

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Sistema de activación de microimpulsores para satélites

Autor: Francisco Javier Estudillo Cabrera

Tutor: José Manuel Quero Reboul

Cotutor: Francisco Antonio Perdigones Sánchez

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

Sevilla, 2024



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Sistema de activación de microimpulsores para satélites

Autor:

Francisco Javier Estudillo Cabrera

Tutor:

José Manuel Quero Reboul

Catedrático de Universidad

Cotutor:

Francisco Antonio Perdigones Sánchez

Profesor Titular de Universidad

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

Sevilla, 2024

Trabajo de Fin de Grado: Sistema de activación de microimpulsores para satélites

Autor: Francisco Javier Estudillo Cabrera

Tutor: José Manuel Quero Reboul

Cotutor Francisco Antonio Perdigones Sánchez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a toda mi familia por su apoyo incondicional y por hacerme ver de lo que realmente era capaz. Gracias a ellos es que me comencé a interesar por la ciencia y la ingeniería, y he conseguido llegar hasta aquí. Agradezco a mi padre por su paciencia hacia mi curiosidad y por la cantidad de conversaciones diferentes que hemos tenido a partir de mis preguntas. Agradezco a mi madre por siempre apoyarme y darme ánimos, incluso cuando ni yo estaba seguro de ser capaz.

También, quiero agradecer enormemente a mis tutores José Manuel Quero y Francisco Perdignes, que han dedicado parte de su tiempo a este proyecto, ayudándome y permitiéndome aprender mucho más. Su papel ha sido vital para la elaboración de este proyecto.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros de la universidad que me han permitido disfrutar de estos años, a pesar de las dificultades, y me han ayudado a alcanzar mis objetivos.

Resumen

La exploración y explotación del espacio ha sido siempre un proyecto muy costoso tanto tecnológicamente como económicamente, pero uno que indudablemente ha provocado una gran mejora en nuestro conocimiento de nuestro planeta, nuestro sistema solar e incluso el universo. Hoy en día hemos normalizado los beneficios del espacio y, de una manera u otra, el mundo moderno se ha vuelto dependiente del espacio para poder mantener la estructura social y económica actual.

Este documento estará centrado en la investigación y desarrollo de un instrumento de navegación en el espacio, llamado micro propulsor, que, en principio, una vez instalado permitiría alterar las órbitas de los satélites de tal forma que se pudiera evitar una colisión, e incluso, poder llegar a conseguir desorbitar un satélite, una vez alcance el límite de su vida útil.

Aunque ya existen sistemas propulsados por gas para cambiar el rumbo de un satélite, estos tienen un tamaño muy superior y se propulsan con gas requiriendo la instalación de un depósito a bordo del satélite. Con este sistema, en cambio, se reduce enormemente el tamaño del propulsor y elimina la necesidad de un depósito, reduciendo el peso total a bordo, y suponiendo un coste económico mucho menor.

Para la realización de este proyecto se ha hecho uso del simulador COMSOL, para comprobar con anterioridad como evoluciona el sistema. También, se ha hecho uso de KiCad para el diseño de un PCB con resistencias impresas en este. Estas resistencias se fabricaron en los laboratorios de la escuela siguiendo un procedimiento que se explicará más adelante en este documento.

Finalmente, se llevaron a cabo diversas pruebas para comprobar como respondían los prototipos y las resistencias fabricadas al paso de corriente, y si eran capaces de iniciar la ignición de las pastillas de combustibles elaboradas.

Abstract

Exploration and exploitation of space have always been very costly projects, both technologically and economically, but ones that have undoubtedly led to significant improvements in our knowledge of our planet, our solar system, and even the universe. Today, we have normalized the benefits of space, and in one way or another, the modern world has become dependent on space to maintain the current social and economic structure.

This document will focus on the research and development of a space navigation instrument, called micro thruster, which, in principle, once installed, would allow the alteration of satellite orbits in such a way that it could avoid collisions, and even to deorbit a satellite once it reaches the end of its useful life.

Although gas-propelled systems already exist to change a satellite's trajectory, these are much larger in size and require onboard gas tanks for propulsion. With this system, however, the size of the thruster is greatly reduced and the need for a tank is eliminated, reducing the total onboard weight and resulting in a significantly lower economic costs.

For this project, the COMSOL simulator was used to previously check how the system evolves. Additionally, KiCad was used to design a PCB with printed resistors. These resistors were manufactured in the school laboratories following a procedure that will be explained later in this document.

Finally, various tests were conducted to check how the prototypes and the manufactured resistors responded to the passage of current and whether they were capable of initiating the ignition of the fabricated fuel pellets.

Índice

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Microsistemas y Micro Thrusters	3
1.3.1. Mecanismos de ignición	3
2 Planteamiento Inicial	6
2.1 Combustible sólido	6
2.1.1 Perclorato de Amonio (NH ₄ ClO ₄)	7
2.1.2 PDMS (C ₂ H ₆ OSi) _n	8
2.1.3 Compuestos	9
2.1.4 Fabricación	11
2.1.5 Almacenamiento	15
2.1.6 Pruebas	16
2.2 Resistencia y diseño teórico	20
2.2.1 Esquema de transferencia de calor	21
2.2.2 Resistencias prototipo	24
2.2.3 Resistencias diseñadas	25
2.3 Diseño eléctrico	27
2.3.1 Conexionado	27
2.3.2 Alimentación de la resistencia	30
3 Simulación y diseño de las resistencias	33
3.1 Simulación en COMSOL	33
3.1.1 Modelado del componente	33
3.1.2 Simulación y resultados	37
3.2 Diseño en KiCad	47
3.2.1 Metodología de diseño	47
3.2.2 Diseños realizados	50
4 Fabricación de resistencias	57
4.1 Equipamiento	57
4.2 Fabricación de las máscaras	62
4.2.1 Resultados	65
4.2.2 Problemas	65
4.3 Fabricación de resistencias en PCB	65
4.3.1 Resultados	68
4.3.2 Problemas	69

5	Resultados de experimentación	71
5.1	<i>Equipamiento</i>	71
5.2	<i>Montajes y metodología</i>	74
5.2.1	Montaje para el prototipo original con disparo en continua	74
5.2.2	Montaje para el prototipo original con disparo usando un condensador	75
5.2.3	Montaje para los diseños fabricados en laboratorio	76
5.3	<i>Resultados</i>	77
5.3.1	Prototipo en continua	77
5.3.2	Prototipo con condensador	81
5.3.3	Diseños fabricados en laboratorio	84
5.4	<i>Conclusión</i>	86
5.5	<i>Mejoras y trabajo a futuro</i>	86
	Referencias	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Proporción química del combustible 1 en masa.....	10
Tabla 2.2 Proporción química del combustible 1 en volumen	10
Tabla 2.3 Proporción química del combustible 2 en masa.....	10
Tabla 2.4 Proporción química del combustible 2 en volumen	10
Tabla 2.5 Temperaturas de combustión para varias muestras de combustibles.....	16
Tabla 2.6 Datos generales de ambos combustibles [10].....	18
Tabla 2.7 Velocidad de llama y consumo másico teóricos de ambos combustibles [10].....	18
Tabla 2.8 Velocidad de llama y consumo másico empíricos de ambos combustibles.....	18
Tabla 2.9 Datos térmicos y geométricos del micro propulsor [13].....	23
Tabla 2.10 Datos teóricos de la resistencia de cobre integrada	24
Tabla 2.11 Datos teóricos de la resistencia del Wire bonding	25
Tabla 2.12 Datos teóricos de las resistencias de 75 μm fabricadas en PCB.....	26
Tabla 2.13 Datos teóricos de las resistencias de 75 μm y doble longitud fabricadas en PCB.....	26
Tabla 2.14 Datos teóricos de las resistencias de 50 μm fabricadas en PCB.....	26
Tabla 2.15 Datos teóricos de las resistencias de 50 μm y doble longitud fabricadas en PCB.....	27
Tabla 5.1 Datos obtenidos durante las pruebas en continua	77
Tabla 5.2 Datos obtenidos durante las pruebas con condensador	82
Tabla 5.3 Corrientes para ignición del PCB.....	84
Tabla 5.4 Valores de resistencias del PCB.....	84
Tabla 5.5 Pruebas de disparo con dispositivo ULN2003.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Satélites orbitando la Tierra [3]	2
Figura 1.2 Matriz de Micro Thrusters soldada	3
Figura 2.1 Esquemático eléctrico del sistema de ignición con resistencia integrada en el depósito	6
Figura 2.2 Bote de perclorato [7]	7
Figura 2.3 Botes de agente curante y polímero	8
Figura 2.4 Trozo de PDMS polimerizado [8]	9
Figura 2.5 Pastillas de combustible 2 y 1	11
Figura 2.6 Utensilios varios	11
Figura 2.7 Báscula de precisión	12
Figura 2.8 Placa térmica con papel de aluminio protector	12
Figura 2.9 Superficie de metacrilato con cavidades fresadas	13
Figura 2.10 Lupa electrónica	13
Figura 2.11 Molde relleno del combustible 2	15
Figura 2.12 Bolsa para evitar humedades	15
Figura 2.13 Pruebas de velocidad de quemado	17
Figura 2.14 Residuos en el depósito	19
Figura 2.15 Estructura del micro propulsor	21
Figura 2.16 Esquemático de transmisión de calor	23
Figura 2.17 Resistencia original del micro propulsor	24
Figura 2.18 Dos hilos de wire bonding en paralelo	25
Figura 2.19 Esquemático de conexionado	28
Figura 2.20 Encapsulado ULN2003	29
Figura 2.21 Conexionado de pines [15]	29
Figura 2.22 Esquema del sistema de disparo para un solo micro propulsor [18]	30
Figura 2.23 Forma de onda resultante	30
Figura 2.24 Fuente de tensión	31
Figura 2.25 Condensador de 26000 uF	31
Figura 3.1 Menú integrado de COMSOL	34
Figura 3.2 Tabla de parámetros	34
Figura 3.3 Modelo de la resistencia de 100 um con materiales definidos	35
Figura 3.4 Físicas aplicadas	35
Figura 3.5 Ecuaciones de funcionamiento de un condensador	36
Figura 3.6 Sonda en un punto del dominio	36
Figura 3.7 Resistencia original	37
Figura 3.8 R100: Evolución de la temperatura superficial	38
Figura 3.9 R100: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 um)	38
Figura 3.10 Condensador: Corriente a través de la resistencia	39
Figura 3.11 Condensador: Temperaturas alcanzadas	40
Figura 3.12 Condensador: Temperaturas en la superficie de la pastilla (70 um)	40
Figura 3.13 Condensador: Temperatura en superficie de resistencia obtenida en caso óptimo	41
Figura 3.14 Condensador: Temperatura en superficie (70 um) de pastilla en caso óptimo	41
Figura 3.15 Resistencia de 75 um	42
Figura 3.16 R75_L1: Evolución de la temperatura superficial	42
Figura 3.17 R75_L1: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 um)	42
Figura 3.18 Resistencia de 75 um y longitud doble	43
Figura 3.19 R75_L2: Evolución de la temperatura superficial	43
Figura 3.20 R75_L2: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 um)	44
Figura 3.21 Resistencia de 50 um	44
Figura 3.22 R50_L1: Evolución de la temperatura superficial	45

