista 1)

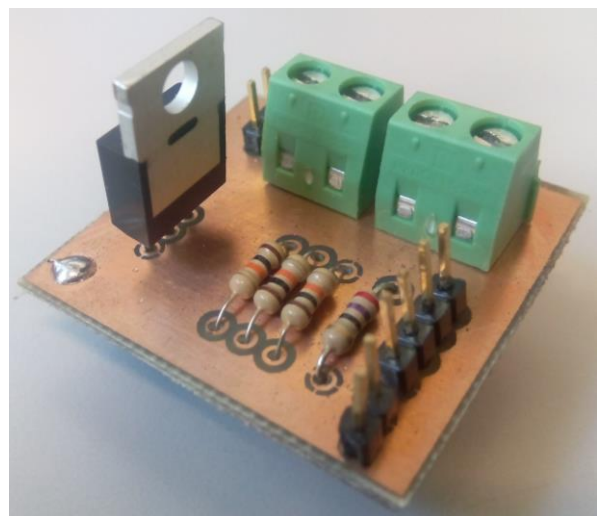


Figura 4-7. PCB HEATER para pruebas (Vista 2)

4.1.1 Problemas encontrados

El problema más trascendental encontrado en este bloque tiene que ver con la conmutación a OFF del transistor Mosfet de potencia. Si observamos con detenimiento la Figura 4-3, de la sección anterior, se ve como en el pwm amarillo correspondiente a la caída de tensión V_{ds} del transistor tiene un pico al principio de cada nivel alto. Si se amplía la imagen en esta zona se ve como el transitorio de la conmutación del transistor tiene una sobreoscilación bastante brusca. El pico de esta sobreoscilación duplica el valor máximo del pwm, alcanzando incluso el valor de saturación de tensión de alimentación de la fuente, 25V, en este caso. Si el límite de la fuente fuera mayor, este pico sería incluso superior.

Este efecto es indeseable, debido a, la subida de tensión que conlleva. Esta subida de tensión podría superar la tensión de ruptura del transistor afectando a su funcionamiento.



Figura 4-8. Sobreoscilación en el disparo del Mosfet

Para subsanar este efecto se pretende hacer que el disparo del transistor sea más suave. La solución adoptada, que se explicará en el siguiente apartado. Esta ha sido integrar una red compensación Snubber que consiga ralentizar el transitorio de disparo del Mosfet.

4.1.2 Soluciones adoptadas

Cuando se conmuta a OFF un transistor conectado a una carga inductiva con una componente resistiva pequeña aparecen una serie de oscilaciones como las que se han mostrado en el apartado anterior.

En este caso, la componente resistiva pequeña corresponde al calentador y la componente inductiva corresponde a la inductancia parásita de los cables. La inductancia parásita de los cables, que son bastante largos, ya que, deben conectar la placa al extrusor de la impresora 3D, no se puede despreciar, esto se demostrará al final de este apartado.

Para disminuir este efecto se ha diseñado una red Snubber que consta de una resistencia (R_{sn}) en serie con un

condensador (Csn) puesto en paralelo con la capacidad parásita del transistor. De esta manera, se busca conseguir una oscilación crítica y disminuir la frecuencia de oscilación al añadir más capacidad.

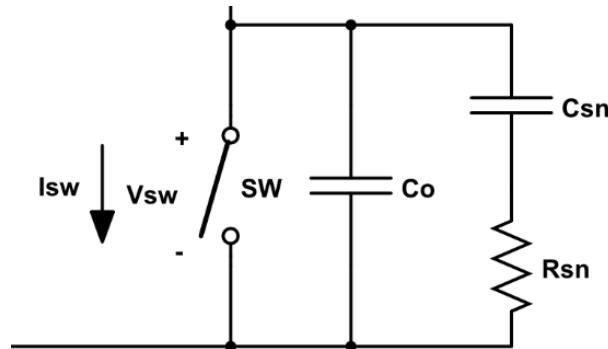


Figura 4-9. Red Snubber

Como no sabemos los valores de inductancia de pérdidas ni la capacidad parásita, añadimos un condensador (Co) adicional en paralelo con el transistor con un valor de capacidad que reduzca la frecuencia de oscilación a una fracción de la original. La siguiente gráfica muestra la oscilación en la caída de tensión Vds, en amarillo, tras añadir la capacidad Co, que se ha elegido de valor 100 nF.

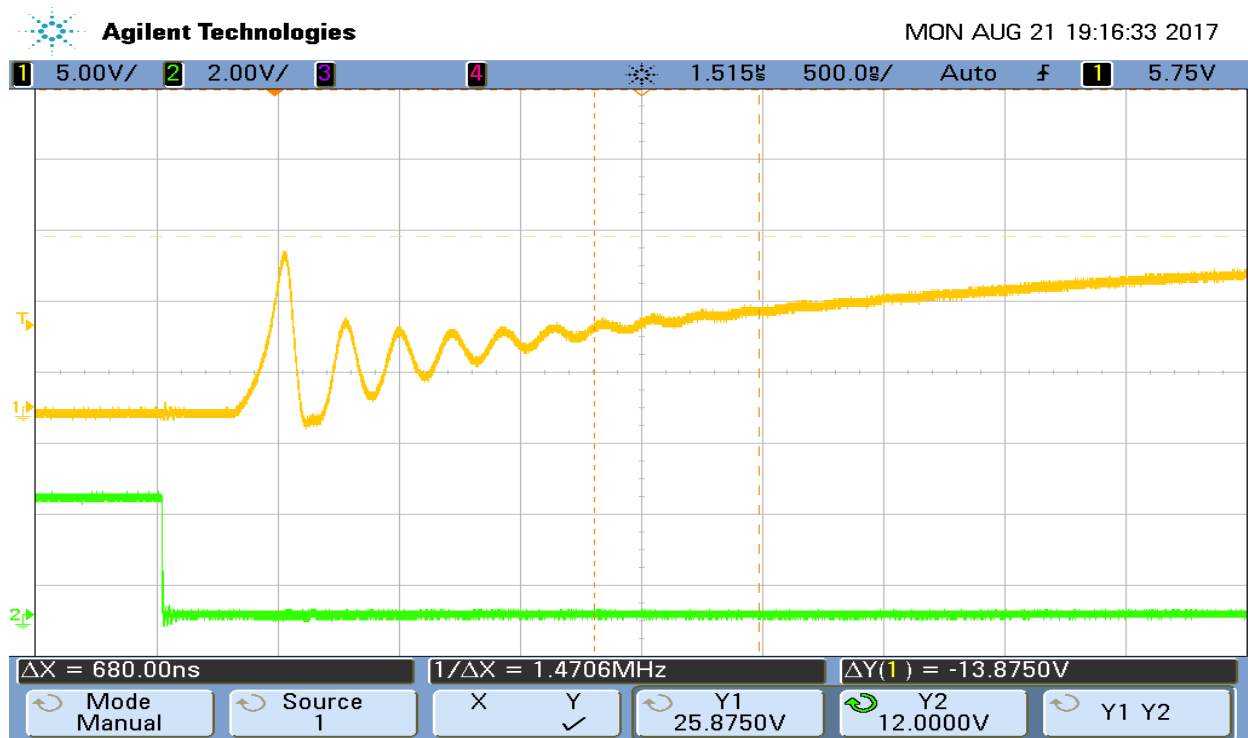


Figura 4-10. Oscilación en el disparo del Mosfet con Co (100 nF) en paralelo

La frecuencia de oscilación con la capacidad Co es:

$$F_o = \frac{1}{245 \text{ ns}} = 1.47 \text{ MHz} \quad \rightarrow \quad \omega_o = 25.65 \cdot 10^6 \text{ Rad/s.}$$

La frecuencia característica de las oscilaciones de la señal original es:

$$F_{sn} = \frac{1}{680 \text{ ns}} = 1.47 \text{ MHz} \quad \rightarrow \quad \omega_{sn} = 9.24 \cdot 10^6 \text{ Rad/s}$$

De esta manera:

$$\omega_{sn} = \frac{1}{\sqrt{L_d \cdot C_{tot}}} = \frac{\omega_o}{F} = \frac{1}{F \cdot \sqrt{L_d \cdot C_o}} \rightarrow F = \frac{\omega_o}{\omega_{sn}} = \frac{35.65 \cdot 10^6}{9.24 \cdot 10^6} = 2.775$$

Ecuación 4-4. Relación de frecuencia sin condensador Co y con condensador Co

Donde F es la relación entre la frecuencia de oscilación sin condensador adicional y la frecuencia de oscilación con condensador.

De aquí encontramos que:

$$C_{sn} = F^2 \cdot C_o = 2.775^2 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 770 \text{ nF}$$

Ecuación 4-5. Relación de entre las capacidades Co y Csn

Y la inductancia de pérdidas:

$$L_d = \frac{1}{C_o * W_o^2} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-9} * W_o^2} = 152 \text{ nH}$$

Ecuación 4-6. Inductancia parásita

Para conseguir amortiguamiento crítico, la resistencia que tenemos que poner debe tener el valor:

$$R_{sn} = F \cdot \sqrt{\frac{L_d}{C_{tot}}} = 2.775 \cdot \sqrt{\frac{152 \text{ nH}}{100 \text{ nF} + 770 \text{ nF}}} = 1.16 \text{ Ohm}$$

Ecuación 4-7. Resistencia Red Snubber

Donde Ctot es aproximadamente Co+Csn.

Teniendo diseñada la red Snubber de amortiguamiento, se comprueba el resultado en el osciloscopio y se puede observar que se ha conseguido un amortiguamiento crítico en la conmutación a OFF del MOSFET.

Este resultado no es ideal. No obstante, la tensión Vds no corre el riesgo de alcanzar la tensión de ruptura del transistor, y así, se evita la posibilidad de que resulte dañado.

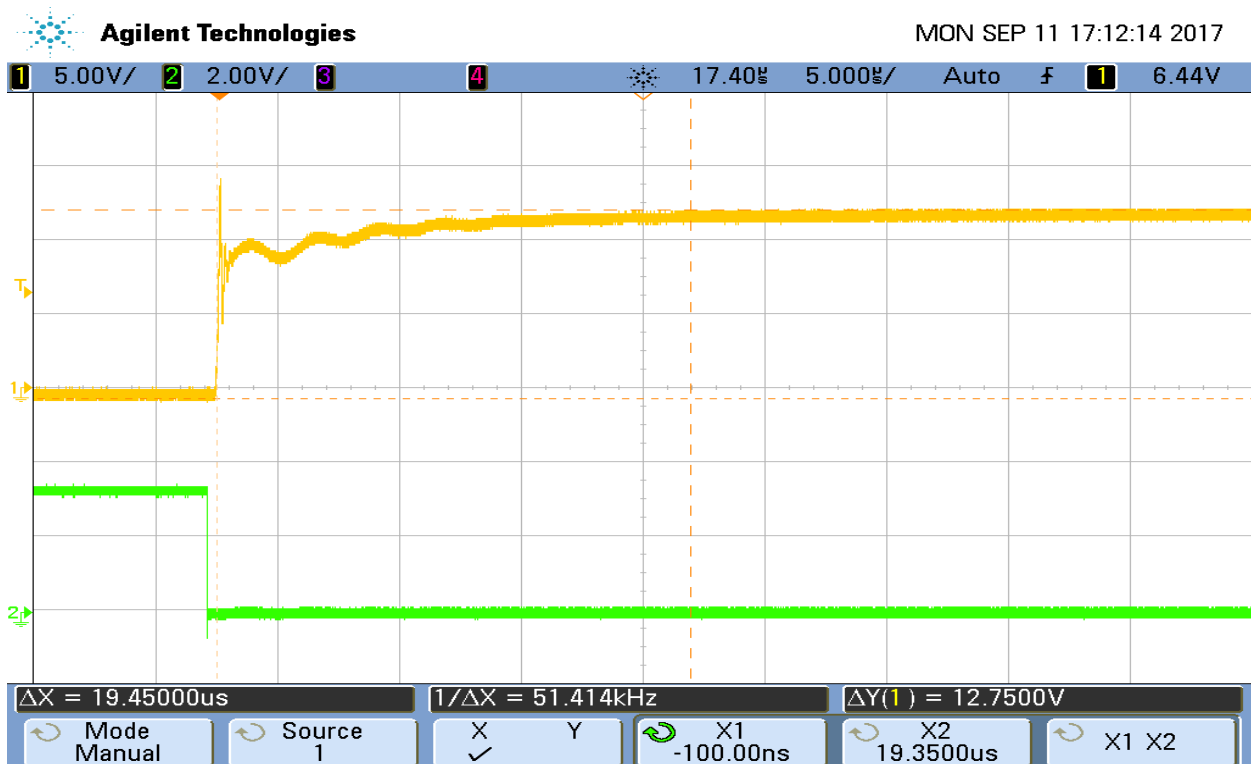


Figura 4-11. Amortiguación en la conmutación del MOSFET con red Snubber

Como se comenta al principio del apartado, la inductancia parásita de los cables no es despreciable. Esto se demuestra de la siguiente manera:

La inductancia parásita de los cables calculada previamente es: $L_d = 152 \text{ nH}$

La variación de corriente en el punto de conmutación es, aproximadamente, la potencia característica del

calentador consumida cuando se alimenta a 12V, entre los propios 12V (ver datasheet del calentador):

$$dI = \frac{P_{heater}}{V_{heater}} = \frac{25W}{12V} = 2.08 A$$

Ecuación 4-8. Variación de corriente en la conmutación del MOSFET

Y la variación de tiempo en la conmutación es, aproximadamente, 10 ns (Ver datasheet del microcontrolador).

Si se aplica la ecuación de la inductancia ampliamente conocida:

$$\Delta V = \frac{dI}{dt} \cdot L_d = \frac{2.08 A}{10ns} \cdot 152 nH = 31.610V$$

Ecuación 4-9. Variación de tensión en la conmutación del MOSFET

En la captura del osciloscopio (Figura 4-8) el pico plano de tensión es de 25V, pico plano que corresponde al valor máximo que puede suministrar la fuente. Debido a este contratiempo en la medida, no se puede demostrar que el pico de sobreoscilación al conmutar el transistor en este punto sea el teórico calculado en la ecuación.

No obstante, el valor teórico calculado supera al valor de saturación. Por tanto, la sobreoscilación con pico plano observada se ha achacado al carácter inductivo de los cables. En consecuencia, se ha implementado la red de compensación RC llamada Snubber con satisfactorio resultado, como se puede ver, en la Figura 4-12.

Esquemática versión final

Teniendo en cuenta las modificaciones estudiadas en el apartado anterior, que son la adición de la red de amortiguamiento Snubber. La versión final del esquemático del bloque Heater es el mostrado en la siguiente figura.