Figura 3.23 R50_L1: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 μm)	45
Figura 3.24 Resistencia de 50 μm y doble longitud	46
Figura 3.25 R50_L2: Evolución de la temperatura superficial	46
Figura 3.26 R50_L2: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 μm)	46
Figura 3.27 Lista de componentes	47
Figura 3.28 Importar archivos gráficos.....	48
Figura 3.29 Menú de KiCad	48
Figura 3.30 Configuración de pista	49
Figura 3.31 Configuración del área de relleno	49
Figura 3.32 Diseño 1: Resistencias de 125 μm	50
Figura 3.33 Diseño 1: Resistencias de 75 μm	51
Figura 3.34 Diseño 1: Resistencias de 50 μm	51
Figura 3.35 Diseño 1 completo.....	51
Figura 3.36 Diseño 2 completo.....	52
Figura 3.37 Diseño 3: Resistencias de 75 μm	53
Figura 3.38 Diseño 3: Resistencias de 50 μm	53
Figura 3.39 Diseño 3: Resistencia de 100 μm	53
Figura 3.40 Diseño 3 completo.....	53
Figura 3.41 Diseño 4: Resistencias de 75 μm	54
Figura 3.42 Diseño 4: Resistencias de 50 μm	54
Figura 3.43 Diseño 4 completo.....	55
Figura 3.44 Diseño estructural	55
Figura 3.45 Diseño final completo	56
Figura 4.1 Tubos fluorescentes azul y amarillo respectivamente	57
Figura 4.2 Photoplotter.....	58
Figura 4.3 Revelador para acetato	58
Figura 4.4 Fijador para acetato.....	59
Figura 4.5 Placa de PCB sin resina.....	59
Figura 4.6 Lata de resina positiva	60
Figura 4.7 Placa térmica con protección de papel de aluminio	60
Figura 4.8 Máquina alineadora.....	61
Figura 4.9 Revelador de PCB.....	61
Figura 4.10 Botellas de agua fuerte (20% HCl) y agua oxigenada respectivamente	62
Figura 4.11 Ventana de trazado de KiCad.....	63
Figura 4.12 Gerber to bitmap.....	63
Figura 4.13 Tercer diseño y diseño final respectivamente	65
Figura 4.14 Placa térmica con PCB encima	66
Figura 4.15 Placa con máscara y soporte con PCB	67
Figura 4.16 PCB revelada.....	67
Figura 4.17 Tercer diseño de circuito impreso y resistencia de 50 μm de doble longitud.....	68
Figura 4.18 Último diseño del circuito impreso.....	68
Figura 4.19 Resistencias de 75 μm	69
Figura 4.20 Resistencias de 50 μm	69
Figura 4.21 Cortocircuitos de pistas.....	69
Figura 4.22 Problemas de uniformidad de la resina	70
Figura 5.1 Fuente de tensión	71
Figura 5.2 Condensador 22000 μF	71
Figura 5.3 Osciloscopio [21].....	72
Figura 5.4 Generador de señales [22].....	72
Figura 5.5 Protoboard con componentes y conexiones.....	72
Figura 5.6 Soldador e hilos de estaño	73
Figura 5.7 Multímetro.....	73
Figura 5.8 Termómetro de termopar.....	74
Figura 5.9 Prototipo dentro del bloque de conexiones.....	75

Figura 5.10 Descarga por condensador sin y con resistencia	75
Figura 5.11 Placa PCB con transitor ULN2003.....	76
Figura 5.12 Disparo fallido de combustible 1.....	80
Figura 5.13 Ambas caras de un disparo exitoso con combustible 2.....	80
Figura 5.14 Disparos exitosos, pero con un sellado deficiente que rompió los depósitos	80
Figura 5.15 Resultado de la combustión de la prueba 11 al madurar en depósito	81
Figura 5.16 Descarga del condensador con 2 V.....	81
Figura 5.17 Formas de onda de las tensiones del condensador y la resistencia antes de rotura de esta última (4 V) en prueba 2.....	83
Figura 5.18 Prueba 5. Forma de onda de la tensión a la entrada de la resistencia al fundirse.....	83
Figura 5.19 Aspecto de las resistencias al fundirse por descarga del condensador.....	83
Figura 5.20 Resultados de las combustiones sobre la placa PCB	85
Figura 5.21 Colocación de las pastillas y pruebas de disparo.....	85

Notación

A	Amperios
m	Metros
mm	Milímetros
um	Micrómetros
s	Segundos
F	Faradios
uF	Microfaradios
m ³	Metros cúbicos
m ²	Metros cuadrados
°C	Grados centígrados
K	Grados Kelvin
Kg	Kilogramos
J	Julios
V	Voltios
W	Watts
Ω	Ohmios
C	Culombios

1 INTRODUCCIÓN

Podemos juzgar el progreso por la valentía de las preguntas y la profundidad de las respuestas; por la osadía de encontrar la verdad más que en regocijarnos en lo que nos hace sentir bien.

-Carl Sagan -

La exploración y explotación del espacio ha sido siempre un proyecto muy costoso tanto tecnológicamente como económicamente, pero uno que indudablemente ha provocado una gran mejora en nuestro conocimiento de nuestro planeta, nuestro sistema solar e incluso el universo. Hoy en día hemos normalizado los beneficios del espacio, ya sea para comprobar el clima, poder comunicarnos con otras partes del planeta en segundos o poder comprobar nuestra ubicación en el móvil. De una manera u otra el mundo moderno se ha vuelto dependiente del espacio para poder mantener la estructura social y económica actual. [1]

1.1 Contexto

El inicio de la era espacial para la humanidad tiene lugar en el año 1957 con el lanzamiento de satélite Sputnik-1 por parte de las Unión Soviética. Este evento dio lugar a la conocida carrera espacial de los años sesenta, años en los que se produjeron gran cantidad de logros en el campo aeroespacial dado el interés militar y político de ser la primera nación en poder controlar el espacio. Todo esto culminó en el alunizaje de las misiones Apolo por parte de Estados Unidos. [1]

La explotación económica de satélites para proveer comunicaciones civiles y para la observación de la Tierra estuvo en sus inicios estrictamente controlada por los gobiernos. Construir satélites y ponerlos en órbita requería de equipo y materiales de muy alta tecnología y coste que, sumado a los costes y riesgos de los cohetes, volvía prohibitiva esta práctica para las empresas y naciones de menor poder económico.

Sin embargo, esto comenzó a cambiar con la aparición y alta disponibilidad de los componentes microelectrónicos que permitieron la posibilidad de crear satélites físicamente más pequeños y que requerían menos personal, aparte de instalaciones más modestas. Además, estos se podían añadir como cargas secundarias en los lanzamientos de cohetes, lo que redujo significativamente los costes de lanzamiento.

En torno al año 2000, el concepto de “SmallSat” (nombre dado a los satélites de peso menor a 500 kg) o satélite pequeño, maduró lo suficiente como para ser capaz de combinar tecnología, costes y utilidad de manera lo suficientemente efectiva como para poder cruzar el umbral de viabilidad económica, y fue específicamente con las misiones de observación de la Tierra con las que tuvieron el mayor impacto inicial. Poco después su uso se diversificó aún más pasando a campos como la comunicación, GPS u observación del clima, lo que finalmente produjo su crecimiento exponencial. [2]

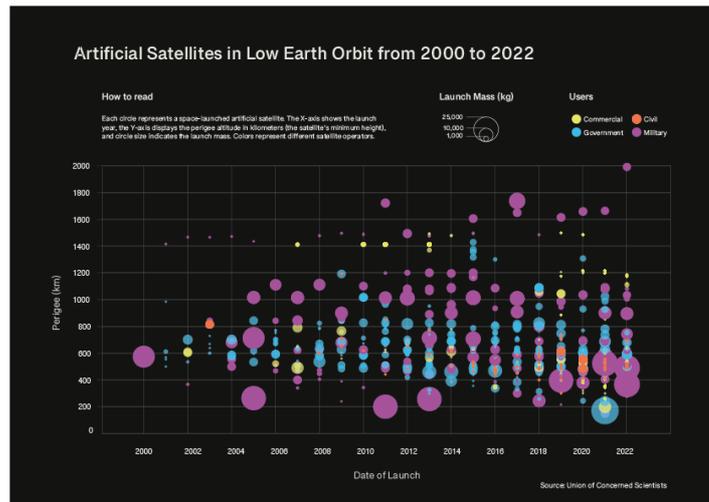


Figura 1.1 Satélites orbitando la Tierra [3]

1.2 Objetivos

Entre los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado se incluyen el diseño de un sistema de ignición para los Micro Thrusters aportados mediante programas como Comsol Multiphysics 6.1 para estudiar cómo responde el sistema a unas condiciones dadas y LTspice para el diseño electrónico propiamente dicho, y también, la realización de pruebas en laboratorio con un prototipo del propulsor, para comprobar la viabilidad de los diseños y de los combustibles utilizados. Finalmente, se fabricará un diseño final combinando el sistema de disparo escogido y la estructura de conexiones a los pines de los propulsores con la estructura final diseñada para la estructura de cohetes.

El conjunto de mi trabajo junto al de mi compañero, que se centra en el apartado estructural, dará lugar a la creación de una placa de propulsores la cual mantendrá agrupaciones de estos en serie para poder disparar varias veces en una misma dirección cartesiana (2D). Cada agrupación tendrá una única tobera de salida y se activarán de manera individual aplicando una corriente en las resistencias de los depósitos.

El desarrollo de estos dispositivos permitirá su aplicación en microsátélites y menores para que con pequeñas propulsiones puedan alterar levemente su rumbo, consiguiendo de este modo modificar sus trayectorias para evitar colisiones o para mantener una nueva trayectoria. Si se consigue la suficiente potencia con estas propulsiones se podría incluso conseguir el desorbitado de los satélites para eliminarlo de la órbita y reducir así la basura espacial.

Aunque ya existen sistemas propulsados por gas para cambiar el rumbo de un satélite, estos tienen un tamaño muy superior y se propulsan con gas requiriendo la instalación de un depósito a bordo del satélite. Con nuestro sistema, en cambio, se reduce enormemente el tamaño del propulsor y elimina la necesidad de un depósito, reduciendo el peso total a bordo, y supone un coste económico mucho menor.



Figura 1.2 Matriz de Micro Thrusters soldada

1.3. Microsistemas y Micro Thrusters

Con el creciente desarrollo de las tecnologías MEMS (micro-electromechanical systems) los micro y nano satélites están gradualmente reemplazando a los satélites tradicional a la hora de realizar acciones específicas, como pueden ser verificar nuevas tecnologías espaciales o coordinarse en formaciones de gran número de satélites. Comparados con los satélites tradicionales estos tienen tiempos menores de desarrollo, funciones específicas y costes de lanzamiento e investigación menores. [3]

Este aumento del número de micro y nano satélites ha provocado la necesidad de nuevos sistemas de propulsión que se adecuen a los tamaños y necesidades de estos satélites. Debido a su menor tamaño, menor masa y menor momento de inercia es necesario estudiar un nuevo sistema de propulsión con alta integración, bajo consumo de potencia, bajo empuje e impulso, y que, además, sea eficaz para tareas de mantenimiento orbital, maniobrabilidad orbital y control de altitud.

Actualmente, podemos encontrar multitud de diversas tecnologías MEMS en desarrollo, que incluyen el tipo de líquido vaporizado, de plasma, de enfriamiento y de combustible sólido. En nuestro caso nos hemos decantado por el desarrollo de combustible sólido por las siguientes ventajas: estructura sencilla, pequeñas dimensiones y bajo peso, además, requieren de un menor consumo de potencia y pueden producir pequeños e impulsos precisos. Una desventaja que se podría expresar es que son de un único uso, por lo que aquellos propulsores que ya han disparado quedan inútiles, de ahí la necesidad de crear una estructura de matriz para poder hacer uso de múltiples disparos y así cumplir los requerimientos de un sistema de micro propulsión. [4]

1.3.1. Mecanismos de ignición

En función del tipo de combustible utilizado en la ignición podemos encontrar gran variedad de diseños de encendedores para conseguir iniciar la combustión. Tenemos los siguientes tipos [4]:

- Para propulsión por combustible líquido:
 - Ignición por chispa

- Ignición catalítica
- Para propulsión por combustible líquido vaporizado:
 - Ignición con micro calentador interno
 - Ignición con micro calentador externo
- Para propulsión de plasma:
 - Ignición electrotérmica
 - Ignición mediante pulsos con combustible líquido/sólido
- Para propulsores de combustible sólido
 - Ignición con micro calentador interno

Se pueden encontrar otros sistemas en distintos proyectos de investigación, pero en la actualidad estos son los más empleados.

Ignición por chispa

La ignición es realizada con dos electrodos metálicos integrados en el interior del micro propulsor para conseguir de esta manera un contacto directo con el combustible líquido y así lograr que la mayor parte de la energía se deposite en este. De esta manera se consigue que con tensiones de 20 a 60 voltios se produzca una descarga entre los electrodos que comience la descomposición del líquido en los gases que serán expulsados por la tobera.

Este método es considerablemente complejo a la hora de conseguir colocar los electrodos a una distancia adecuada y poder conectarlos a una conexión eléctrica, sumado a un alto consumo eléctrico.

Ignición catalítica

Para este método se integran láminas de plata o platino en el interior del propulsor como un catalizador combinado con un micro calentador eléctrico, de manera que, al pasar la corriente por una resistencia, que actuará de calentador, se calentará el líquido hasta una temperatura suficiente en la que que forzado por el catalizador comience a descomponerse rápidamente.

Es un método que se ha observado que tiene problemas a la hora de conseguir suficiente propulsión y no se consigue una eficiencia suficiente con una lámina de catalizador integrada en una de las paredes del depósito.

Ignición con micro calentador interno

En este sistema se diseña una resistencia para que actúe como un micro calentador cuando esté alimentada con corriente. Se consigue tener un contacto directo con el combustible (líquido o sólido), lo que reduce las pérdidas de calor en el micro propulsor.

Los mayores problemas observados son consumos relativamente altos, tiempos de ignición elevados (>ms)

y diseño complejo.

Ignición con micro calentador externo

El principio de funcionamiento es el mismo que el anterior, pero en este caso el calentador se encuentra colocado en el exterior del depósito de modo que, aunque se necesita mayor generación de calor, se produce una distribución más uniforme de la temperatura consiguiendo así una combustión más completa.

Los mayores problemas observados son consumos relativamente altos, tiempos de ignición elevados ($>ms$) y pérdidas de calor.

Ignición electrotérmica

En este caso el propulsor funciona por el principio de descarga de plasma de baja potencia, que se puede generar empleando ondas de radio frecuencia o microondas de tal forma que el combustible se calienta por el calor producido por estas descargas. Se emplea normalmente con gases como argón, hidrógeno o helio.

Este sistema de ignición tiene la desventaja de que necesita un reservorio de alta presión en la que mantener los gases o un dispositivo criogénico.

Ignición mediante pulsos

Con este método logramos, mediante el uso de fuerzas electromagnéticas, acelerar una pequeña cantidad de plasma a una alta velocidad de descarga, gracias a la rápida descarga energética de un condensador. Se puede lograr menor o mayor empuje variando la frecuencia del pulso. Pese a su estructura sencilla y pequeño tamaño es capaz de generar un impulso preciso y empuje específico relativamente largo.

En este caso las desventajas son una baja frecuencia de trabajo y propulsión deficiente, junto a problemas de contaminación y no uniformidad del consumo del combustible.

2 PLANTEAMIENTO INICIAL

En este capítulo se va a desarrollar el diseño base del sistema de ignición, presentando los fundamentos teóricos de diseño, funcionamiento y fabricación del sistema de disparo y del combustible que se utilizará para realizar las pruebas de ignición y que una vez completado el proyecto irán en el interior del depósito del micro propulsor.

El diseño completo de nuestro sistema de ignición, para una sola célula, estará conformado por una fuente de tensión, una resistencia que emitirá calor una vez pase corriente a través de ella, un interruptor que nos permitirá controlar el paso de corriente (se utilizarán transistores a modo de interruptor, debido a la imposibilidad de interacción manual en el interior del satélite), el cableado de conexión que permitirá conectar todas las partes del sistema (una vez se tenga un prototipo completo funcional, los transistores se conectarán a un microcontrolador para tener una activación controlada de los micro propulsores) y por último el depósito donde vendrá introducido el combustible.

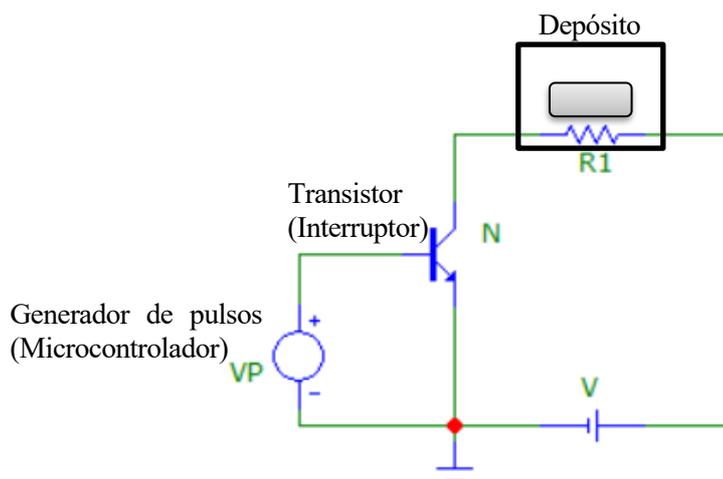


Figura 2.1 Esquemático eléctrico del sistema de ignición con resistencia integrada en el depósito

Para el caso de múltiples células de micro propulsores simplemente instalamos el mismo circuito en paralelo a la fuente de tensión tantas veces como células haya, conectando cada transistor a una alimentación distinta (varios pads de microcontrolador). Para números altos de micro propulsores se puede realizar matrices de conexión para ahorrar en número de transistores y de conexiones.

2.1 Combustible sólido

Para las pruebas de ignición en el laboratorio se han realizado distintas mezclas de diversos compuestos, pero siempre giran en torno a dos compuestos claves que son el perclorato de amonio (NH_4ClO_4) y el PDMS ($\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi}_n$). El perclorato de amonio se utiliza como la base del combustible de tal forma que una vez se alcance la temperatura requerida el material en contacto con la resistencia entra en combustión y se expanda en todas direcciones, mientras que el PDMS se utiliza como material estructural para mantener el

perclorato unido en forma de pastillas, de forma que su manipulación se facilite.

Las pastillas se realizarán mediante un molde en el que vendrán talladas múltiples cavidades de dimensiones 0.5x2x5 mm (volumen total 5 mm³) o se depositará el material directamente en el depósito que también mantiene estas dimensiones.