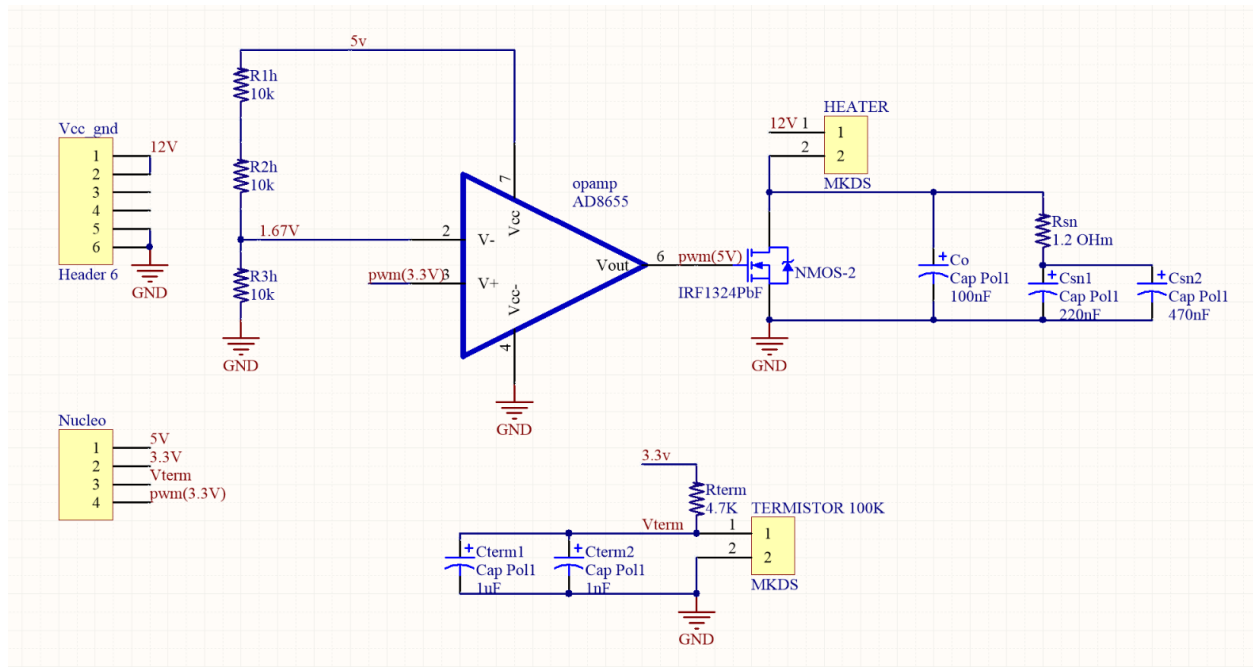


Figura 4-12. Versión final del esquemático del bloque HEATER

La capacidad Csn de valor 770nF no se comercializa, la aproximación a este valor de capacidad se ha conseguido con el paralelo de las capacidades Csn1=220 nF y Csn2=470 nF. Esto hace un total de 790 nF.

Como se hiciera con el bloque driver este bloque también ha sido diseñado para poder clavarlo en la placa general, los bloques Nucleo y Vcc_gnd son estos pines. En ellos se encuentran las diferentes tensiones de alimentación de las diferentes partes del circuito, la tierra, la entrada PWM(3.3V) y la salida del valor en tensión de la temperatura del termistor VTERM.

PCB versión final

La huella generada del circuito, de dimensiones 48.9x66,04 mm², correspondiente al bloque Heater son las siguientes:

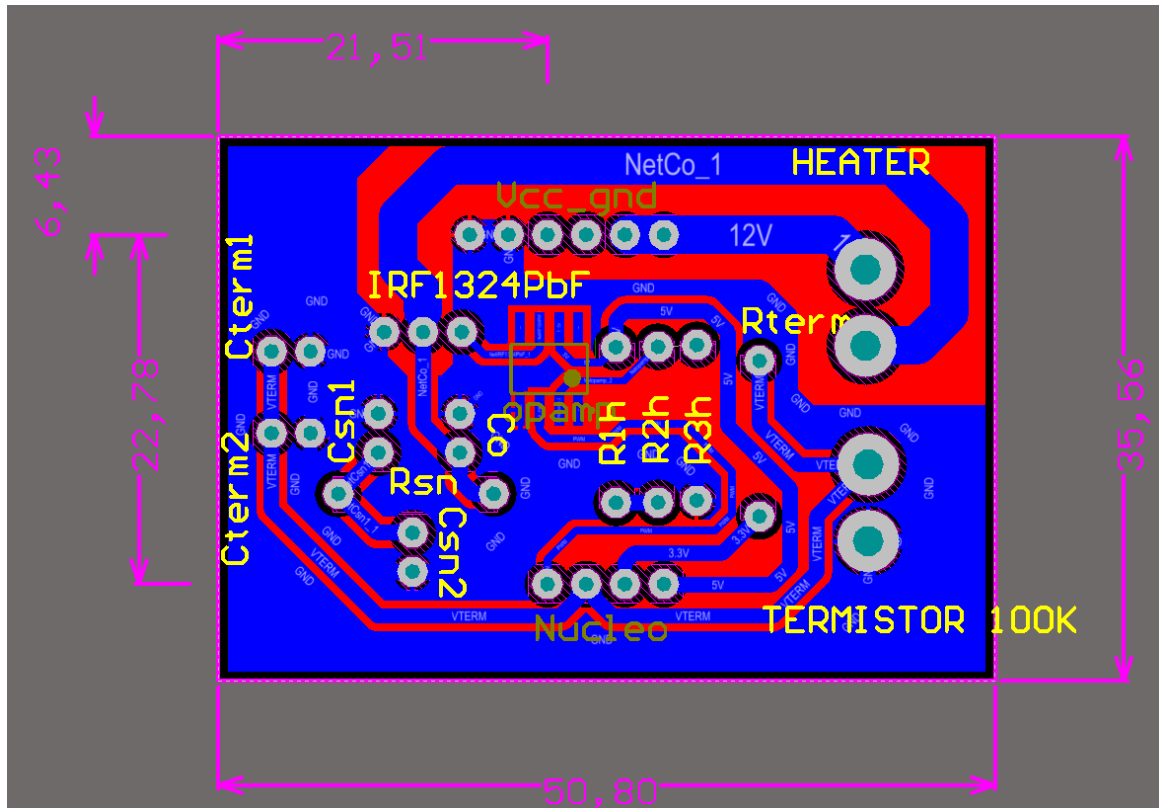


Figura 4-13. Bottom bloque Heater

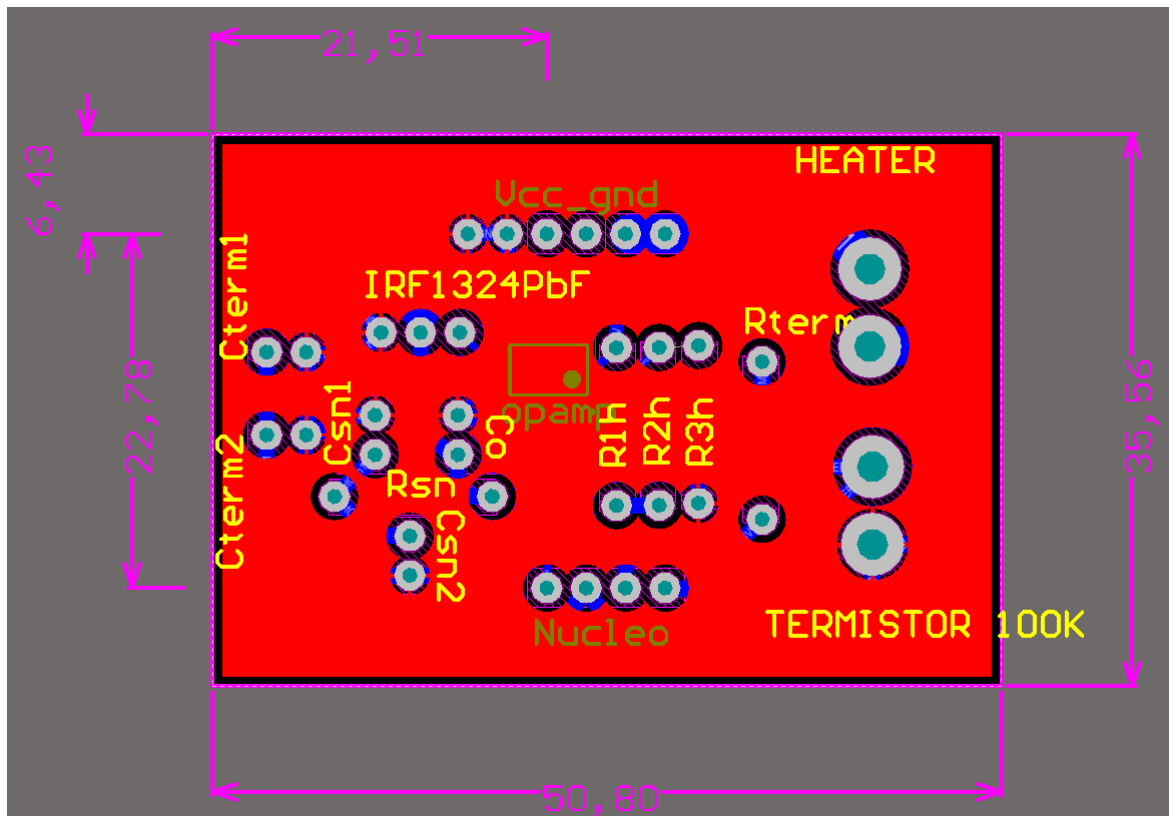


Figura 4-14. Top bloque Heater

En la vista 3D de las siguientes figuras se puede corroborar que en el Bottom de la placa dispone de pines con los que obtiene la alimentación y las señales de control del microcontrolador. Igualmente, que para el bloque Driver, estos pines se han colocado de esta manera para que esta placa pueda ser clavada en un zócalo de la placa general, y así, ser sustituible en caso de que el circuito tenga algún defecto o se estropee del uso.

A continuación, y para finalizar esta sección, diferentes vistas de la pcb diseñada en el modelo 3D de Altium.

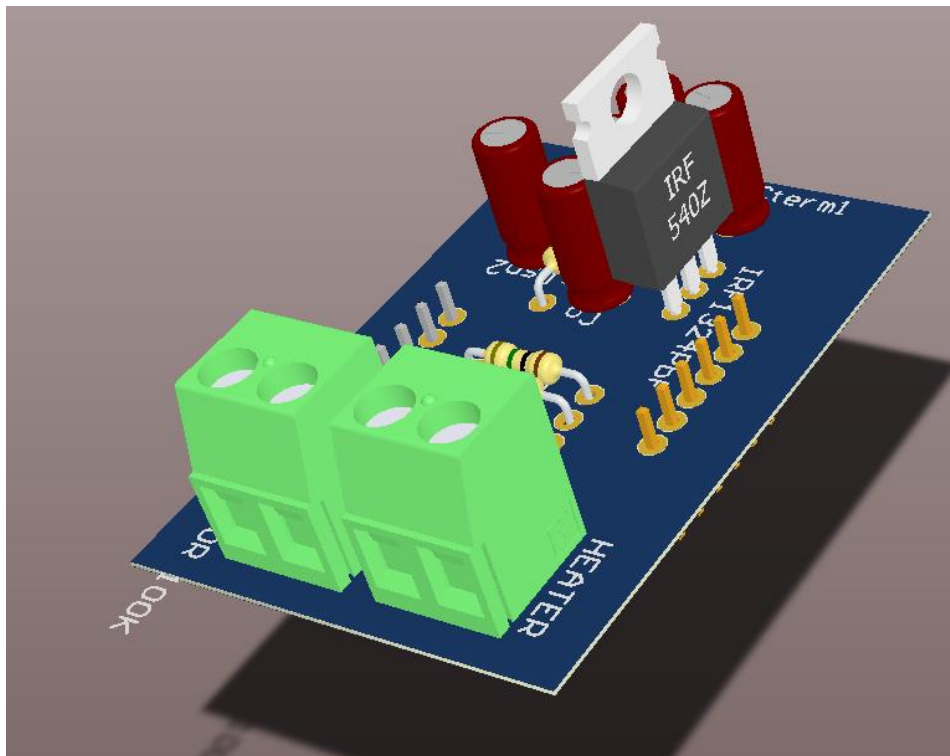


Figura 4-15. Vista 3D bloque Heater 1

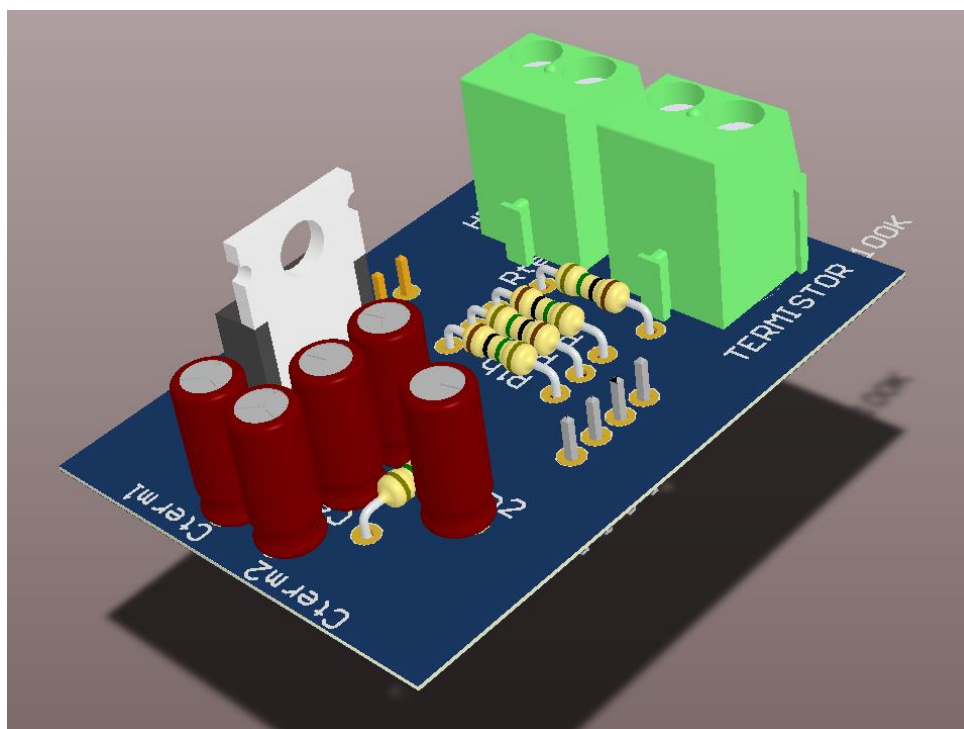


Figura 4-16. Vista 3D bloque Heater 2

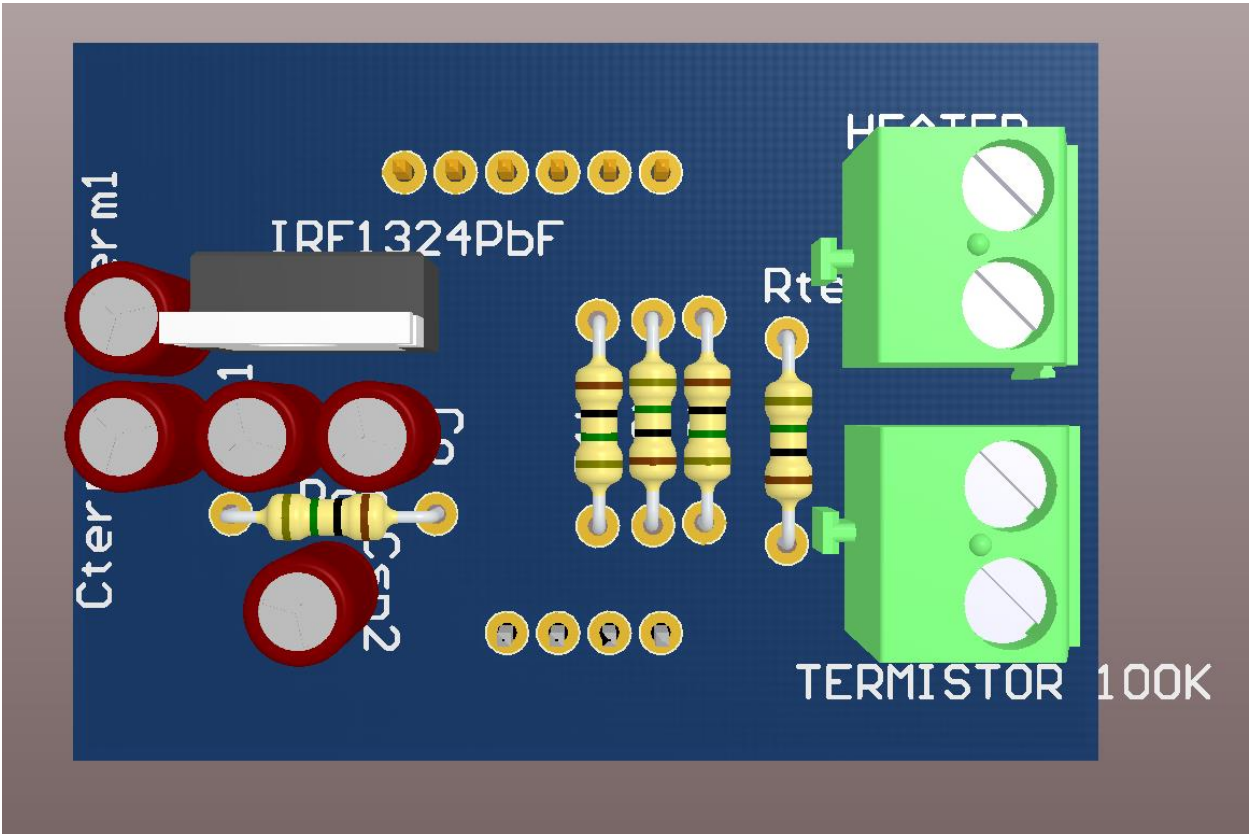


Figura 4-17. Vista 3D Top bloque Heater

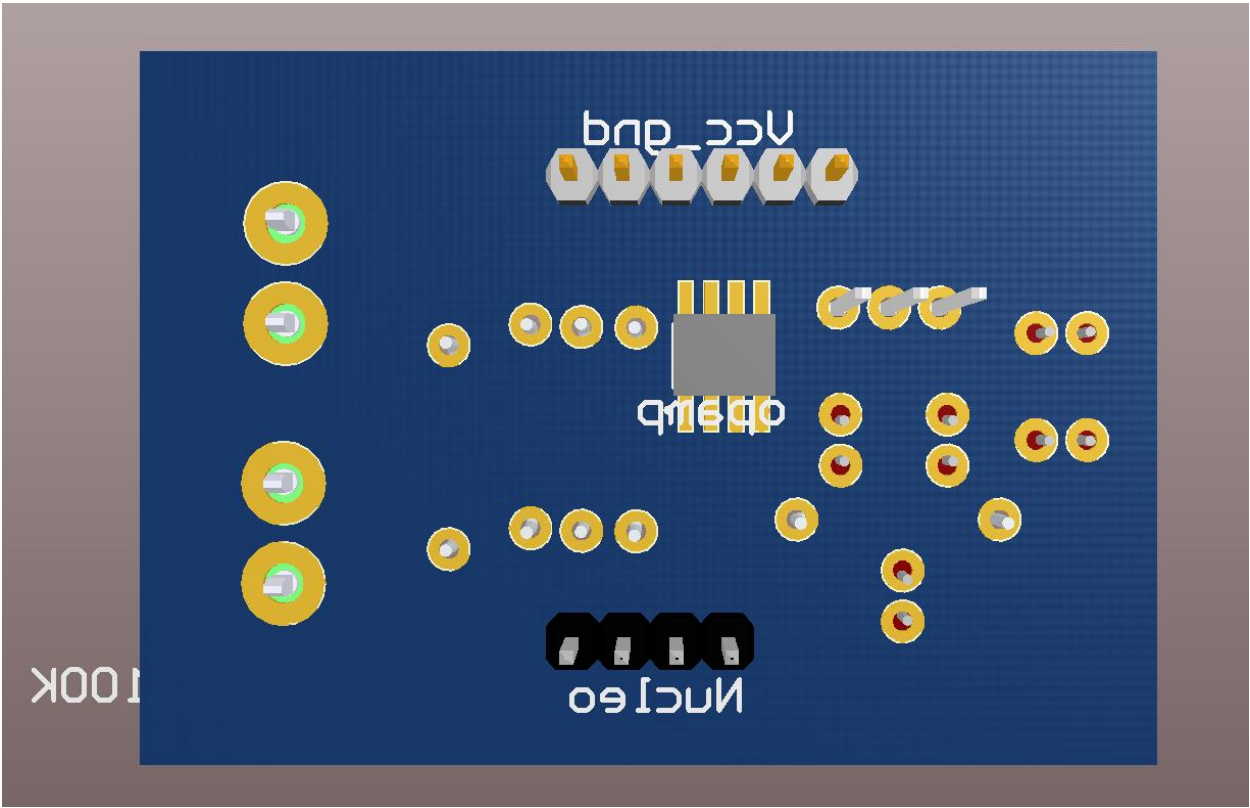


Figura 4-18. Vista 3D Bottom bloque Heater

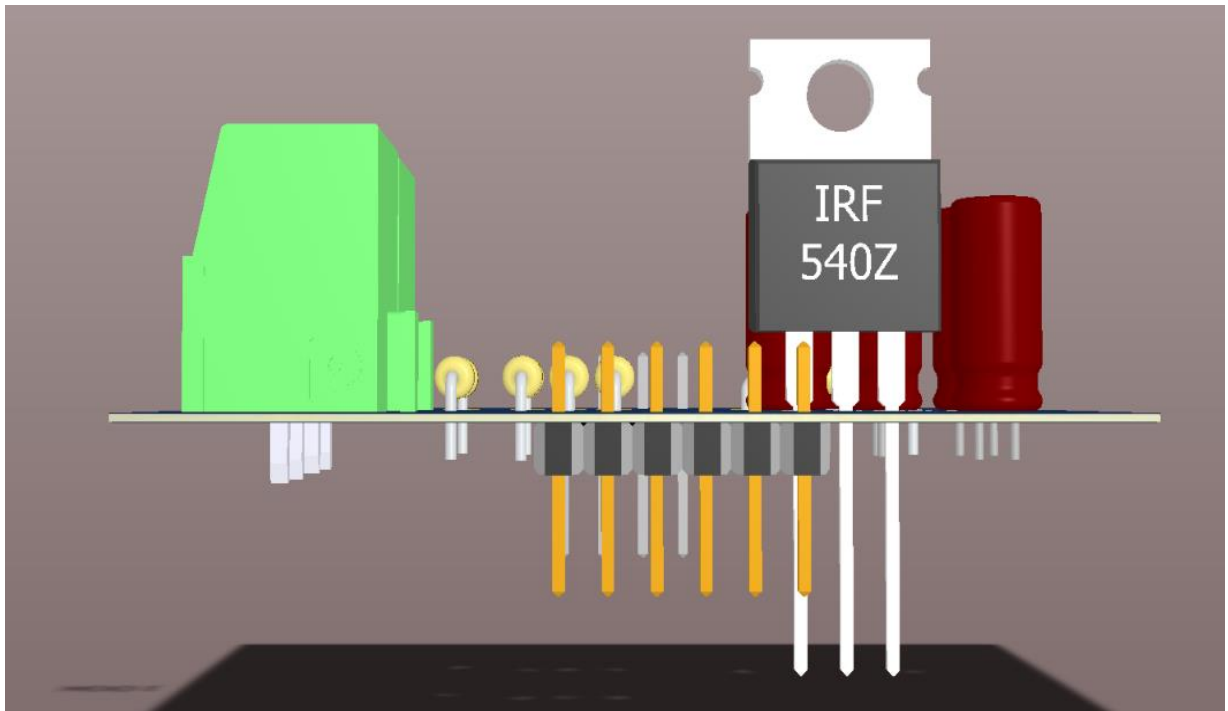


Figura 4-19. Vista lateral bloque Heater

5 BLOQUE NUCLEO

Este bloque está compuesto por el microcontrolador STM32 F103RB cuyo datasheet se encuentra en el anexo B. El microcontrolador se encarga del control de los bloques Driver y Heater.

El control del bloque Driver es muy sencillo e inmediato, puesto que solo tiene que controlar tres salidas digitales. Como se comenta en las especificaciones del proyecto, la placa solo debe ser capaz de mover los motores.

El control del bloque Heater es algo más complejo, puesto que, se tiene que controlar la temperatura del extrusor. Este sistema analógico plantea un problema de control de la temperatura en el que el algoritmo necesario es la incorporación de un controlador PID.

La programación del microcontrolador se ha realizado usando el software online Mbed Compiler.

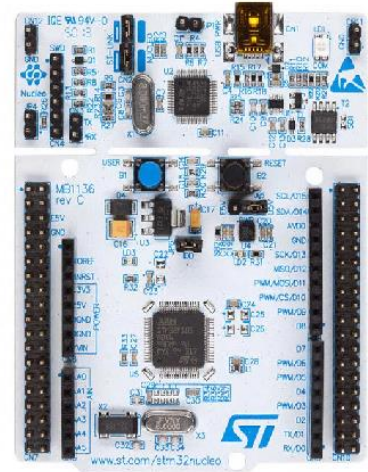


Figura 5-1. Microcontrolador STM32 F103RB

Control bloque Driver

Para demostrar que la placa es capaz de mover el eje del motor correctamente se ha realizado un ensayo con un algoritmo muy sencillo. Este consiste en cinco estados que se han llamado modos (el código utilizado se puede ver en el anexo A). La siguiente imagen corresponde al momento de este ensayo, donde se puede apreciar el montaje con el microprocesador, el circuito acondicionador del driver, el motor y la fuente de alimentación.

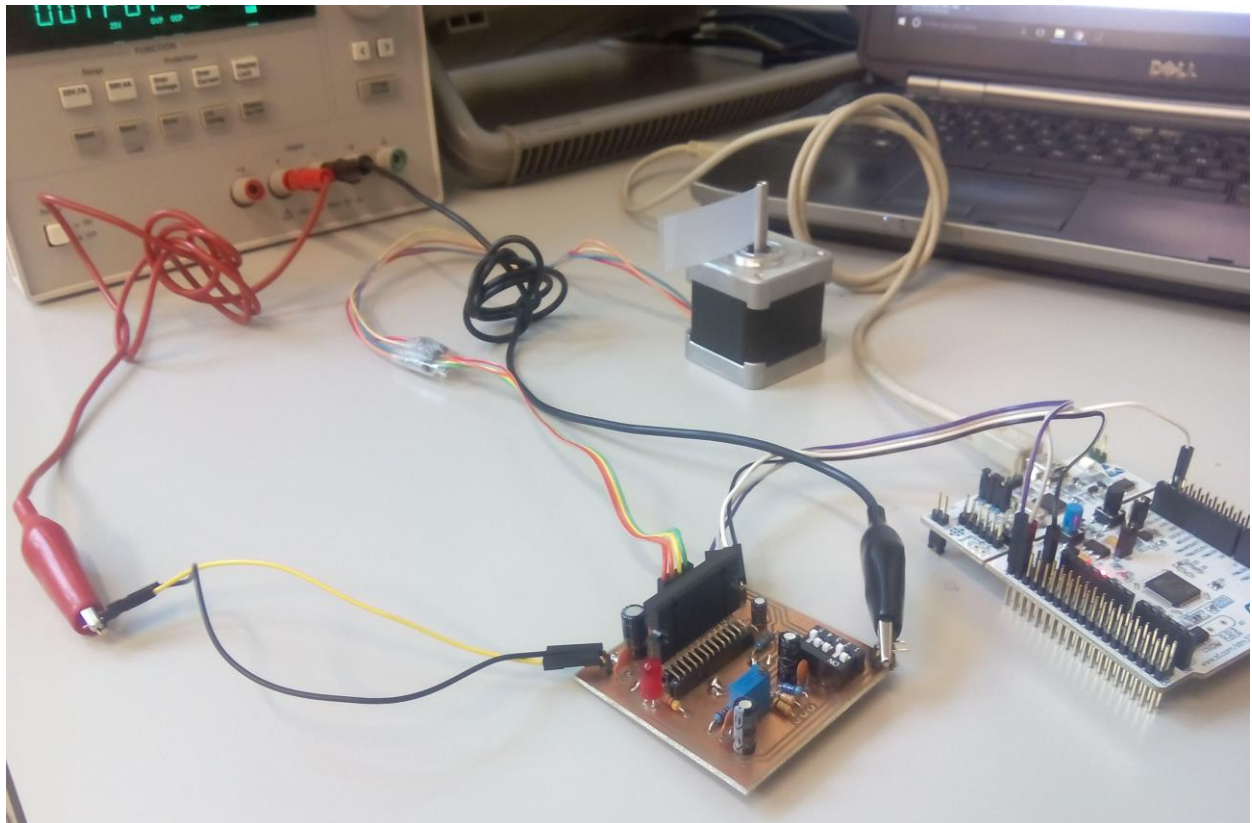


Figura 5-2. Ensayos de control del bloque Driver

Recordemos que el bloque driver tiene tres entradas digitales ENABLE, DIR y CLK. ENABLE se encarga de habilitar el motor, DIR controla la dirección y CLK ejecuta un movimiento en el eje en cada flanco de subida. Con esto, los cuatro estados son:

- MODO 1: En el primer estado el eje está libre, es decir, la señal ENABLE está a nivel bajo.
- MODO 2: En el segundo estado el eje está fijo e inmóvil. Esto se consigue si ENABLE está a nivel alto y en la señal CLK no se realiza ningún flanco de subida.
- MODO 3: En el tercer estado el eje se mueve en un sentido. Las condiciones necesarias para que se produzca esto son ENABLE a nivel alto, DIR puede valer cualquier valor y CLK debe tener flancos de subida. Para generar los flancos de subida se ha decidido conmutar CLK cada 1ms, luego, el motor dará un paso cada 2ms.
- MODO 4: En este estado el eje del motor gira en el sentido contrario al del estado 3. Las condiciones de este estado son idénticas para ENABLE y CLK, pero DIR debe tener el valor contrario que en el estado 3. Es decir, si en el estado 3 DIR estaba a nivel alto, en este debe estar a nivel bajo, y viceversa.
- MODO 5: El estado 5 trata de contar un número de pasos exacto para demostrar que nuestro driver puede mover un número finito de pasos y dejarlo en reposo. Para ello, hay que pulsar el botón de la placa el tiempo que se quiera. Cuando el botón está pulsado el eje está girando y el micro cuenta los pasos que ha avanzado. Cuando se suelta el botón volverá a la posición inicial.

La transición entre estados se realiza mediante un botón que incluye el microcontrolador llamado USER_BUTTON.

Para salir del estado 5 hay que pulsar el botón RESET que te lleva al estado 1.