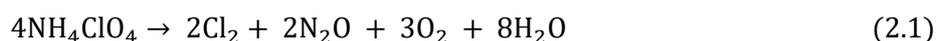
2.1.1 Perclorato de Amonio (NH₄ClO₄)

El perclorato de amonio (NH₄ClO₄) es una sustancia cristalina blanca considerada como un compuesto químico considerablemente estable. Tiene una temperatura de descomposición base de 130°C, aunque esta varía con el método de obtención y posteriores tratamientos y almacenaje. Es un material comburente, pero que puede llegar a producir fuertes explosiones. [5] [6]



Figura 2.2 Bote de perclorato [7]

Para temperaturas inferiores a 300°C se produce una descomposición con la siguiente ecuación estequiométrica [5]:



Adicionalmente a estos compuestos, también se produce de manera residual ClO₂, HCl y N₂. La descomposición a estas temperaturas es extremadamente sensible al crecimiento del cristal, la presencia de otros componentes y los tratamientos mecánicos recibidos. También, se comprueba que la descomposición a temperaturas bajas es incompleta y deja múltiples residuos conformados por perclorato sin descomponer.

Para temperaturas mayores a 380°C se produce una descomposición con la siguiente ecuación estequiométrica [5]:



Adicionalmente a estos compuestos, también se produce de manera residual NO₂, HCl y NOCl. Aunque también sensible a tratamientos y presencia de otros componentes, es en menor medida que en el caso anterior. En este caso la descomposición a temperaturas altas sí consume todo el compuesto sin dejar ningún residuo seco.

Como se puede comprobar de ambas descomposiciones, en ambas el propio perclorato genera oxígeno que reacciona con NH₃, que es un producto intermedio, permitiendo el inicio y mantenimiento de una combustión, incluso en situaciones de atmósferas sin oxígeno o directamente en vacío. La combustión teóricamente debe seguir la siguiente estequiometría [6]:

1. Descomposición inicial del perclorato de amonio:



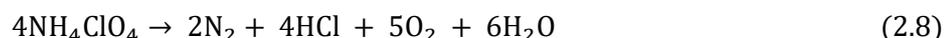
2. Descomposición de productos intermedios:



3. Reacción de oxidación:



4. Esto nos deja el siguiente resultado de la combustión:



Ha de tenerse en cuenta que esto es una simplificación muy básica de todas las reacciones que realmente están teniendo lugar en la combustión del compuesto y que se ven alteradas por la composición exacta del perclorato, así como por la composición de los gases que lo rodean. Por tanto, puede haber componentes residuales que no están contemplados en la reacción, pero estos escapan del objetivo de este TFG.

Algo para tener en cuenta es la importancia de los aditivos, que funcionan a modo de catalizadores, en el proceso de descomposición térmica pues alteran la temperatura necesaria y la velocidad a la que se produce esta. Por poner un ejemplo tenemos una mezcla de perclorato de amonio con aluminio que, pese a ser metálico puede actuar como combustible y, aunque no altera el ritmo de descomposición si altera las temperaturas mínimas. Su estequiometría de combustión final sería la siguiente:



2.1.2 PDMS ($\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi}$)_n

El polidimetilsiloxano o PDMS es un polímero orgánico de la familia de las siliconas que es usado en variedad de actividades, como puede ser en microfluídica, en alimentación como aditivo, producción de geles y como anti-espuma en distintas bebidas o aceites lubricantes. Para solidificarlo se mezcla el polímero líquido con un agente polimerizante o activador que una vez calentado el material cura y se endurece. [8]

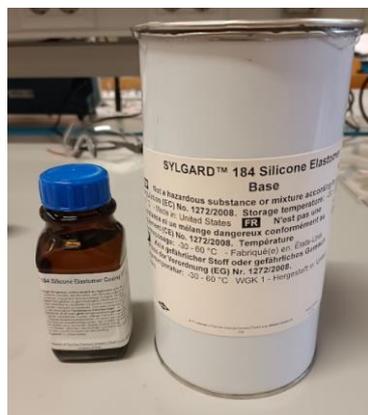


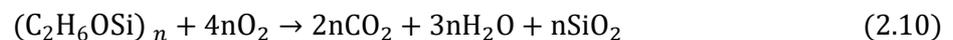
Figura 2.3 Botes de agente curante y polímero

Una vez endurecido el PDMS se vuelve un elastómero transparente, hidrofóbico y químicamente estable.

Las principales razones para su uso como componente de nuestro combustible es su bajo precio comparado con otros materiales de la familia de las siliconas, su facilidad de moldeo que nos permite conformar las pastillas de combustible de tal forma que se adapten a la forma del depósito y que al cerrarlos se queden en contacto con la resistencia interna, y que una vez iniciada la combustión deja poco residuo sólido (dado el pequeño volumen de las pastillas), que dado su bajo peso y tamaño es fácilmente expulsado por la tobera del propulsor.

Un inconveniente que tiene este compuesto es su baja conductividad térmica de un valor aproximado de $0.2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, lo que lo vuelve un retardante térmico y puede provocar un retraso en la transmisión térmica, así como alterar la temperatura de combustión del perclorato debido a su sensibilidad térmica (cosa que ocurre, pero que nos resulta beneficioso debido a la necesidad de fijar ambas placas del propulsor mediante una soldadura de estaño, que requiere una temperatura mínima de 232°C).

La ecuación estequiométrica de la combustión del PDMS es la que sigue:



En este caso si requerimos oxígeno para la combustión del PDMS, pero este es aportado por el perclorato.



Figura 2.4 Trozo de PDMS polimerizado [8]

2.1.3 Compuestos

Como antes se ha comentado se han realizado multitud de mezclas de prueba para obtener un combustible funcional, que prendiera con una temperatura razonable, manteniendo una velocidad de quemado suficiente y generando un empuje que cumpla los requisitos exigidos (Este TFG no se centra especialmente en el cumplimiento de este último requisito pues ya entra también en el diseño estructural).

Se han realizado en concreto dos mezclas distintas una en la que solo se combinan perclorato (AP) y PDMS, y otra donde sumado a los componentes anteriores se añade aluminio (Al) y óxido de hierro III (Fe_2O_3). Además, también se han realizado pruebas añadiendo pólvora y azufre.

En el primer caso se realiza una mezcla manteniendo la proporción que se ve en la **Tabla 2.1** y en la **Tabla 2.2**:

Tabla 2.1 Proporción química del combustible 1 en masa

Proporción en masa (g)			
	PDMS		AP
	17%		83%
	Resina	Activador	
	91%	9%	
Total	15%	2%	83%

Tabla 2.2 Proporción química del combustible 1 en volumen

Proporción en volumen (mL)			
	PDMS		AP
	17%		83%
	Resina	Activador	
	86%	14%	
Total	15%	2%	83%

Se debe tener en cuenta que con tan solo 2 gramos de compuesto se puede llegar a realizar más de 10 pastillas de combustible.

Con esta composición se obtienen pastillas de un color blanquecino y estructura endeble, que se deben manipular con cuidado pues se deshacen muy fácilmente (sumado a que es un material comburente y tóxico), como la que se ve en la **Figura 2.5**.

Para el segundo caso se mantiene la proporción mostrada en **Tabla 2.3** y en la **Tabla 2.4**:

Tabla 2.3 Proporción química del combustible 2 en masa

Proporción en masa (g)					
	PDMS		AP	Fe ₂ O ₃	Al
	26.6%		67.3%	0.9%	5.2%
	Resina	Activador			
	90.9%	9.1%			
Total	24.2%	2.4%	67.3%	0.9%	5.2%

Tabla 2.4 Proporción química del combustible 2 en volumen

Proporción en volumen (mL)					
	PDMS		AP	Fe ₂ O ₃	Al
	27.8%		69.6%	0.2%	2.3%
	Resina	Activador			
	85.7%	14.3%			
Total	23.9%	4.0%	69.6%	0.2%	2.3%

Con esta composición obtenemos pastillas de un color grisáceo y estructura algo más compacta que en el caso anterior, pero de todas formas se aconseja una manipulación cuidadosa. Se observa en la **Figura 2.5**.



Figura 2.5 Pastillas de combustible 2 y 1

Los compuestos restantes conformados por pólvora y/o azufre, no tienen proporciones definidas debido a que en el caso de la pólvora solo se utilizaba como una primera fase de combustión colocándose sobre la resistencia y luego depositando la pastilla, pero no se lograba una mejora real ya que la temperatura de combustión se mantenía igual y se producían dos combustiones en distintos instantes de tiempo, ardiendo primero la pólvora, debido a su contacto directo con la resistencia, y luego la pastilla. En el caso del azufre si había una mejora en la temperatura de combustión de la pastilla, pero al mezclarlo todo y dejarla curar, tras un tiempo considerable no se comprobó que el PDMS se endureciera y se mantuvo en un estado semilíquido, posiblemente el azufre había hecho reacción con este o con el agente activador provocando que nunca llegase a curar el compuesto. [9]

2.1.4 Fabricación

En este apartado nos vamos a centrar tanto en las herramientas utilizadas para la fabricación del combustible como en cada uno de los pasos necesarios para obtener una cantidad suficiente de pastillas. Teniendo en cuenta que los procedimientos para obtener uno u otro combustible solo varían en la mezcla realizada voy a describir los pasos a seguir una única vez, teniendo en cuenta que para obtener uno u otro combustible deberá alterar las proporciones a usar.

2.1.4.1 Herramientas utilizadas

A continuación, expresaré una lista de las diversas herramientas utilizadas para la mezcla y fabricación de los combustibles:

- **Utensilios de manipulación**



Figura 2.6 Utensilios varios

Aquí podemos ver distintos utensilios que utilizamos para poder manipular los componentes de la mezcla o para poder medir adecuadamente los volúmenes a depositar (sobre todo resina y activador), así como para poder combinar de forma manual la mezcla en cuestión. Sobre todo, se tratan de una bandejita, jeringuillas y palillos de plástico.

- **Báscula de precisión**



Figura 2.7 Báscula de precisión

Se trata de una báscula del modelo *BLAUSCAL*, que permite medir pesos de hasta 600 g con una precisión de 0.01 g. La báscula se usa para poder medir de manera precisa la masa de los componentes, en cuestión es necesaria para medir las proporciones de perclorato de amonio, el óxido de hierro y el aluminio.

- **Mezcladora automatizada**

Se fabricó un prototipo de mezcladora realizada mediante impresión 3D. Se le acopló un pequeño motor de 5V unido a un gancho que gira en el interior de un cubo de mezcla. Tener en cuenta que este dispositivo fue entregado por el tutor José Manuel Quero para facilitar las labores de mezcla.