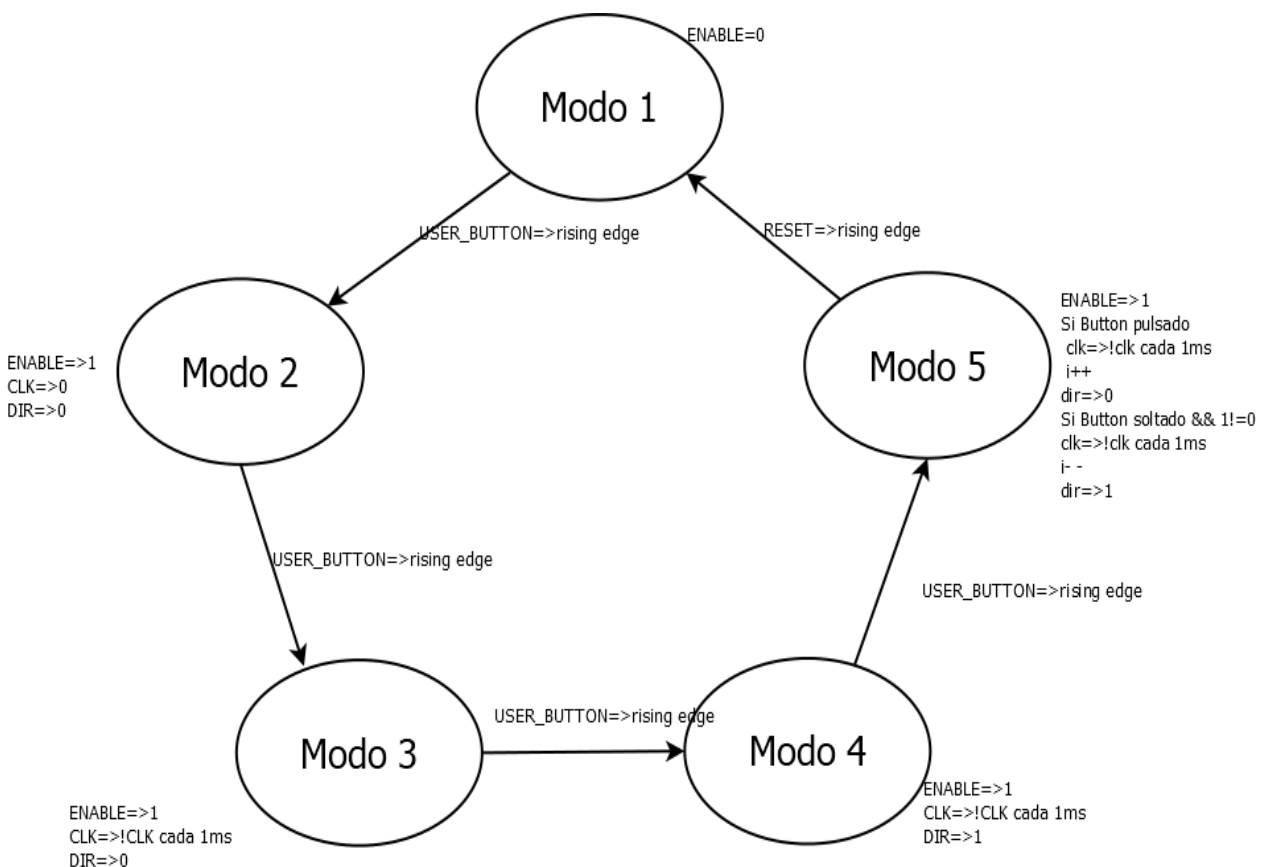


Figura 5-3. Diagrama de flujo Driver

Control bloque Heater

La temperatura del extrusor plantea un problema de control complejo, en el cual, lo primero debe ser estudiar el comportamiento del sistema, tanto a nivel estático como a nivel transitorio.

Se recuerda que para el control de la temperatura el controlador dispone de la entrada VTERM y la salida PWM. VTERM es la temperatura en voltios del termistor y PWM controla la potencia suministrada al calentador.

El primer ensayo realizado es el de la característica estática del sistema. Es decir, para un valor constante en la entrada conocer que valor tenemos en la salida.

Para la realización de los siguientes ensayos se ha realizado el montaje que se observa en la figura. En ella, se puede ver el micro, el circuito acondicionador del sensor de temperatura y el calentador, la red Snubber añadida después al circuito en una protoboard y el extrusor colocado en su soporte mecánico que evita el contacto de este con cualquier objeto.

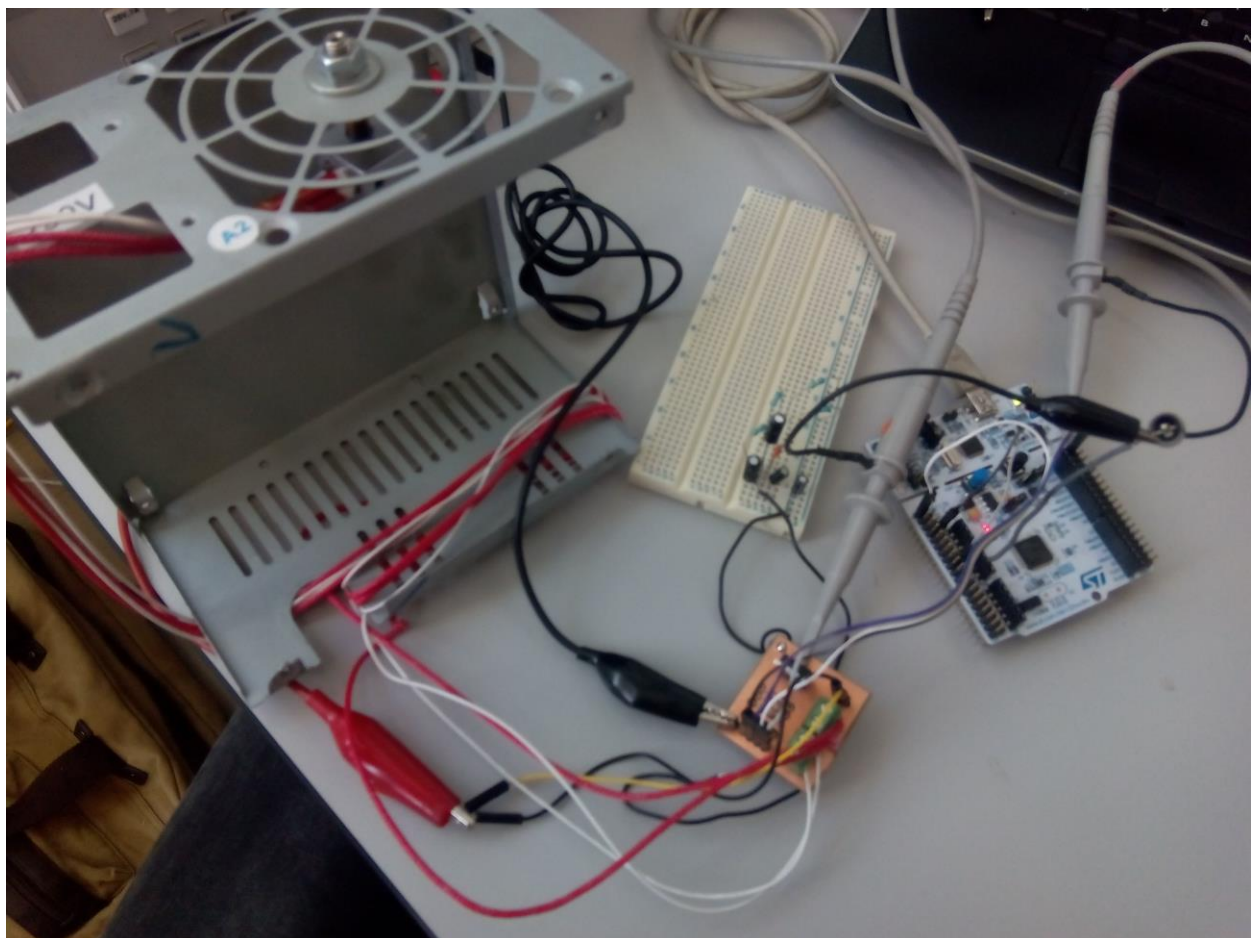


Figura 5-4. Ensayos de control del bloque Heater

5.1.1 Característica estática

El rango de la señal PWM, correspondiente a la entrada del bloque Heater, está comprendido entre 0% y 100%. En esta señal la variable controlada es el Duty cycle, es decir, el tiempo que está a nivel alto. Por ejemplo, si PWM=50%, la señal PWM estará la mitad del periodo a nivel alto y la otra mitad del periodo a nivel bajo, o lo que es lo mismo, la potencia suministrada al calentador será de la mitad de la máxima posible.

Sabiendo esto, se ha realizado un ensayo en el que la entrada en PWM se mantiene el tiempo suficiente a nivel constante para que la temperatura del sensor se estabilice. Si se plasma en una gráfica la temperatura VTERM para cada valor de PWM resulta la siguiente gráfica que es la característica estática del sistema de control de la temperatura.

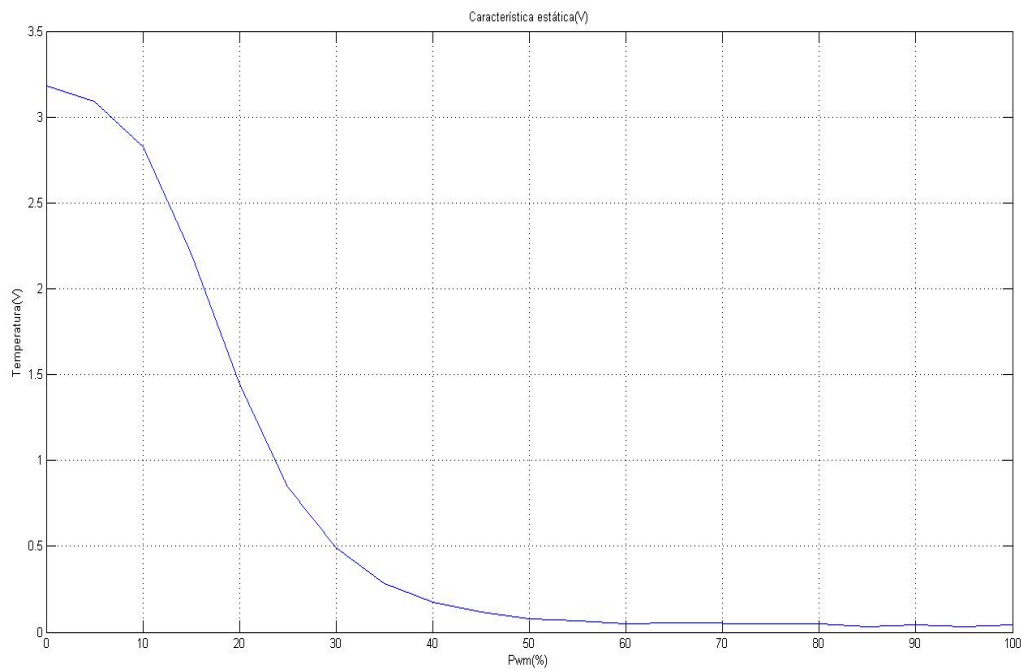


Figura 5-5 Característica estática VTERM(V)-PWM(%)

Gracias a la característica estática, se puede ver los valores de tensión que tomará VTERM en el régimen permanente de la señal PWM. Es inmediato darse cuenta de que, el valor en tensión de VTERM disminuye con el aumento de potencia suministrada, es decir, disminuye con la temperatura como ya se estudió en la sección 4.1.

Si transformamos esta curva en valores de temperatura usando la ecuación 4-2 y 4-3. Despejando el valor de T en función de VTERM, resulta la siguiente gráfica donde podemos ver que temperatura en grados centígrados tendrá el termistor para los valores en régimen permanente de PWM.

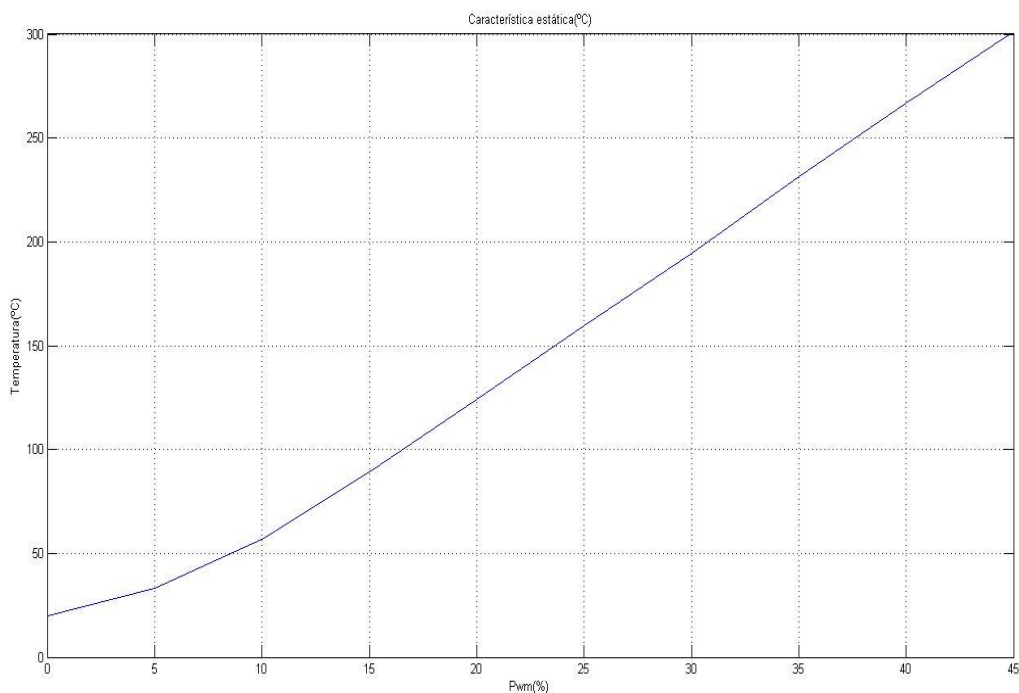


Figura 5-6 Característica estática VTERM(°C)-PWM(%)

Se ha limitado el rango del eje de ordenadas porque como consta en el datasheet del termistor el valor máximo del rango posible al que debe ser sometido es 300°C.

Esta gráfica, por desgracia, no refleja bien la realidad y no se puede tener en cuenta en el estudio del sistema. Esto es porque las ecuaciones 4-2 y 4-3 que se han utilizado son ideales y no cuentan con efectos externos como puede ser la disipación de calor del extrusor al ambiente. En cuyo caso, influiría en el sistema disminuyendo la pendiente de la temperatura. Es decir, se necesitaría administrar más potencia para alcanzar la misma temperatura.

Para obtener una curva de característica estática fiable de temperatura en grados centígrados con respecto al pwm aplicado se necesitaría instrumentación externa fiable y recoger los valores de temperatura en función del pwm aplicado.

Desafortunadamente, no se ha dispuesto con tecnología que permita medir la temperatura de forma fiable. Por eso, se ignorarán los valores de temperatura en grados centígrados y se utilizarán los valores en tensión de la temperatura.

5.1.2 Identificación con escalón del sistema

Conociendo los valores que toma la salida en régimen permanente con respecto al pwm aplicado, se debe elegir un punto de funcionamiento o de equilibrio. Dicho punto debe de estar en el rango donde en la práctica el sistema se ha de encontrar.

En este caso, se ha elegido el punto de equilibrio para PWM=25%. Que corresponde a un valor de temperatura en voltios de 0.8. Que corresponde a un valor alto de temperatura sin llegar a estar en el límite.

Para identificar el comportamiento del sistema lo primero es realizar un ensayo aplicando escalones en la entrada PWM como se muestra en la inferior de la siguiente figura.

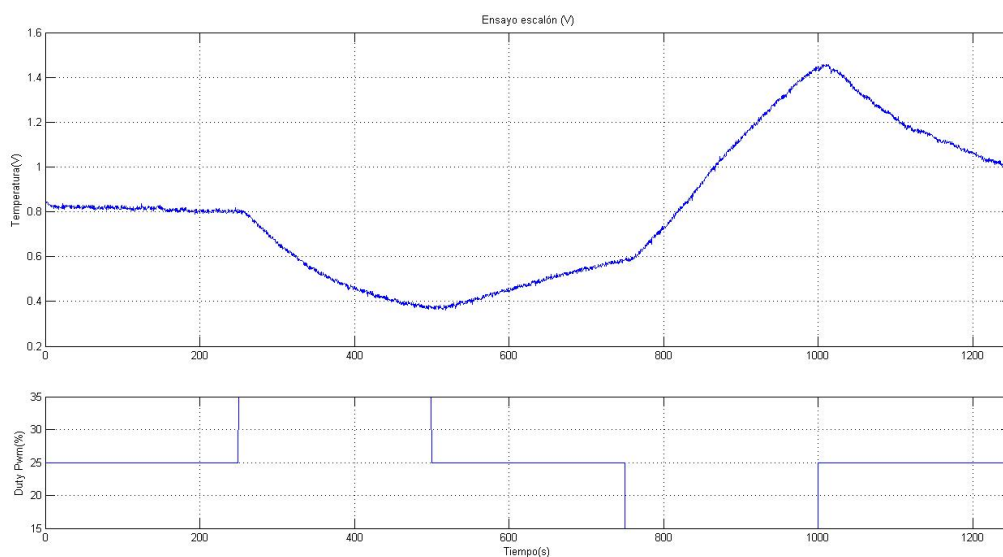


Figura 5-7 Identificación ensayo escalón

El ensayo en escalón muestra el comportamiento de la salida del sistema al producirse variaciones en la entrada. El comportamiento en la salida de este sistema, cuanto menos, es muy lento. La duración de cada escalón es de 250 segundos.