- **Placa térmica Isotemp**

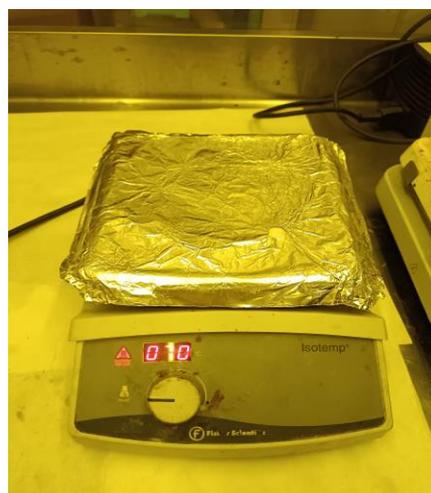


Figura 2.8 Placa térmica con papel de aluminio protector

Modelo *Isotemp* del distribuidor *Fisher scientific*. Calentamiento por inducción magnética con precisión de 5 grados centígrados, con rango de 0 a 540°C. Esta placa permite un control preciso de la temperatura de la superficie lo cual es útil para el proceso de curado del PDMS, una vez la mezcla ya está completada.

- **Molde para pastilla / Depósitos**



Figura 2.9 Superficie de metacrilato con cavidades fresadas

Para la elaboración de las pastillas se necesita de una cavidad que le dé la forma a esta antes de comenzar el proceso de curado, por ello se han elaborado perforaciones en paneles de metacrilato con las dimensiones necesarias. Otro procedimiento realizado es introducir la mezcla directamente en los depósitos para que cure en el interior y de esta forma saltarnos un paso.

- **Lupa electrónica**



Figura 2.10 Lupa electrónica

Lupa electrónica serie *OPTIKA*. Hacemos uso de la lupa electrónica a la hora de perfilar las pastillas depositadas en el molde para que queden uniforme y sin rebabas. También, ayuda a la hora de introducir el combustible dentro de los depósitos.

- **Material de seguridad**

Se recomienda el empleo de guantes y mascarillas, ya que se están usando productos químicos que pueden ser nocivos para la salud humana si se tratan sin cuidado.

2.1.4.2 Procedimiento

Una vez expresadas todas las herramientas necesarias para la elaboración de las pastillas de combustible podemos pasar a la lista de pasos a seguir para elaborar los dos combustibles utilizados (Se realizará de ejemplo 2 gramos de cada combustible, considerando combustible 1 como PDMS+AP y combustible 2 como PDMS+AP+METALES):

- 1) Se comienza recogiendo y colocando todo el equipo necesario en un lugar cercano para no poder realizar todo el procedimiento sin interrupciones.
- 2) Se recomienda la utilización de mascarilla y guantes, dado el uso de químicos tóxicos y comburentes.
- 3) Se utilizará un platillo de plástico para depositar en este los compuestos. Se coloca encima de la báscula y teniendo en cuenta el peso del platillo empezamos a depositar los materiales.
- 4) Mediante el uso de una jeringuilla se medirán los volúmenes a depositar de PDMS y activador (Combustible 1: Resina=0.25mL y Activador=0.04mL) (Combustible 2: Resina=0.42mL y Activador=0.04mL), y se depositarán en el platillo.
- 5) Mediante el uso de un palillo se revuelve la resina y el activador para homogeneizar la mezcla.
- 6) A continuación, se recogen el perclorato y metales, si se van a utilizar, y se añaden poco a poco hasta alcanzar la masa requerida (Combustible 1: AP=1.66g) (Combustible 2: AP=1.346g Fe₂O₃=0.0175g y Al=0.1049g). Una vez depositado todo se vuelve a batir todo con el palillo para homogeneizar la mezcla (¡Cuidado material explosivo!).
- 7) Opcional. Introducir la mezcla en la mezcladora 3D y la dejamos batir unos 5-10 min hasta que todo esté bien mezclado (no está confirmado su beneficio).
- 8) Una vez se tiene el compuesto final formado, se deposita en el interior del molde diseñado o directamente en los depósitos de los propulsores, mediante la ayuda de una espátula para esparcir todo entre las cavidades y con la ayuda de una aguja ajustamos los bordes para eliminar excesos y defectos. En la **Figura 2.11** se pueden ver como quedan las pastillas de una producción del combustible 2.



Figura 2.11 Molde relleno del combustible 2

- 9) Finalmente, el material se deja curar durante 2 o 3 horas en la placa térmica a una temperatura de en torno 50 a 60°C, aunque se ha comprobado que el material también cura adecuadamente a temperatura ambiente, pero se desconoce si esto tiene un efecto real o no en la fiabilidad de las pastillas.
- 10) Una vez pasado el tiempo requerido simplemente queda extraer las pastillas mediante una aguja y, si se requiere, con ayuda de la lupa electrónica, y guardarlas en un envase adecuado.

2.1.5 Almacenamiento

En un principio para el almacenamiento de las pastillas se empezó utilizando unos pequeños envases de plástico con tapón que permitían una protección del combustible de las condiciones exteriores, pero pasado ya un par de semanas se comprobaba que durante las pruebas de combustión realizadas no había repetitividad de resultados con las de previas semanas, requiriendo corrientes mayores para lograr disparar o no disparaban en absoluto. Este problema se investigó y se habló con personas de mayor experiencia en el área de la cohería, en específico del área del combustible, y se consideró que una causa de estos problemas podía ser la absorción de humedad del ambiente por parte del combustible, provocando defectos en este o evitando directamente la combustión. Para solucionar esto se decidió utilizar unas bolsas de plástico sellables en las que se introduciría los envases con las pastillas junto a pastillas de absorción de humedad y a papeles indicadores de humedad, que pasan de azul a rosado en función de la humedad.



Figura 2.12 Bolsa para evitar humedades

Tras realizar este cambio se comprobó que el deterioro del combustible era mucho menor y tenían mayor repetitividad durante periodos de tiempo mayores, permitiendo poder producir grandes cantidades de

combustible para su uso tardío ya que se evita la necesidad de tener que producir nuevas pastillas en periodos cortos.

2.1.6 Pruebas

Para el estudio del funcionamiento y utilidad de las pastillas de combustibles se han realizado algunas pruebas para comprobar su fiabilidad, entre estas se incluyen pruebas de temperatura de combustión, velocidad de quemado y rendimiento de la combustión.

- **Pruebas de Temperatura**

Para estas pruebas se ha hecho uso de la placa térmica y se han utilizado algunas pastillas de ambos combustibles realizados (1: PDMS+AP 2: PDMS+AP+Fe₂O₃+Al), de tal manera que se pueda obtener una media de la temperatura mínima necesaria para lograr iniciar la reacción.

Un problema observado durante la realización de las pruebas es que inicialmente se incrementaba poco a poco la temperatura de la superficie de la placa para que cuando se alcanzara esta temperatura se pudiera ver la temperatura exacta con la que se inicia la combustión, pero este procedimiento resultó ser poco fiable debido a que las pastillas al calentarse a bajas temperaturas comenzaban a “cocinarse” provocando que el material empezara a descomponerse sin alcanzar la temperatura de combustión. Esto a su vez hacía aumentar la temperatura mínima requerida por tanto los resultados eran bastante dispares entre dos pastillas realizadas con la misma mezcla. Había casos en los que se sumaba el problema de humedad, por lo cual directamente no se producía la combustión y el PDMS se evaporaba dejando el perclorato desperdigado.

Por tanto, para evitar este problema se decidió partir desde una temperatura de 300°C, que considerando pruebas realizadas con los propulsores era insuficiente para iniciar la combustión y se colocaban las pastillas envueltas en papel de aluminio unos segundos sobre la placa térmica. Una vez comprobado si hay o no combustión, se sacan las pastillas y se incrementa la temperatura en 10°C. Esto continúa hasta conseguir que todas las pastillas combustionen.

A continuación, los resultados de las pruebas:

Tabla 2.5 Temperaturas de combustión para varias muestras de combustibles

Tiempo	Combustible 1 (°C)		Combustible 2 (°C)	
	1 día	3 días	1 día	5 días
1	370	400	390	430
2	380	390	390	420
3	380	450*	390	430
MEDIA	376,666667	413,333333	390	426,666667
		395		

*En este caso el combustible se ha dejado demasiado tiempo en la placa térmica sin alcanzar la combustión por lo que la pastilla se ha “cocinado” y por tanto ha provocado un aumento de la temperatura. Por esta razón se vuelve hacer la media de las temperaturas, pero considerando solo los dos primeros valores.

En la **Tabla 2.5** se comprueba primero, que hay un aumento de la temperatura de combustión de ambos combustibles con el paso del tiempo, aunque no puedo determinar con seguridad si esto se debe a un

problema de humedades (estas muestras ya se guardaban en las bolsas antihumedad, así que la causa estaría en la manipulación), a la temperatura ambiente que había cada día pues no se realizó una comprobación (esto incluye cualquier corriente de aire provocado por tener las ventanas abiertas o el aire acondicionado puesto) o quizás a un proceso de envejecimiento del material que desconocemos.

De todas formas, son valores de temperatura que se pueden llegar a alcanzar mediante el uso de una pequeña resistencia y sus temperaturas superan el de fundición del estaño por lo que no habría peligro de explosión al sellar los propulsores. Por tanto, ambos son combustibles válidos desde el punto de vista de la temperatura.

- **Pruebas de velocidad de quemado**

Estas pruebas consisten en introducir un cierto volumen de combustible en cavidades alargadas talladas en metacrilato o madera, para que curen en su interior. Una vez se tenga el material curado, mediante el uso de un mechero se inicia la combustión en el inicio de la cavidad para que esta se propague hasta el final.



Figura 2.13 Pruebas de velocidad de quemado

Para realizar los estudios correctamente se requiere el uso de algunas ecuaciones. Primero mediremos la tasa de consumo másico de la mezcla durante la combustión. Para ello se aplica la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \rho_f * A_f * u_f \quad (2.11)$$

De esta manera queda definido el consumo másico como la variable \dot{m} (medido en kg/s), que es a su vez el resultado del producto de la densidad del combustible ρ_f (medido en kg/m³) por el área a través de la cual ocurre la combustión A_f (medido en m²) y por la velocidad a la que el combustible se consume u_f (medido en m/s).

A parte se ha hecho uso de la ecuación de velocidad de deflagración de la llama para obtener un valor teórico de la velocidad a la que se mueve la llama a través del combustible. Considerando una mezcla homogénea, la velocidad de propagación de la llama se define como **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$r_b = a * P^n \quad (2.12)$$

La velocidad de combustión r_b se mide en m/s, el coeficiente a de la mezcla vendrá dado en cm/s*barⁿ, la presión de la cámara P se mide en bares y, por último, tenemos n que es adimensional.

Mediante estas dos expresiones y sustituyendo la velocidad de combustión u_f por la velocidad de combustión r_b , podemos obtener un valor teórico de la velocidad de combustión y del consumo másico que luego compararemos con los valores obtenidos experimentalmente.

Tabla 2.6 Datos generales de ambos combustibles [10]

Combustible	1	2	
Densidad	1771,5	1738,9	kg/m ³
Conductividad térmica	0,42	5,04	W/m ² K
Capacidad calorífica	1269,1	1283,83	J/Kg ² K
Coefficiente a	10 ⁻² - 10 ⁻³		cm/s ² bar ⁿ
Exponente n	0,3 - 0,5		-

Para la obtención de los datos mostrados en la **Tabla 2.6** se ha realizado una media ponderada de los valores de densidad, conductividad y coeficiente térmico de los distintos compuestos que conforman ambas mezclas, mediante el uso de las proporciones volumétricas. El segundo combustible es algo más aproximado debido a la dificultad de encontrar un valor exacto para esta mezcla. En el caso de los valores del coeficiente a y del exponente n, no logré encontrar unos valores exactos, pero sí encontré que suelen oscilar entre esos valores.

Con estos datos obtenemos entonces los siguientes resultados:

Tabla 2.7 Velocidad de llama y consumo másico teóricos de ambos combustibles [10]

Combustible	1	2		
Velocidad combustión	5,00E-03	1,80E-02	m/s	Áreas (m ²)
Consumo másico	1,12E-04	4,02E-04	Kg/s	1,26E-05
	6,26E-05	2,25E-04	Kg/s	7,07E-06
	1,67E-04	5,99E-04	Kg/s	1,88E-05

En la **Tabla 2.7** se han expresados valores de velocidad típicos según cada composición y que se pueden encontrar en [10], para valores de presión en torno a 30 atm. Una vez ya tenemos los valores teóricos podemos compararlos con los valores hallados en los experimentos realizados en los laboratorios para comprobar la fiabilidad de los datos y de esta manera si en el futuro se desean conseguir valores distintos de velocidad o consumo másico poder modificar fácilmente las proporciones hasta conseguir obtener los valores sin tener que realizar prueba tras prueba para obtenerlos.

Tabla 2.8 Velocidad de llama y consumo másico empíricos de ambos combustibles

Combustible 1 / Pruebas	1	2*	3*	
Tiempo	1,85	11,77	7,6	s
Longitud	0,071	0,035	0,045	m
Area	1,26E-05	7,07E-06	1,88E-05	m ²
Volumen	8,95E-07	2,47E-07	8,46E-07	m ³
Velocidad combustión	0,03837838	0,00297366	0,00592105	m/s
Consumo másico	8,57E-04	3,72E-05	1,97E-04	Kg/s

Combustible 2/ Pruebas	1	2*	3*	
Tiempo	4,8	1,56	1,5	s
Longitud	0,071	0,035	0,045	m
Area	1,26E-05	7,07E-06	1,88E-05	m ²
Volumen	8,95E-07	2,47E-07	8,46E-07	m ³
Velocidad combustión	0,01479167	0,0224359	0,03	m/s
Consumo másico	3,24E-04	2,76E-04	9,81E-04	Kg/s

* En estos casos parte del combustible está contenido entre dos placas de metacrilato, mientras que en el primero está expuesto al aire todo el tiempo. También, tener en cuenta que las áreas son aproximadas pues las cavidades se serraron o tallaron a mano por lo que no son constantes todo el tiempo.

Lamentablemente, no hay suficientes pruebas para poder extraer una relación clara entre los resultados obtenidos en experimentación con los calculados teóricamente, y es que los resultados obtenidos son muy dispersos entre ellos, aunque se consiguen valores relativamente cercanos a los teóricos. Entiendo que esto podrá deberse tanto como a la forma inexacta de los moldes de prueba, que alterarán la presión interna, como a que las mezclas no fueran muy homogéneas, dado el método manual de elaboración. Otras causas que añadir serían tanto las alteraciones que sufran los combustibles por manipularlos o por absorción de humedades.

- **Rendimiento de la combustión**

Esta última prueba consiste en medir la masa del combustible antes y después de la combustión para comprobar que porcentaje de la masa total queda como residuo sólido y es lo suficientemente pesado como para que no sea expulsado por los propios gases producidos en el proceso. Para esta prueba utilizaremos la báscula de precisión y una pequeña placa de cobre donde se colocará el combustible.



Figura 2.14 Residuos en el depósito

El procedimiento es sencillo, se coloca la placa en la báscula y medimos su peso, posteriormente añadimos la mezcla de combustible sobre la placa y se apunta el valor dado. Después de esto solo queda quemar el combustible y medir de nuevo la masa restante. Se realiza una ecuación muy simple, que consiste en dividir la masa inicial menos la masa final entre la masa inicial y se multiplica finalmente por 100, de forma que obtengamos el porcentaje de combustible eliminado.

$$\eta = \frac{masa_{inicial} - masa_{final}}{masa_{inicial}} * 100 \quad (2.13)$$

Debido a múltiples pruebas fallidas de ignición con el combustible 1, para cuando se iba a realizar esta prueba se había dejado de producir este combustible (malos contactos con la resistencia y muchas humedades). Por ello, solo se realizó la prueba solo con el combustible 2 obteniéndose un rendimiento del 74 %. Esta prueba se llevó a cabo sobre una placa de cobre y con el combustible expuesto al aire.

2.2 Resistencia y diseño teórico

En este apartado se va a desarrollar el diseño físico y eléctrico de nuestro sistema de ignición, teniendo en cuenta que nos centraremos en un sistema de ignición para combustible sólido, y por tanto mediante el uso de un micro calentador integrado en el depósito, que una vez pase corriente a través de ella provocará el encendido del combustible.

En la actualidad se utilizan principalmente dos tipos de ignición por resistencia, el encendedor electrotérmico y el encendedor de electro-explosión [12]:

- Para el caso del encendedor electrotérmico, se produce calor debido al efecto Joule cuando la corriente pasa a través de este. En este caso el combustible comenzará a calentarse por transferencia de calor debido al efecto Joule hasta alcanzar la temperatura de ignición. Este tipo de encendedor se diseña normalmente con una estructura de zigzag, para aumentar tanto la resistencia como el área de transferencia de calor.
- El encendedor de electro-explosión usa, como su nombre indica, una explosión eléctrica para generar plasma a altas temperaturas, que al penetrar el combustible provoca su ignición. Este tipo de encendedor se diseña con una estructura en forma de una doble V, de tal forma que la corriente converja en la punta.

En el caso del encendedor electrotérmico nos encontramos con problemas como que tiene un ritmo de calentamiento lento, que provoca mayores tiempos de ignición y un mayor consumo energético. Estos problemas no se dan en el otro encendedor debido a que sufre un picotazo de corriente que provoca una rápida explosión que nos permite tener un bajo tiempo de ignición y consumo reducido. Aun así, el encendedor de electro-explosión presenta un mayor reto en su diseño y fabricación, puesto que requiere el uso de aleaciones (que aumentan la resistencia interna y la temperatura de fusión) o de diseños complejos de llevar a cabo en la superficie de un PCB (se requiere una alta precisión), que por tanto aumentan su coste de fabricación e implementación.

Para el diseño planteado de micro propulsores se ha preferido usar el encendedor electrotérmico, pese a sus desventajas, debido a la sencillez de elaboración, que nos permite fabricar gran cantidad de estos, manteniendo un precio razonablemente bajo. Un detalle a tener en cuenta es que aunque se haya decidido la vía del encendedor electrotérmico, se han dado situaciones durante las pruebas en el laboratorio en las que debido a las altas presiones que se producían en el interior de los depósitos sumado a que no siempre se tenía un correcto contacto entre resistencia y combustible, y que las pistas de la resistencia eran muy reducidas, se producían fenómenos de electro-explosión en los que la resistencia al haber alcanzado la temperatura de fusión y estar emitiendo gases, acababa desbloqueando la tobera produciendo una rápida salida de gases que provocaban el “salto” de partículas de plasma que entraban en contacto con el combustible e iniciaban la ignición. Este es un fenómeno que se prefiere evitar, pues no siempre produce un encendido, además de que esta expulsión de gases puede producir la apertura del propulsor y dañar los

adyacentes.

Una importante ecuación que utilizar en adelante y que nos permite averiguar la resistencia de una pista o cable en función del material que lo conforma es la de la resistividad eléctrica:

$$R = \frac{\rho_E * L}{A_p} \quad (2.14)$$

Esta expresión nos permite conocer el valor de una resistencia R, medida en ohmios (Ω), a partir del producto del coeficiente de resistividad eléctrica ρ_E (medido en $\Omega \cdot m$) por la longitud de la pista o cable L (medido en m) y dividido entre la sección de paso A_p (medido en m^2).

Otras dos importantes expresiones a tener en cuenta serían la de la potencia disipada en la resistencia (en W), que coincide con la resultante del efecto Joule, y también la de la energía consumida hasta lograr la ignición (medida en J).

Expresión del efecto de Joule:

$$P = I^2 * R \quad (2.15)$$

La potencia disipada P (en W) es igual al producto de la intensidad I que pasa a través de esta (en A) al cuadrado por el valor de la resistencia R (en Ω).

Expresión de la energía disipada en R:

$$E = P * t \quad (2.16)$$

La energía disipada E es igual producto de la potencia P (en W) por el tiempo que tarda en iniciarse la ignición t (en s).