El resultado de estos ensayos no ha sido satisfactorio. Debido al carácter lento del sistema en el que para un pwm constante la temperatura parece que nunca llega a régimen permanente, no se ha podido identificar el sistema con los modelos convencionales FOTD y SOTD.

En consecuencia, se ha optado por realizar la identificación del sistema a partir de otro método llamado identificación frecuencial que se explicará a continuación.

5.1.3 Identificación frecuencial con escalón del sistema

La identificación frecuencial permite obtener información muy práctica para el diseño. El ensayo realizado consiste, en primer lugar, en elegir un punto de operación en el cual si el valor de salida está por debajo del punto de operación se aplicará en la entrada el valor necesario para que la salida aumente. Si el valor está por encima se conmutará en la salida a un valor que le permita bajar.

En nuestro caso, se impondrá 0.8V como punto de equilibrio por los motivos comentados en el apartado anterior. Y los valores de entrada serán PWM=0% si VTERM está por debajo de 0.8 y PWM=100% si está por encima de 0.8V. Se recuerda que la salida del sistema, es decir, la temperatura en Voltios disminuye con el aumento de la potencia suministrada. El resultado de este ensayo a la salida es una oscilación como se puede ver en la figura siguiente.

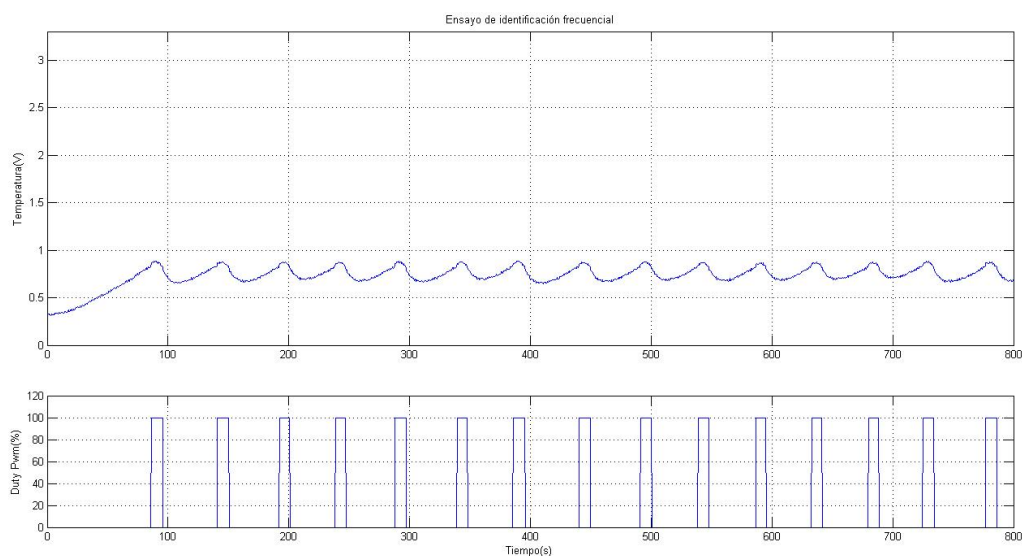


Figura 5-8 Identificación frecuencial

Los datos que se necesitan son el periodo de la oscilación y la amplitud de la oscilación. Estos parámetros caracterizan en sistema en el aspecto frecuencial y permite utilizar un método de cálculo de controladores llamado método de bucle cerrado.

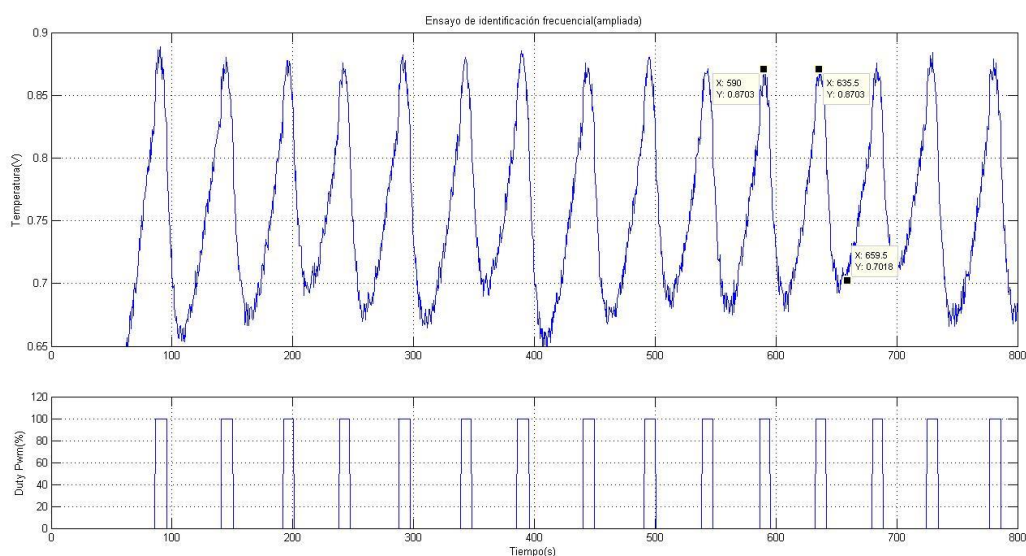


Figura 5-9 Identificación frecuencial ampliada

El periodo de oscilación y la amplitud de esta se saca de la gráfica anterior.

$$P_u = 635.5 - 590 = 45.5 \text{ s}$$

$$A = (0.8703 - 0.7018) / 2 = 0.08425 \text{ V}$$

Estos parámetros permiten calcular la frecuencia característica del sistema y la ganancia característica del sistema que se definen como:

$$\text{Frecuencia característica: } W_{180} = \frac{2\pi}{P_u} = 0.1381 \text{ Rad/s}$$

$$\text{Ganancia característica: } Mg = \frac{4h}{A\pi} = 7.556 \text{ V/Duty Pwm} \quad \text{donde } h \text{ es la amplitud la señal de entrada PWM en \%1.}$$

Habiendo conseguido ya los parámetros que identifican el sistema de forma frecuencial, se pasa al diseño de controladores por bucle cerrado.

5.1.4 Diseño de controlador PID por método de bucle cerrado.

El controlador diseñado ha sido un PID. Este es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial.

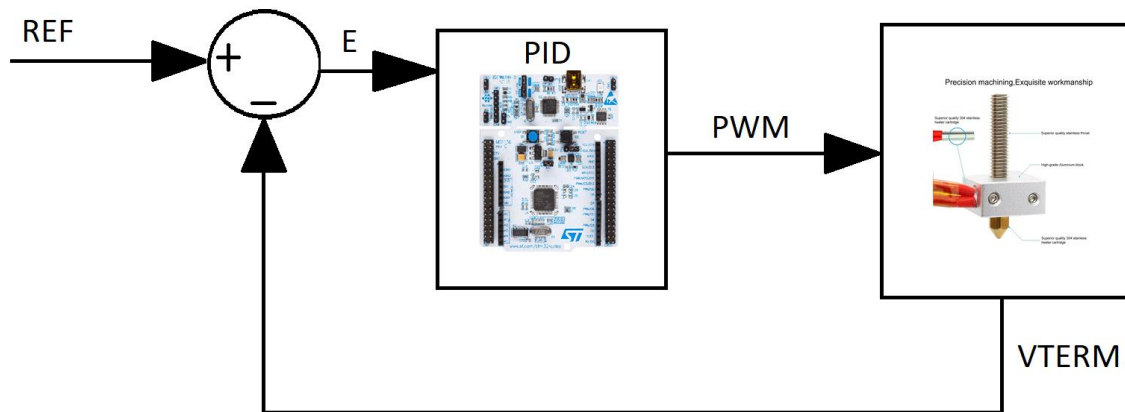


Figura 5-10. Diagrama de control PID

Este calcula la desviación o error entre el valor de salida del sistema y el valor deseado o de referencia y actúa de la siguiente manera. El algoritmo de control PID consiste en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional depende del error actual. El Integral depende de los errores pasados y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar el proceso por medio de un elemento de control como es, en este sistema, la potencia suministrada al calentador con la señal PWM.

El código correspondiente al algoritmo de control implementado en el microprocesador se encuentra comentado y explicado en el anexo B de este documento.

El método de identificación frecuencial permite hacer una primera aproximación con las tablas de diseño de controladores por bucle cerrado. Las ecuaciones y los valores del controlador diseñados por este método los siguientes:

$$\text{Ganancia: } K_p = 0.6 \cdot Mg = -4.5124$$

$$\text{Término integral: } T_i = 0.5 \cdot W_{180} = 22.75$$

$$\text{Término derivativo: } T_d = 0.125 \cdot W_{180} = 5.6875$$

Teniendo ya los parámetros del controlador PID solo queda poner a prueba estos resultados con un ensayo sobre el sistema a controlar.

A la vista de los resultados de la Figura 5-11, se puede extraer de la gráfica que el controlador diseñado es demasiado rápido para el sistema, dicho controlador es tan rápido comparado con la velocidad de

evolución del sistema que prácticamente actúa como un control todo o nada.

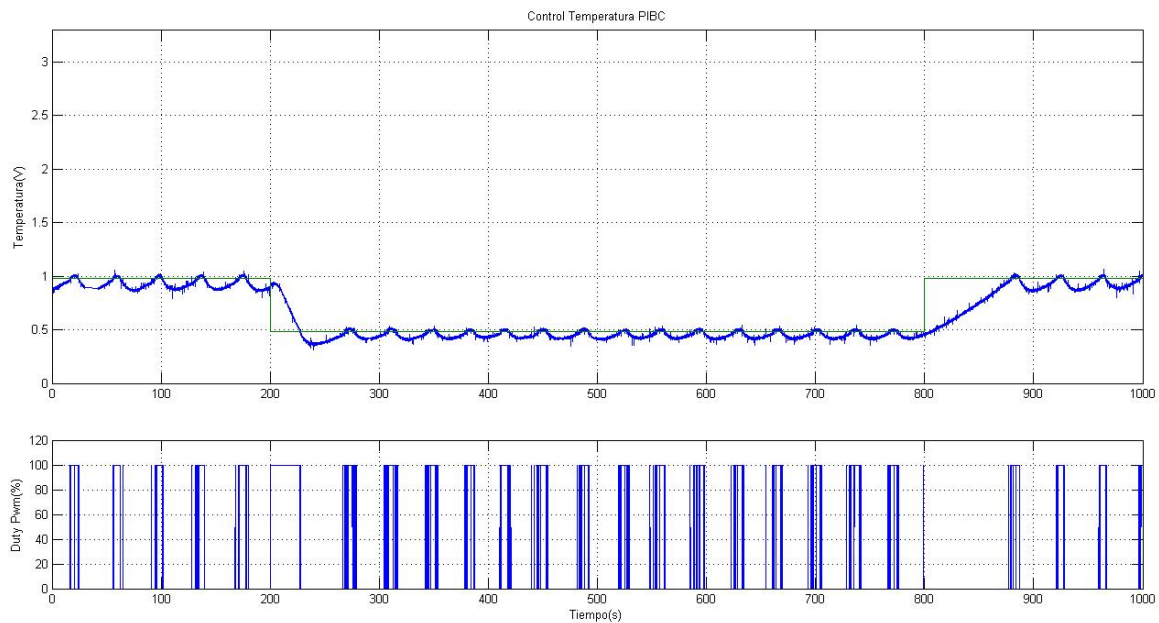


Figura 5-11. Ensayo del controlador PID

Como el controlador previamente diseñado es demasiado rápido se ha realizado un ajuste empírico que ha consistido sobre todo en hacer el controlador más lento. Para ello se ha reducido enormemente el término derivativo y la ganancia de este.

La siguiente gráfica corresponde al ensayo realizado con el controlador ajustado empíricamente.

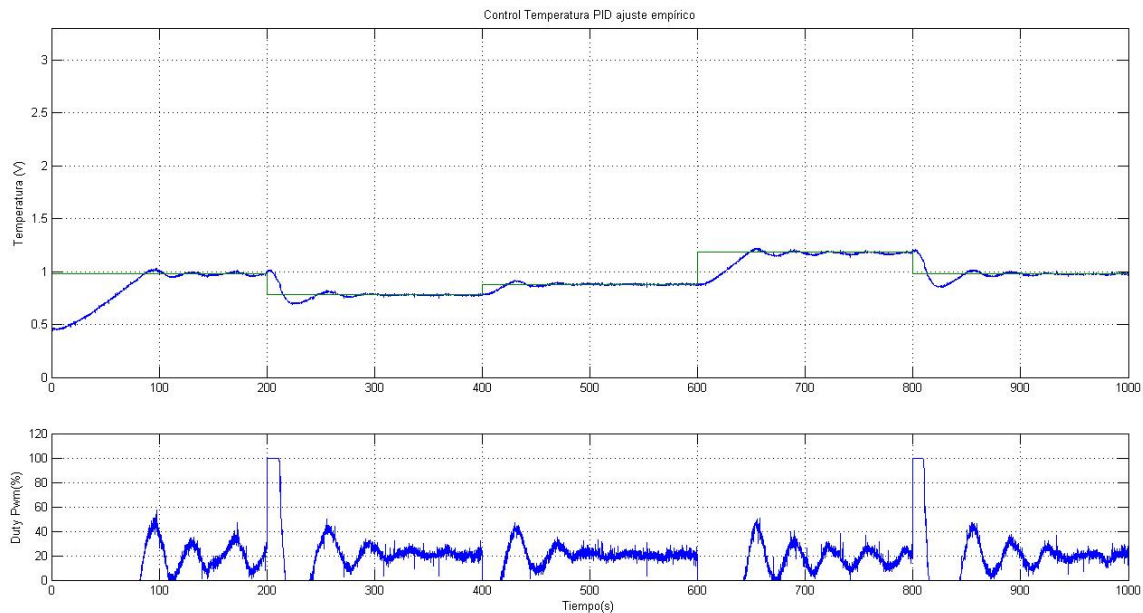


Figura 5-12. Ensayo del controlador PID ajustado empíricamente

Es más que notable la mejoría del controlador. La señal de entrada ya no conmuta entre los valores de saturación. El sistema llega a la referencia marcada de forma suave. En los valores cercanos al punto de operación 0.8V el controlador calca prácticamente la referencia. Cuando se aleja del punto de operación presenta una pequeña oscilación como se puede apreciar mejor en la ampliación de la Figura 5-12 que se muestra a continuación.

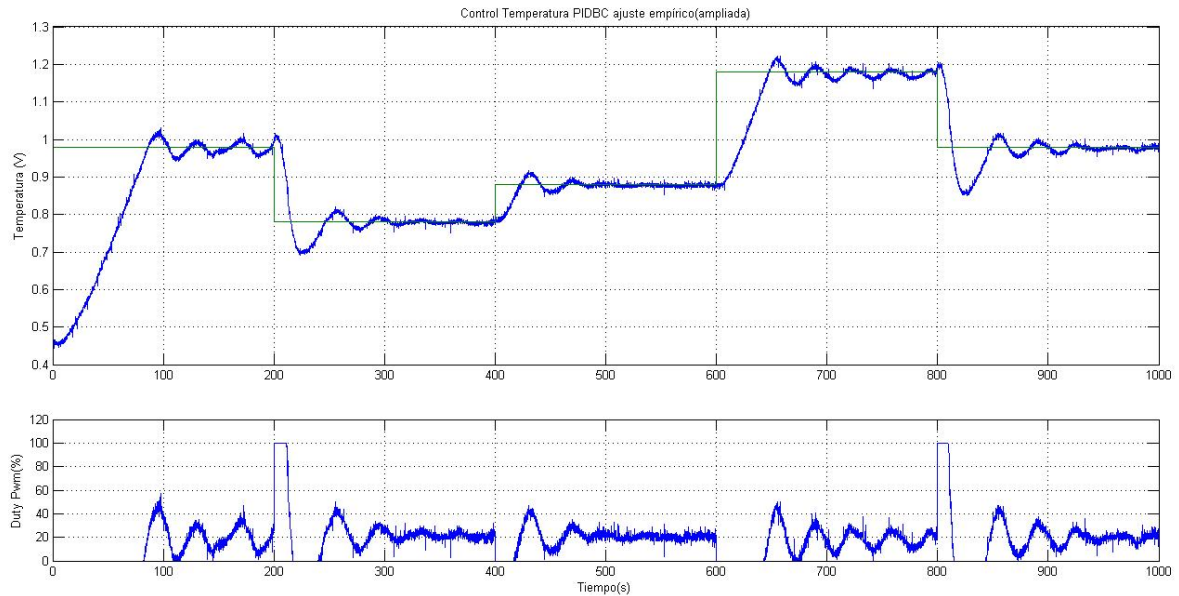


Figura 5-13. Ensayo del controlador PID ajustado empíricamente (ampliada)

No obstante, este efecto es normal si el control se aleja del punto de operación. Para resolver este aspecto habría que modificar el punto de operación al deseado. Es decir, si se necesitase otra temperatura de equilibrio que la correspondiente a 0.8 V, solo habría que modificar el punto de equilibrio al correspondiente de la temperatura deseada.

En definitiva, los parámetros de control definitivos ajustados empíricamente son:

Ganancia: $K_p = \mathbf{0.0474}$

Término integral: $T_i = 0.5 \cdot W_{180} = \mathbf{14.786}$

Término derivativo: $T_d = 0.125 \cdot W_{180} = \mathbf{0.1422}$

Por completar un poco más la información del ensayo de control, se añade seguidamente el índice de desempeño ISE. Este índice muestra el error cuadrático que comete el control entre la salida del sistema y la referencia deseada.

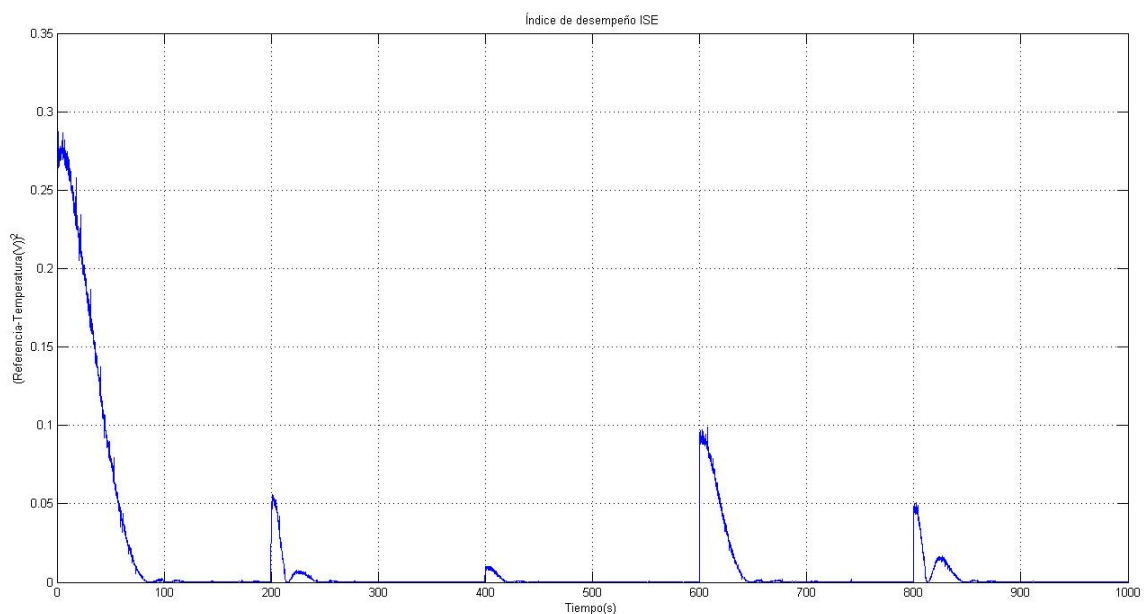


Figura 5-14. Índice de desempeño ISE

El primer lóbulo pertenece al comienzo del control donde la salida del sistema parte de un punto

arbitrario, en este caso 0.45V, luego es lógico que sea de gran tamaño. A parte de esto, los demás lóbulos pertenecen a los cambios de referencia.

Si se presta atención se puede observar que los lóbulos de la gráfica en el tiempo 200 y 800 segundos están divididos. Este hecho corresponde a los cambios de referencia en los que se solicita aumentar la temperatura que donde el control del sistema presenta más sobreoscilación.

Sin embargo, el momento, donde el criterio ISE es mayor, es para $t=600s$. Este comentario corresponde con un escalón en la referencia de 0.3V, aproximadamente, el 10% del rango de salida. Para este escalón el error cuadrático no supera el valor de 0.1V y llega a la referencia en menos de 50 segundos.

Se recuerda que en la identificación del sistema con ensayos de escalones la salida del sistema tardaba más de 250 segundos en llegar al régimen permanente. Con el controlador implementado se tarda en llegar a la referencia menos de 50 segundos.

En conclusión, con estos resultados del control se da por bueno el controlador diseñado e implementado en el microprocesador.

Teniendo los bloques Nucleo, Driver y Heater diseñados y programados solo queda realizar la pcb de interconexiones y alimentación externa de todos los bloques. Esto se detalla en el capítulo siguiente.

6 PCB DE INTERCONEXIONADO GENERAL

En esta sección se va a mostrar el esquemático de la placa de interconexión general, donde se puede apreciar la asignación e interconexión de pines del microcontrolador STM32 F103RB con el resto de bloques, la zona de alimentación externa y regulación de esta. Además, se muestra la vista 3D diseñada con la herramienta Altium para dar una de como quedaría la placa en formato físico.

Esquemático de interconexión general

El esquemático propuesto para este bloque es el siguiente:

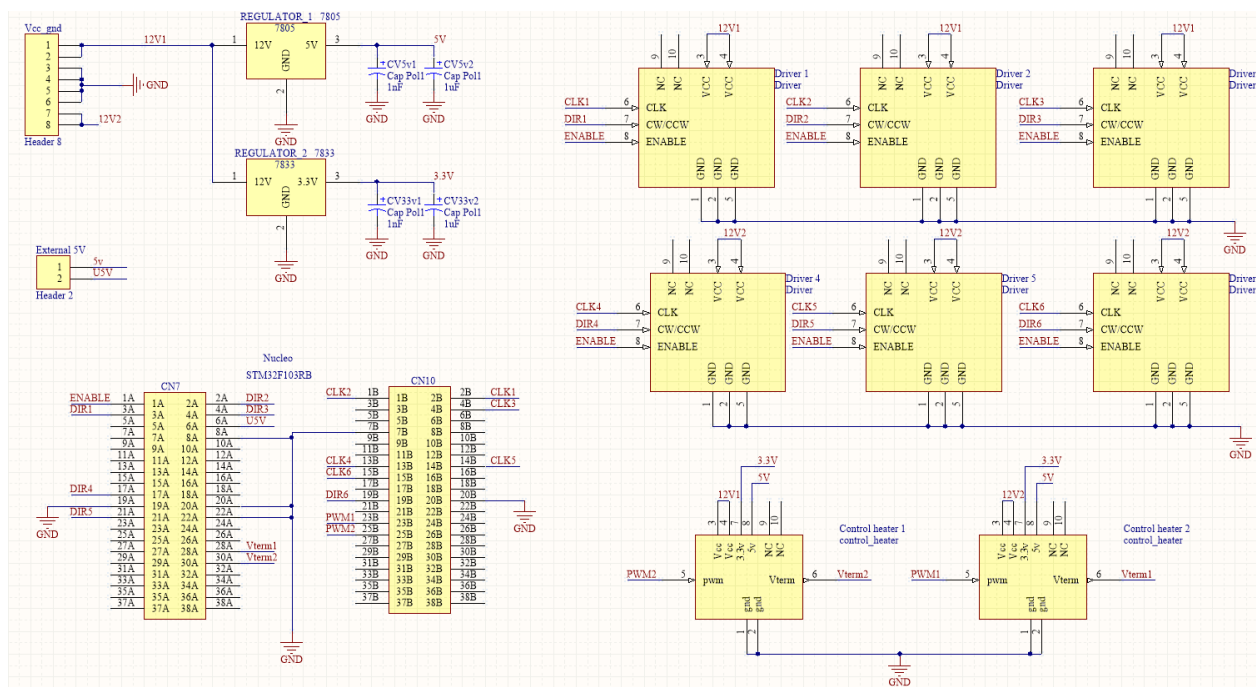


Figura 6-1. Esquemático de interconexión general

Las decisiones tomadas sobre este esquemático a destacar son las siguientes:

- En primer lugar, la alimentación $V_{cc}=12V$ se ha dividido en dos ramas, la rama 12V1 y la rama 12V2, que corresponde a tres bloques Driver y un bloque Heater por cada rama. El motivo de esta decisión es asegurar que el amperaje soportado por la pista. El estudio de la corriente, suponiendo el caso de mayor consumo, se ha calculado que la placa podría llegar a consumir unos 18 amperios. Dividiendo la rama de alimentación se asegura que por cada rama no pueden circular más de 9 amperios. Esto a nivel de huella ofrece la posibilidad de la disminución del ancho de la pista correspondiente a la alimentación, ahorrando espacio y disminuyendo la posibilidad de que se produzca un arco o que la pista se queme.
- Se ha añadido un jumper, llamado “External 5V” en el esquemático, para ofrecer la posibilidad al usuario de alimentar el microprocesador a través del puerto USB o a través de alimentación proveniente de la placa.
- Como se ha comentado durante todo el documento, la pcb se ha pensado para implementar cada bloque de forma modular, reemplazable y mejorable. En las figuras correspondientes a la huella de la PCB de interconexión general están marcados con cuadros en rosa los diferentes módulos de los bloques.

PCB interconexión general

La dimensión de la PCB completa son 210.82x172.72 mm². A continuación, las huellas y la vista 3D generadas con Altium.

Los cuadrados que se observan en las esquinas de los bloques se van a utilizar para atornillar los módulos a la placa principal y asegurar la estabilidad de estos.