2.2.1 Esquema de transferencia de calor

Para facilitar la comprensión del modo de funcionamiento del encendedor y de los efectos que se producen en el interior del depósito voy a plantear un pequeño esquema con las expresiones de transferencia de energía que tienen lugar una vez la resistencia comienza a emitir calor hacia la pastilla de combustible. Partiré de la estructura básica del propulsor:

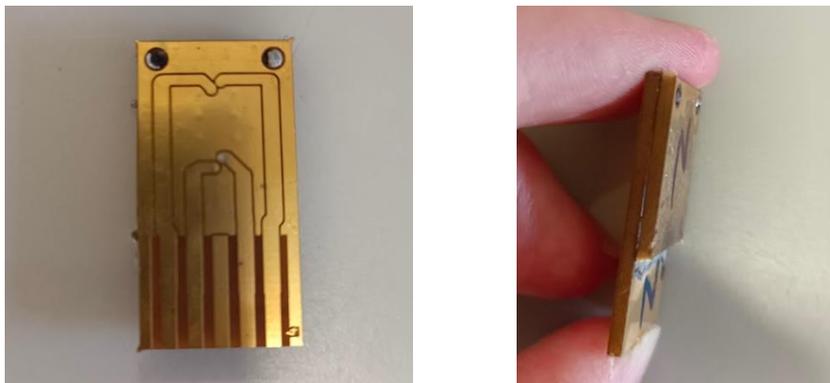


Figura 2.15 Estructura del micro propulsor

Como se comprueba en la imagen el micro propulsor se asemeja a un prisma rectangular que además tiene en su interior una cavidad en la que va colocado el combustible y que, idealmente, ocupa todo el espacio interior sin llegar a bloquear la tobera. De esta forma la resistencia está en contacto directo con la pastilla y con el sustrato, dándose un fenómeno de conducción térmica entre los tres componentes. En este caso se pueden despreciar la convección, pues en principio no habrá aire en el interior, y la radiación al ser áreas muy pequeñas que además deben de estar en contacto directo. En el exterior, también podemos despreciar la radiación dado el pequeño tamaño del dispositivo. Finalmente, solo se aplicarán las expresiones de conducción y convección (se debe tener en cuenta que una vez el dispositivo esté en el espacio, el único método de refrigeración exterior será la radiación pese a su tamaño, ya que no habrá nada de aire para transferir el calor. Aun así, este TFG se centra en el diseño y pruebas en condiciones de laboratorio, por lo que podemos ignorar esto). Las ecuaciones que expresan estos fenómenos son las siguientes respectivamente:

$$P_{CD} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = k * A_t * \frac{T_0 - T_f}{e} \quad (2.17)$$

$$P_{CV} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = h * A_t * (T_0 - T_f) \quad (2.18)$$

Para la expresión (2.17) tenemos que la potencia P (en W) es igual a la variación de energía en un tiempo dado $\Delta Q/\Delta t$ (en J/s), que a su vez es igual al producto del coeficiente de conducción k (en W/m*K) por el área de transferencia A_t (en m²) y por la variación de temperatura entre ambas superficies partido del espesor e (K/m). Para la expresión (2.18) tenemos que la potencia P (en W) es igual a la variación de energía en un tiempo dado $\Delta Q/\Delta t$ (en J/s), que a su vez es igual al producto del coeficiente de convección h (en W/m²*K) por el área de transferencia (en m²) y por la variación de temperatura entre la superficie y el aire.

Para simplificar los cálculos estas expresiones se pueden simplificar por el equivalente eléctrico que nos expresa ambas potencias como si fueran las corrientes eléctricas de un circuito:

$$P_{CD} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{(T_0 - T_f)}{R_{CD}} \quad (2.19)$$

$$P_{CV} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{(T_0 - T_f)}{R_{CV}} \quad (2.20)$$

Esto nos ayuda a simplificar considerablemente los cálculos a realizar para hallar la transferencia de calor. El último detalle restante sería el proceso generador de calor que en este caso será el mismo que el de las pérdidas por efecto Joule añadiéndose al equivalente eléctrico como una fuente de corriente.

Los datos a tener en cuenta es que la estructura del micro propulsor consiste en dos PCB en una de las cuales se ha realizado una cavidad donde se introducirá la pastilla de combustible y otra que funcionará a modo de tobera, mientras que en la otra PCB se encontrará la resistencia que dará inicio a la ignición. Los datos requerido vienen expresados en la **Tabla 2.9**.

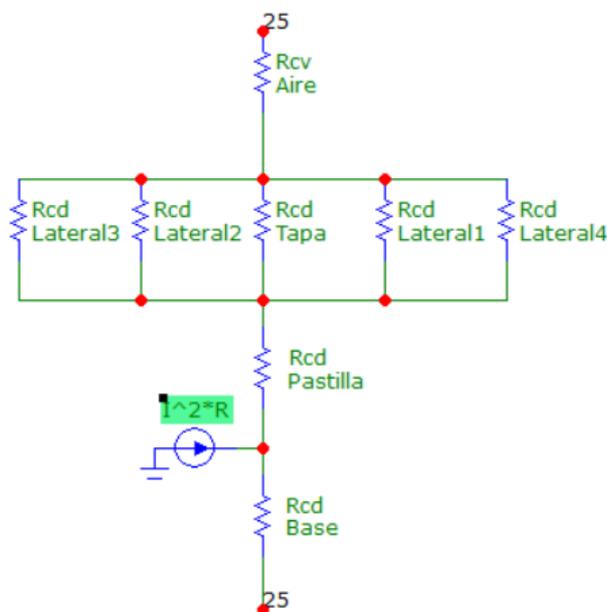
Tabla 2.9 Datos térmicos y geométricos del micro propulsor [13]

Datos térmicos y geométricos del micro propulsor					
Coefficiente conductivo PCB	0,25	W/m* K	Área base	1,60E-03	m ²
Coefficiente convectivo PCB	10	W/m ² * K	Espesor lat. 1	4,00E-03	m
Coefficiente conductivo AP	0,42/10,86*	W/m* K	Espesor lat. 2	6,00E-03	m
Área lateral 1	1,00E-03	m ²	Espesor base	2,00E-03	m
Área lateral 2	2,50E-03	m ²	Espesor comb	5,00E-04	m
Área resistencia	0,001058*	m ²			

*El coeficiente conductivo de la pastilla puede variar entre esos valores en función de cual de los dos combustibles estemos utilizando en ese momento, al igual que también se verá afectado por los cambios en las proporciones de la mezcla.

*Para el área de la resistencia se ha considerado directamente el rectángulo completo que ocupa la resistencia en el depósito. Esta puede verse algo modificada si se utiliza una resistencia distinta como se verá posteriormente

Con estos datos ya se puede realizar un esquema de lo que sería el circuito eléctrico equivalente de la transferencia de calor:

**Figura 2.16** Esquemático de transmisión de calor

Podemos observar en la imagen como la resistencia se transforma en una fuente de corriente que aportará calor a nuestro circuito y se transferirá en parte a la base del PCB y de ahí a una mesa en la que se encuentre apoyado y que consideramos se mantiene a una temperatura constante de 25°C, y en otra parte a la pastilla de combustible que a su vez lo transmitirá a las paredes del depósito y, por último, se transferirá este calor al exterior donde se producirá una refrigeración con el aire que rodea el dispositivo. Por tanto, el objetivo será conseguir una transferencia de calor suficiente para el cual, pese a la transferencia al exterior, se consiga la temperatura necesaria para se dé la ignición.

Un problema que se ve algo ignorado por esta reducción es la complejidad de usar como conductor térmico el propio combustible y es que dado su forma y dimensiones no habrá la misma resistencia conductiva en unas paredes u otras, además que cualquier no homogeneidad en la mezcla también alterará los valores del coeficiente conductivo.

Dado la complejidad de algunos de estos casos, y la necesidad de estudiar multitud de posibilidades distintas, posteriormente en otro capítulo del proyecto, se ha hecho uso de un simulador que nos permitirá estudiar parte de estas situaciones.

2.2.2 Resistencias prototipo

Para iniciar las pruebas el profesor José Manuel Quero aportó diversos prototipos de propulsores que había diseñado por su cuenta, para tener algo con lo que poder empezar a trabajar y realizar pruebas de disparo. Estos prototipos eran estructuralmente similares entre sí, pero variaban principalmente en el diseño de la resistencia utilizada, lo cual provocaba una variedad de intensidades y consumos distintos.

Como el objetivo de la resistencia es lograr la combustión de las pastillas de combustible, expresaré que la potencia mínima que se ha comprobado que debe disipar la resistencia para lograr el inicio de la ignición está en torno a los 784 mW (para el combustible 2) y a partir de este dato calcular la intensidad teórica necesaria para la ignición. Específicamente, nombraré y mostraré dos de los diseños debido a la mayor utilización de estos:

- Micro propulsores con resistencias integradas de cobre. En este caso se realizó un diseño de serpentín que viene ubicado en las cercanías de la tobera para que al producir la ignición el frente de llama avance de la zona más cercana a la tobera hasta la más alejada, produciendo así un empuje constante y se expulsen la mayoría de los residuos al exterior.

Tabla 2.10 Datos teóricos de la resistencia de cobre integrada

Resistencia integrada de cobre					
Ancho	1,00E-04	m	Nserpentin	7	
Altura	1,60E-05	m	Resistividad	1,68E-08	$\Omega \cdot m$
Area	1,60E-09	m ²	Resistencia	6,30E-02	Ω
Longitud total	6,00E-03	m			
Potencia	7,84E-01	W	Intensidad	3,52766841	A

Los valores de energía disipada no se muestran aquí pues no tenemos los datos de tiempo requerido para la combustión con antelación, por ello se expresarán sus valores en el apartado de pruebas, una vez se hayan obtenido.

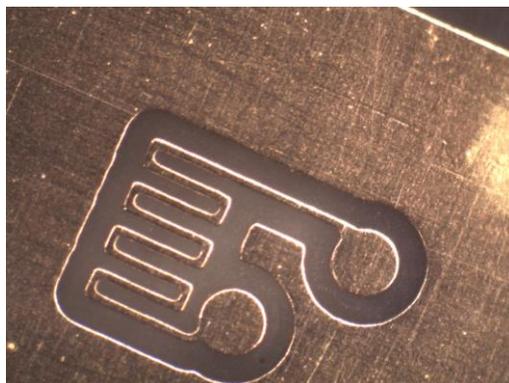


Figura 2.17 Resistencia original del micro propulsor

- El otro prototipo era un micro propulsor al que se le habían cortado las pistas y se habían unido ambos extremos mediante wire bonding, es decir se había depositado un hilo de oro entre las conexiones de alimentación y tierra para que actuara a modo de resistencia. De nuevo se colocaba en la zona cercana a la tobera y mantenía una estructura similar con los otros propulsores.