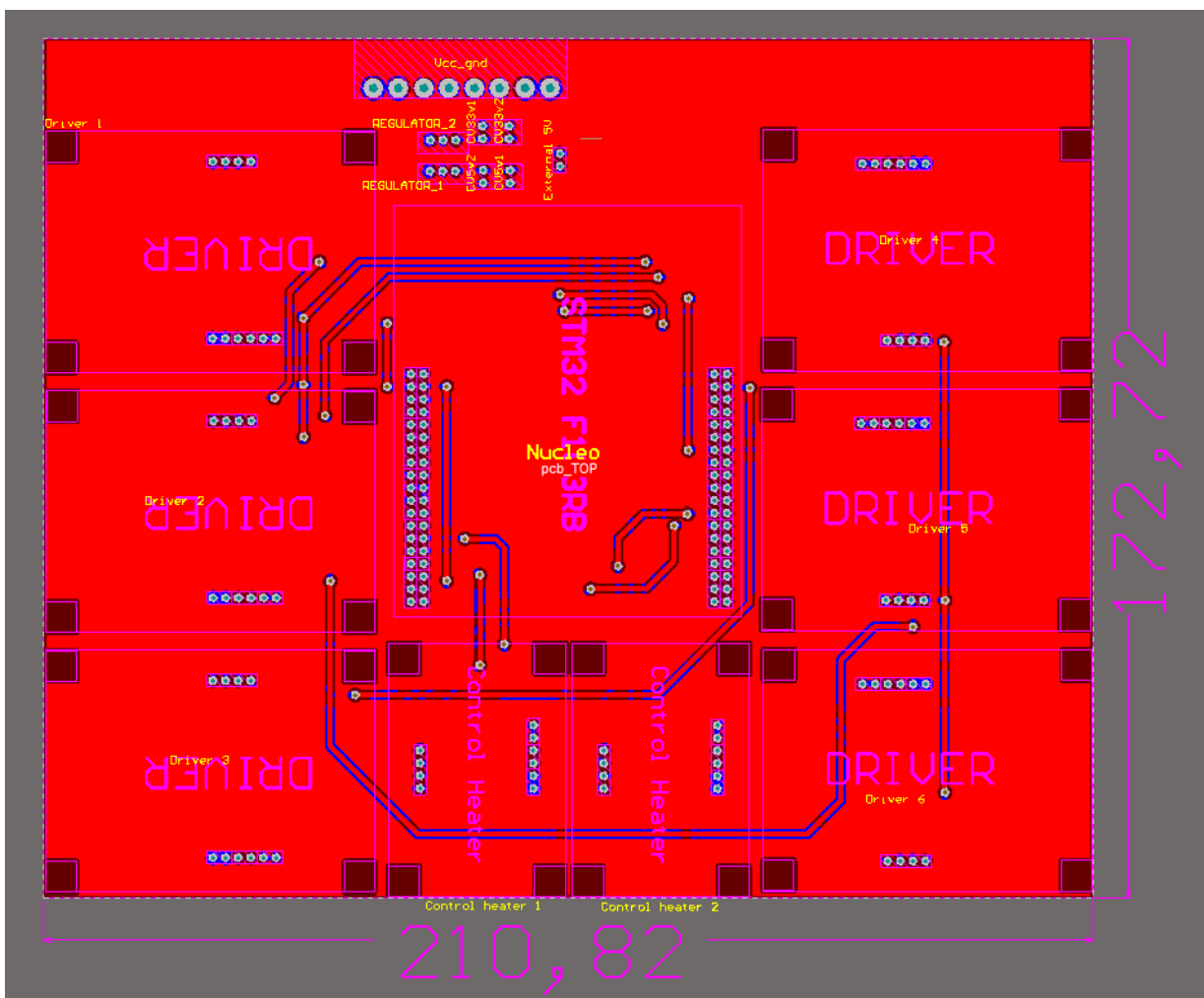


Figura 6-2. Top PCB conexiónado general

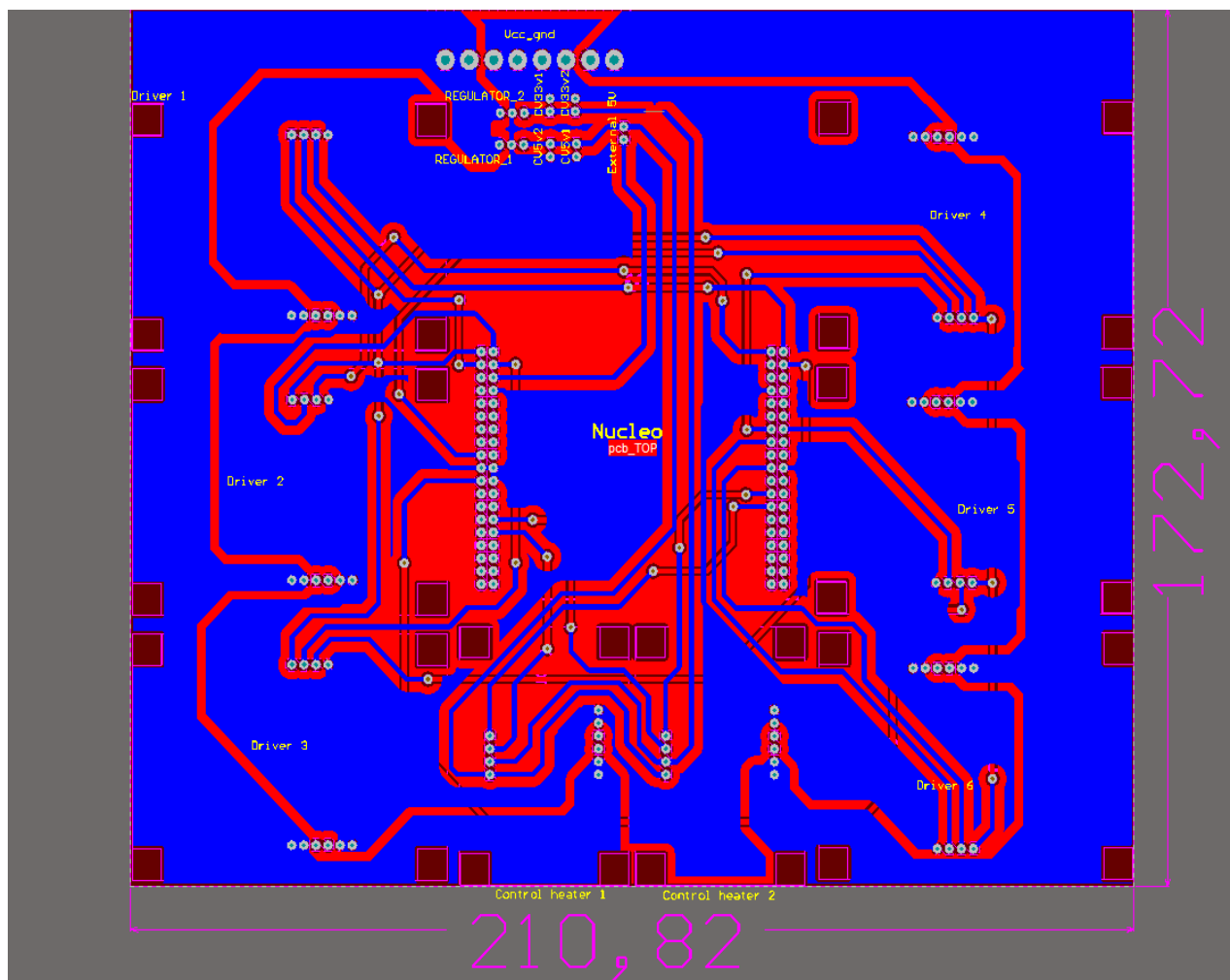


Figura 6-3. Bottom PCB conexionado general

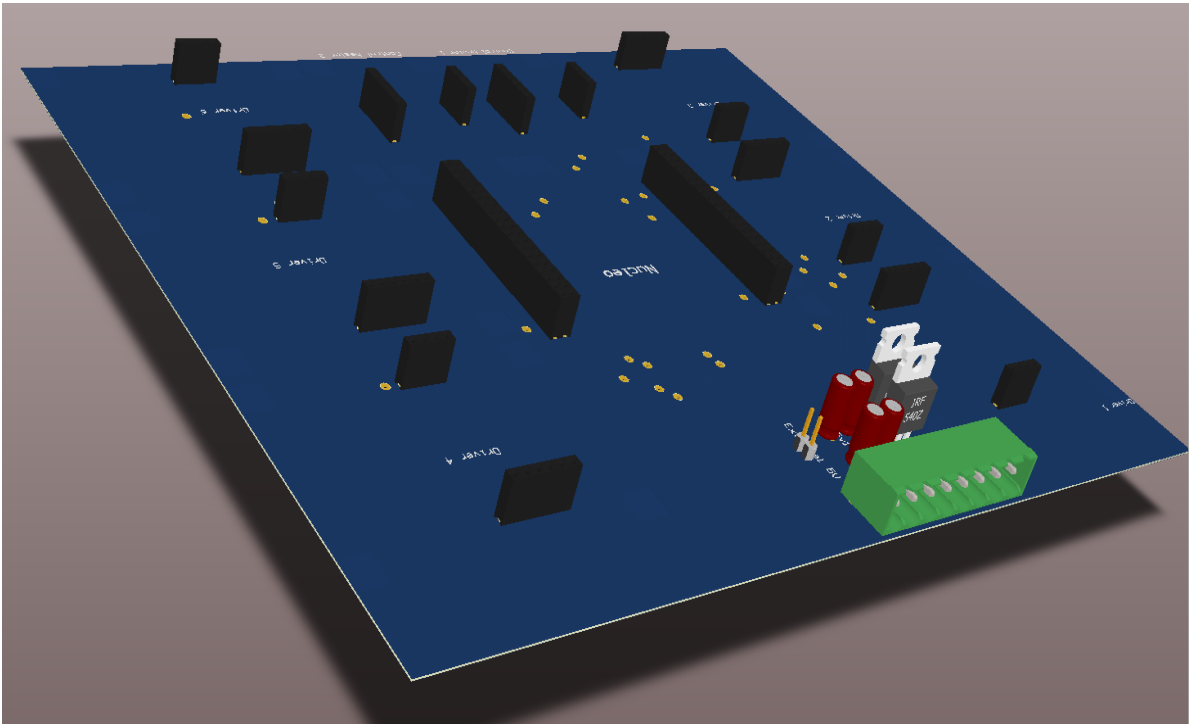


Figura 6-4. Vista 3D PCB conexionado general 1

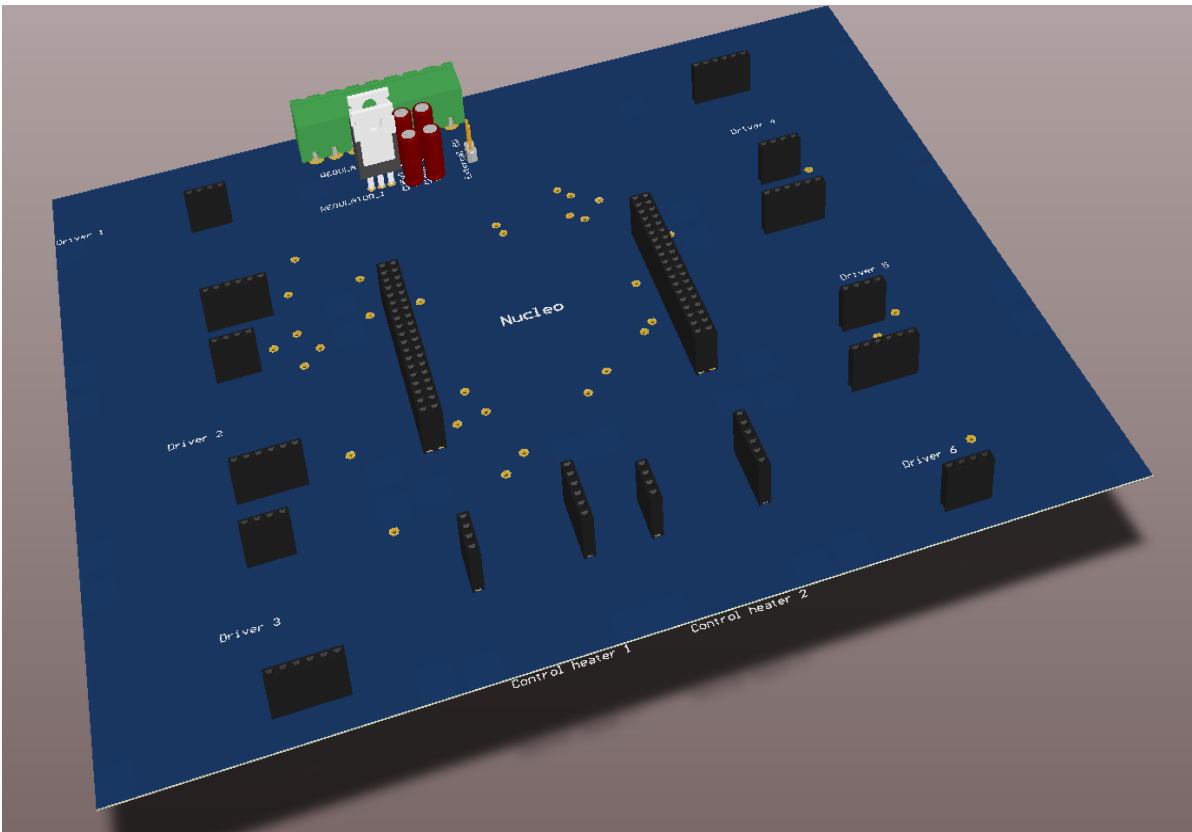


Figura 6-5. Vista 3D PCB conexionado general 2

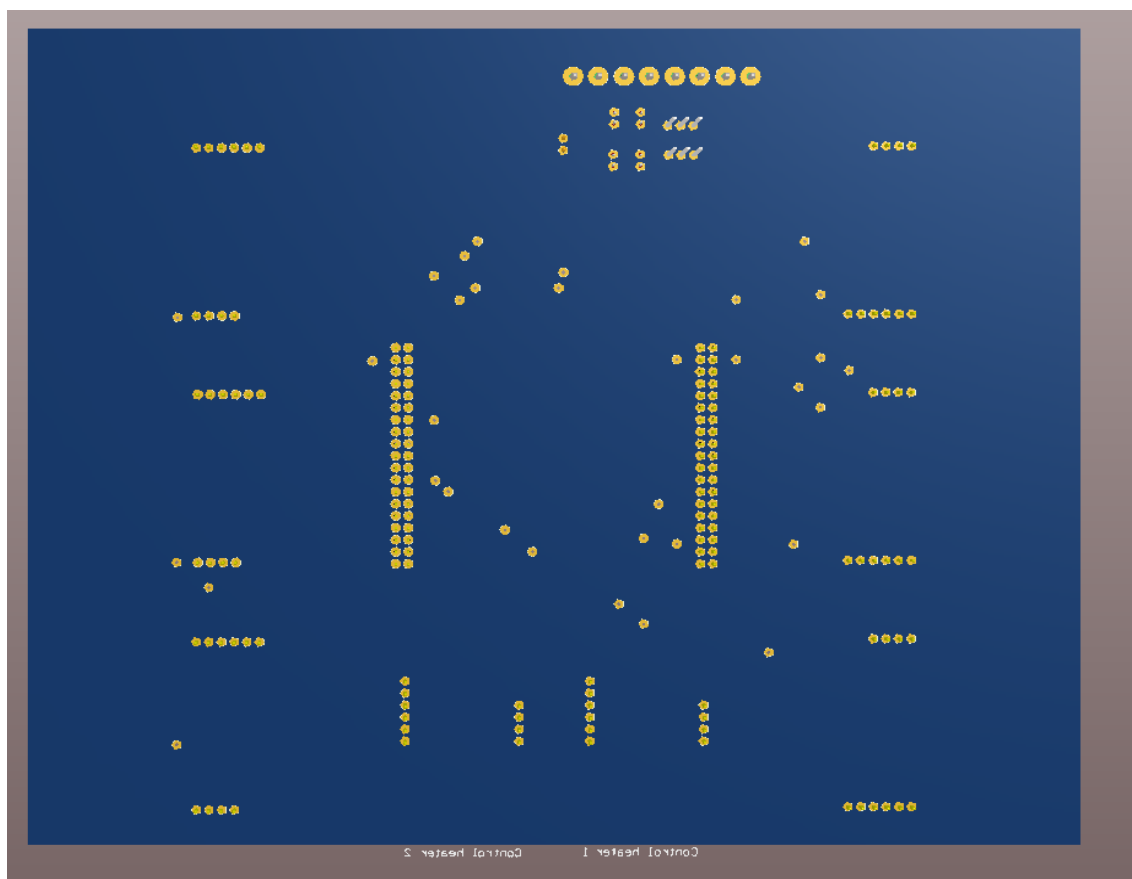


Figura 6-6. Vista 3D PCB conexionado Bottom

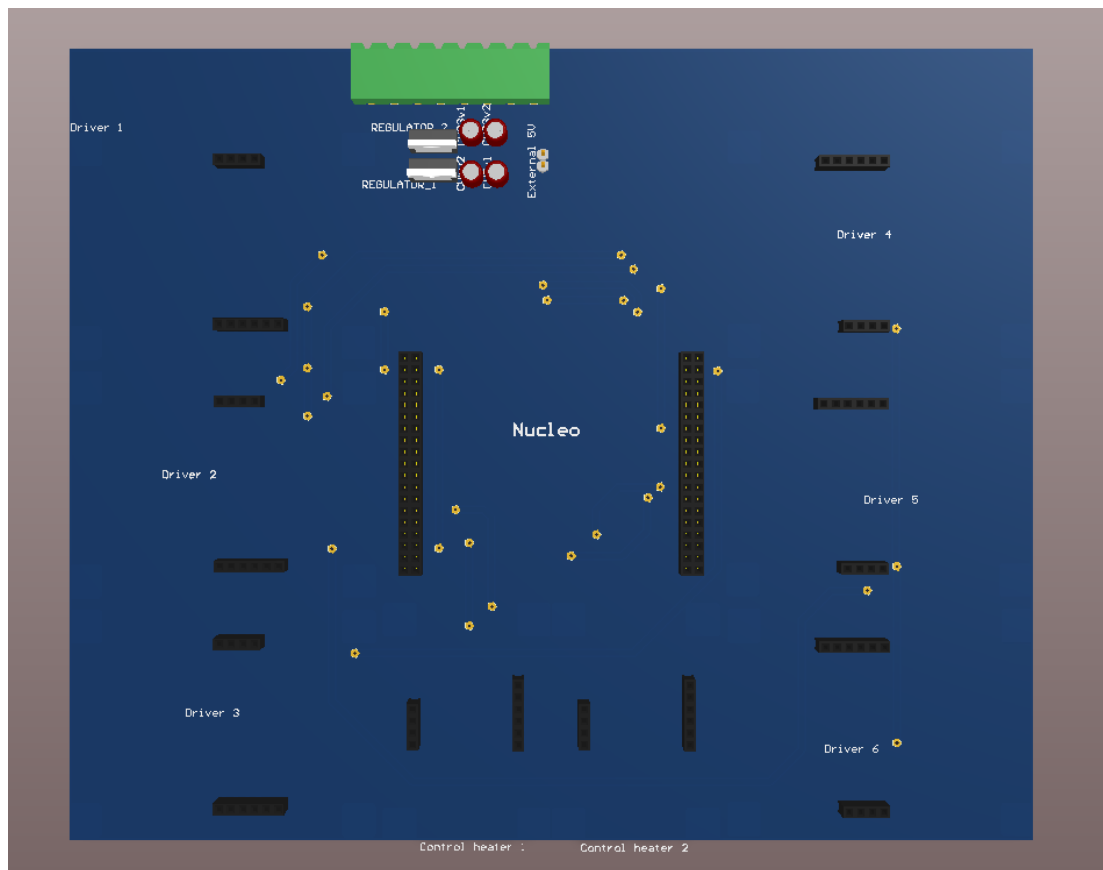


Figura 6-7. Vista 3D PCB conexionado top

7 PRESUPUESTO

En la siguiente página se encuentra el presupuesto de todos los elementos que componen el circuito.

Haciendo una valoración previa de la placa se puede llegar a pensar que su precio es bastante elevado. Pero hay que contar que los precios de los componentes son los precios del mínimo lote posible. Los proveedores rebajan el precio individual mientras mayor sea el pedido de un componente. En consecuencia, el precio mostrado en la siguiente página es el precio máximo posible.

8 CONCLUSIÓN

Recopilando los puntos alcanzados durante todo el trabajo:

1. Se ha diseñado, fabricado y probado el bloque Driver que controla los motores paso a paso y hacer un ensayo que demuestre este hecho.
2. Se ha diseñado, fabricado y probado el bloque Heater que acondiciona las señales necesarias para controlar la temperatura del extrusor.
3. Se ha programado un algoritmo de control que controla la temperatura del extrusor de forma adecuada.
4. Se ha diseñado la placa que interconexiona, alimenta y da soporte a todos los bloques Driver, Heater y al microcontrolador.

No se ha podido fabricar el prototipo de la placa completa a tiempo para adjuntar fotos en la memoria de la placa en formato físico. No obstante, se espera que dicha placa este hecha para el día de la defensa de este trabajo.

En cualquier caso, se ha demostrado el correcto funcionamiento de los distintos bloques. Luego la ejecución final de este trabajo es satisfactoria.

Las vistas 3D de como sería la placa completa se adjunta en la siguiente figura.

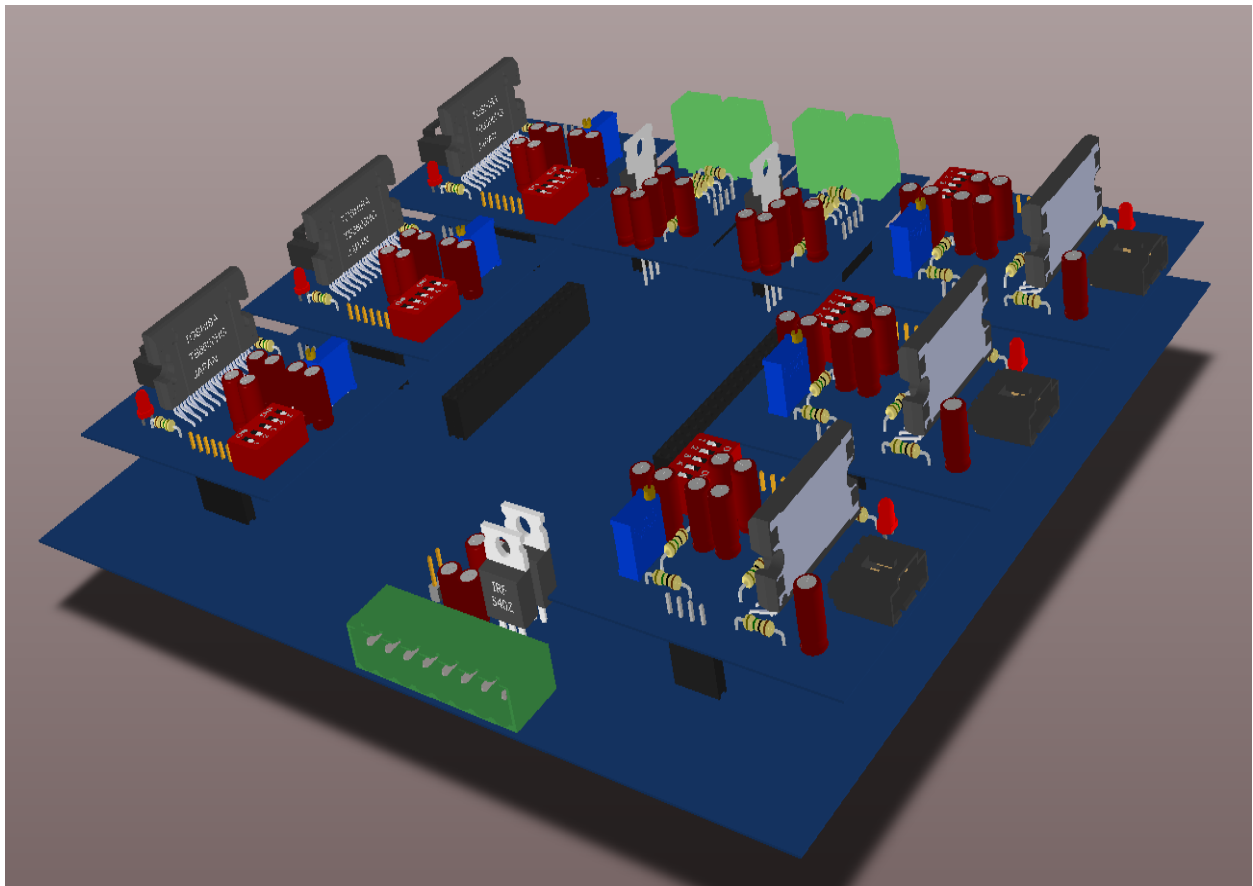


Figura 7-1. Vista 3D placa completa 1

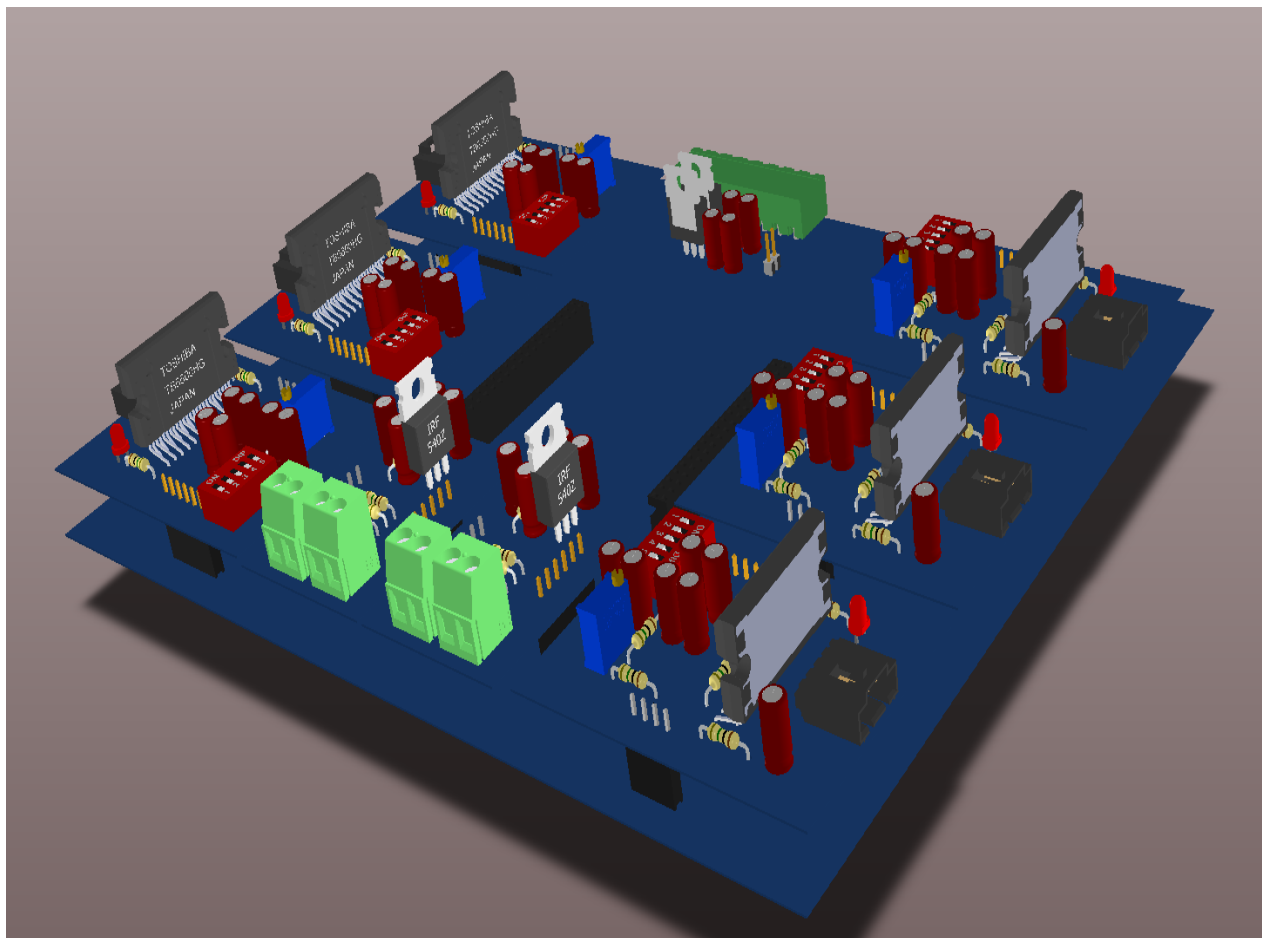


Figura 7-2. Vista 3D placa completa 2

Nota: La vista 3D del microprocesador STM32 F103RB no se ha podido implementar debido su gran peso, no soportado por el programa de diseño.

ANEXO A

Ensayo bloque Driver

```
#include "mbed.h"

DigitalIn Button(USER_BUTTON); //Configuracion de botton
DigitalOut dir(PC_12);          //Configuracion salida digital dir
DigitalOut enable(PC_10);       //Configuracion salida digital enable
DigitalOut clk(PC_8);           //Configuracion salida digital clk
Ticker interrupt;               //Declaración de la interrupcion Ticker

int modo; //modo de funcionamiento
int i=0; //contador de pasos

void avance() //función que llama la interrupción
{
    if(modo==3 || modo==4) { //conmutacion de clk cada 1ms
        clk=!clk;
    }
    if(modo==5 && Button==1 && i!=0) { //Retorno a la posicion inicial del modo 5
        dir=1;
        clk=!clk;
        i--;
    }
}

int main()
{
    //Iniciación de salidas
    enable=0; //motores deshabilitados
    dir=0;    //dirección 0
    clk=0;    //clk 0
    modo=1;   //modo inicial de funcionamiento
    interrupt.attach(&avance,0.001); //llamada a interrupción cada 1 ms

    while(1) {
        if (Button == 0 && modo!=5) { //Si se pulsa el boto y no esta en el modo 5 avanza de modo
            modo++;
            wait(0.5);
        }
        if (modo==1) { //Modo 1: Eje libre
            enable=0;
            dir=0;
            clk=0;
        }
        if (modo==2) { //Modo 2: Eje fijo
            enable=1;
            dir=0;
            clk=0;
        }
        if (modo==3) { //Modo 3.Giro en direccion dir=0. Paso cada 2ms. Conmutación de clk en la interrupcion.
            enable=1;
            dir=0;
        }
        if (modo==4) { //Modo 4.Giro en direccion dir=1. Paso cada 2ms. Conmutación de clk en la interrupcion.
            enable=1;
            dir=1;
        }
        if (Button == 0 && modo==5) { //Modo de cuenta de pasos.
            dir=0;          // Si se deja pulsado el boton, el eje recorrera tantos pasos como dejemos pulsado el boton.
            clk=!clk;;      //Al soltar volvera a la posicion inicial
            wait(0.01);
            i++;
        }
    }
}
```

Ensayo de control PID

```
#include "mbed.h"

DigitalIn B(USER_BUTTON);//Declaración de variable B como el botón de la placa
AnalogIn analog_value(A1); //Declaración de la variable analog_value en el pin A0 como entrada analógica
PwmOut pwm(PB_10); //Declaración de la variable pwm como salida en pwm en el pin PB_10
Serial pc(SERIAL_TX, SERIAL_RX,115200); //Declaración de la variable pc como puerto serie, a la velocidad 115200 baudios
Ticker interrupt; //Declaración de la interrupción por tiempo interrupt

float pwmpc; //ENTRADA DEL SISTEMA A CONTROLAR(Duty del pwm en tantos por uno)
float tmu=0; //Tiempo de la muestra nmu. Inicializado en 0
float termV; //SALIDA DEL SISTEMA A CONTROLAR (Temperatura en voltios del extrusor)
float tr;
float ref; //REFERENCIA. Salida deseada del sistema a controlar
int nmu=1; //Numero de muestra
int modo=0; //Modos o estados del programa
float Kc=-0.0474; //Ganancia del controlador
float Td=0.1422; //Término derivativo del controlador
float Ti=14.786; //Término integral del controlador
float Ts=0.0001; //Tiempo de muestreo del controlador
float Ueq=0.8; //Punto de operación del controlador
float usat; //salida del controlador con limites de saturación
float Timp; //Tiempo de impresión por pantalla
int cont; //contador para el muestreo por puerto serie
float offset=0.0325; //offset del coontrolador

float control(float termV,float ref, float Kc, float Td, float Ti, float Ts, float Ueq) //FUNCION PID ANTI-WINDUP
{
    float e,up,I,lant,ui,upid,ud,ueq,law,lawant,usant,uoutant,Kt,uaw,uout,usat,edant; //Declaracion de variables del algoritmo de control

    //Error
    e=ref-termV;

    //Calculo de salida del controlador en función del error
    up=Kc*e; //Parte proporcional de la salida del controlador
    ud=Kc*Td*(e-edant)/Ts; //Parte derivativa de la salida del controlador
    I=lant+Ts*e;
    ui=Kc*I/Ti; //Parte integral de la salida del controlador
    upid=up+ud+ui+ueq; //Salida completa del PID

    //ANTIWINDUP.....En el caso de que la salida sin saturar sea mayor que la salida saturada, no se integra este error.
    law=lawant+Ts*(usant-uoutant); //Este evita que la salida se quede saturada mas tiempo del que debiera por sobre integral el
    error
    Kt=1/(0.1*Ti);
    uaw=Kt*law;
    uout=upid+uaw; //Salida con antiwindup
    //SATURACION DE SALIDA
    if(uout>1) {
        usat=1;
    } else if(uout<0) {
        usat=0;
    } else {
        usat=uout;
    }

    //ACTUALIZACION DE VARIABLES
    uoutant=uout;
    usant=usat;
    lawant=law;
    edant=e;
    lant=I;

    return usat; //Devuelve la salida en el rango posible
}

void muestreo()//FUNCION LLAMADA POR LA INTERRUPCION CADA 100us. Corresponde al muestreo por pantalla del control
```

```

cada 100ms
{
    if (B == 0) { //Si se pulsa el boton pasa al esto 1
        modo=1;
    }
    if(modo==0) { // Estado 0. Espera a que se pulse el boton para comenzar el ensayo
        pwmpc=0.15;
    }
    if (modo==1) { //Estado 1. Ensayo de control. Se cambia la referencia.
        //Los datos se muestran por pantalla gracias al puerto serie para poder
        //hacer gráficas usando matlab de los resultados.
        termV = analog_value.read(); //Lee el valor de la temperatura de 0.0 a 1.0
        termV = termV*3.3; //Conversión de la lectura analógica de 0 a 3.3

        //Cambios de referencia dependiendo del tiempo
        if(tmu>=0) {
            ref=0.98;
        }
        if(tmu>=200) {
            ref=0.78;
        }
        if(tmu>=400) {
            ref=0.88;
        }
        if(tmu>=600) {
            ref=1.18;
        }
        if(tmu>=800) {
            ref=0.98;
        }
        if(tmu>=1000) {
            ref=0.98;
            modo=2; //pasa a modo 2
        }

        pwmpc=control(termV+offset,ref,Kc,Td,Ti,Ts,Ueq); //LLAMADA A LA FUNCION DEL CONTROLADOR. Calculo del pwm.

        Timp=Ts*1000; //Calculo de tiempo impresion. 1000 veces superior al tiempo de muestreo del controlador

        if(cont==1000) {
            pc.printf("Temperatura=%f || Referencia=%f || Duty=%f || Time=%f || muestra=%u \r\n",termV,ref,pwmpc,tmu,nmu); //muestra
los datos por pantalla
            nmu++; //incrementa numero de muestra
            tmu=tmu+Timp; //suma el tiempo de impresión por pantalla al tiempo correspondiente a cada muestra
            cont=0; //reinicia contador
        }
        cont++; //incrementa contador
    }
    if (modo==2) //FIN DEL ENSAYO. Deja de imprimir por pantalla y de controlar
    {}

    pwm.pulsewidth_us(pwmpc*1000); //Calcula el Duty del pwm
}

int main() //PROGRAMA PRINCIPAL
{
    pwm.period_us(1000); //periodo del pwm
    interrupt.attach(&muestreo,Ts); //Activa la llamada a la función muestreo cada 100us
}

```


ANEXO B