Tabla 2.11 Datos teóricos de la resistencia del Wire bonding

Resistencia de Wire bonding					
Diámetro	2,50E-05	m	Resistividad	2,35E-08	$\Omega^* m$
Area	4,91E-10	m ²	Resistencia	4,79E-02	Ω
Longitud total	1,00E-03	m			
Potencia	7,84E-01	W	Intensidad	4,04677492	A

De nuevo no se introducen los valores de energía disipada por la misma razón expresada anteriormente. De todas formas, se puede observar que en el caso del hilo de oro se reduce el valor final de la resistencia en un 76% lo cual provocará una disipación de potencia y energía menor para una misma intensidad de paso. Por tanto, si se requiere una potencia dada para iniciar la ignición, en el caso del Wire bonding requeriremos una corriente mayor que para la resistencia integrada.



Figura 2.18 Dos hilos de wire bonding en paralelo

2.2.3 Resistencias diseñadas

Se planteó el diseño de nuevas resistencias una vez todos los prototipos de micro propulsores ya habían sido usados. Esto se debe a que al tratarse de un combustible sólido el micro propulsor una vez utilizado queda inutilizado, tanto por los residuos que quedan en el interior de estos, como por la destrucción de las resistencias una vez se produce la combustión. Otra razón de peso para la elaboración de nuevas resistencias es el alto amperaje necesario para producir la ignición, y es que los microsátélites para los que están pensados estos micro propulsores no pueden permitirse consumos demasiado altos, dado sus baterías y métodos de generación. A esto último se le suma la intención de elaborar una electrónica lo menos voluminosa posible y es que para consumos de más de un amperio se suelen requerir transistores de potencia que doblan o triplican en tamaño a los de baja potencia, lo que provocaría un aumento de peso y de espacio a tener en cuenta. [17]

Los procesos de diseño y fabricación vendrán definidos en capítulos posteriores.

Se plantearon inicialmente muchos diseños distintos de resistencias, en los que se iban modificando esencialmente la geometría de las pistas de cobre, pero dado que se han ido escogiendo los diseños más favorables que son solo 4 de ellos:

- Las primeras dos resistencias se han elaborado en un PCB de 5 μm de espesor de cobre, manteniendo un grosor de pista de 75 μm y con espacios entre pistas de la misma dimensión. Al ocupar menos espacio que la resistencia original, se ha aumentado el número de serpentine de tal forma que ocupe la misma área, pero con mayor longitud. La principal diferencia entre ambas resistencias es que una dobla en longitud a la otra.

Tabla 2.12 Datos teóricos de las resistencias de 75 μm fabricadas en PCB

Resistencia de cobre de 75 μm en PCB					
Ancho	7,50E-05	m	Nserpentin	11	
Altura	5,00E-06	m	Resistividad	1,68E-08	$\Omega^* \text{m}$
Area	3,75E-10	m ²	Resistencia	4,83E-01	Ω
Longitud total	1,08E-02	m			
Potencia	7,84E-01	W	Intensidad	1,27411798	A

Tabla 2.13 Datos teóricos de las resistencias de 75 μm y doble longitud fabricadas en PCB

Resistencia de cobre de 75 μm en PCB con pistas del doble de longitud					
Ancho	7,50E-05	m	Nserpentin	11	
Altura	5,00E-06	m	Resistividad	1,68E-08	$\Omega^* \text{m}$
Area	3,75E-10	m ²	Resistencia	8,88E-01	Ω
Longitud total	1,98E-02	m			
Potencia	7,84E-01	W	Intensidad	0,93965234	A

Se observa un aumento significativo de los valores de resistencia y por tanto una reducción considerable en los valores de corriente necesaria para la ignición.

- Las últimas dos resistencias se han fabricado también sobre un PCB de 5 μm de cobre, pero en este caso se han diseñado las pistas de 50 μm y con espacios entre ellas de 50 μm . Este está muy cerca del límite al que se puede llegar con el procedimiento aplicado de fabricación en PCB. En el resto de los detalles se repite la metodología anterior para el caso de área ocupada y diferencias entre ambas.

Tabla 2.14 Datos teóricos de las resistencias de 50 μm fabricadas en PCB

Resistencia de cobre de 50 μm en PCB					
Ancho	5,00E-05	m	Nserpentin	17	
Altura	5,00E-06	m	Resistividad	1,68E-08	$\Omega^* \text{m}$
Area	2,50E-10	m ²	Resistencia	1,03E+00	Ω
Longitud total	1,53E-02	m			
Potencia	7,84E-01	W	Intensidad	0,87248704	A

Tabla 2.15 Datos teóricos de las resistencias de 50 μm y doble longitud fabricadas en PCB

Resistencia de cobre de 50 μm en PCB con pistas de doble longitud					
Ancho	5,00E-05	m	N serpetin	17	
Altura	5,00E-06	m	Resistividad	1,68E-08	$\Omega^* \text{m}$
Area	2,50E-10	m ²	Resistencia	1,95E+00	Ω
Longitud total	2,90E-02	m			
Potencia	7,84E-01	W	Intensidad	0,6347959	A

Detalle para tener en cuenta con este último diseño es que debido al pequeño espesor de pista y de los espacios entre estas, no son poco comunes algunos fallos de fabricación como son el cortocircuito entre pistas, que alteran el valor de R real, o la rotura de estas dejándolas completamente inútiles. Se ampliará más en estos detalles en el capítulo de fabricación de las resistencias.

Dados los resultados teóricos se consiguen resistencias con una intensidad de corriente necesaria para el encendido menor a 1 amperio, lo cual permitirá en el futuro el diseño de un sistema electrónico de volumen reducido, siempre y cuando sea posible la fabricación a gran escala de estas resistencias, que se encuentran en el límite del tamaño al se puede fabricar en un PCB.

2.3 Diseño eléctrico

Este último apartado estará centrado especialmente en el diseño de la circuitería y componentes para poder mantener conectado una matriz completa de micro propulsores, así como el método de generar la corriente necesaria para la combustión. [14]

2.3.1 Conexionado

El planteamiento inicial para el conexionado era el visto en el inicio del capítulo en el cual teníamos la resistencia conectada por un lado a tierra y por otro a un transistor, que funcionaría a modo de interruptor, que estaría a su vez conectado a la alimentación positiva de la fuente de tensión para completar de esta manera el circuito. Si se requería conectar varios micro propulsores, simplemente se realizaría el mismo diseño en paralelo las veces necesarias.

El problema es que el objetivo final requerirá placas que podrían estar conformados por más de 50 micro propulsores, por lo cual el procedimiento anterior no sería funcional a no ser que contemos con microcontroladores de más de 50 pads, o usemos múltiples de estos. Pero de todas formas esto sería simplemente muy ineficiente tanto en la cantidad de componentes necesarios, y por tanto costes económicos, como en el volumen final del dispositivo completo.

Por ello se ha planteado una manera más eficiente de conexionado que nos permitirá conectar mayor número de resistencias con un menor uso de transistores y por tanto menor uso de cables de conexión. Este consiste básicamente en una red de conexiones controlados por transistores tipo p y n que permiten o no el paso de la corriente (en principio en falta de un transistor tipo p se podrá usar uno tipo n teniendo en cuenta que la tensión final será $V_{dd} - V_t$ siendo V_t la mínima requerida para que conduzca el transistor). [12]

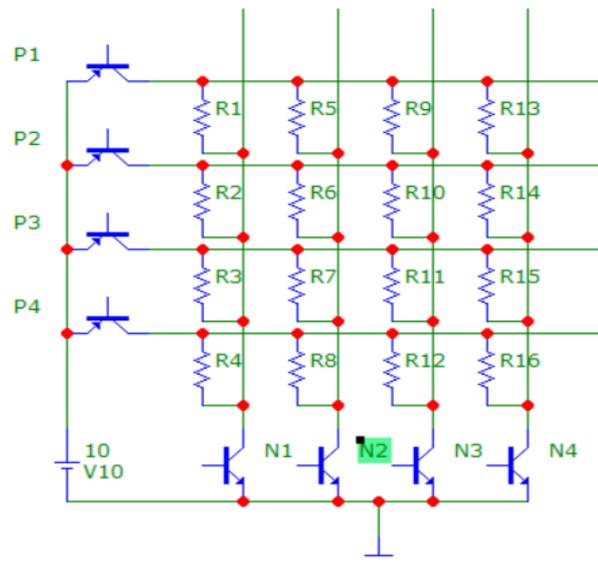


Figura 2.19 Esquemático de conexionado

Se comprueba en la **Figura 2.19** que ahora se utilizan dos transistores por cada resistencia, lo cual podría parecer que debería aumentar el número total de componentes, sin embargo, hay múltiples resistencias alojadas en paralelo entre distintos hilos de conexión y por tanto cada transistor puede estar conectado a más de una resistencia. En este caso como tenemos 4 transistores tipo p y otros 4 tipo npn podemos alojar hasta 16 resistencias. Lo mismo ocurre con los pads de conexión del microcontrolador, ya que utilizamos uno para cada transistor.

Se debe tener en cuenta que esto es simplemente es un esquema de ejemplo de un posible sistema de conexión y que no representa la realidad del proyecto, dado que la complejidad real es mucho mayor, pues conectar adecuadamente todas las resistencias sin tener que cruzar entre pistas es complejo. También se podría, por ejemplo, aumentar el número de filas o columnas añadiendo varios transistores para multiplicar así el número de resistencias. De todas formas, este TFG no se va a centrar en una implementación real de este tipo de conexionado debido a la falta de desarrollo de los micro propulsores y de los componentes requeridos.

Para las pruebas en laboratorio se ha utilizado el encapsulado tipo npn ULN2003, que debido a su diseño permite compactar en un solo encapsulado hasta 7 transistores, además, permite el paso de tensiones hasta los 50 V e intensidades de 500 mA en funcionamiento continuo y 600 mA de intensidad de pico, lo cual puede ser algo justo para algunas de las resistencias (la mayoría requiere más de 700 mA), pero las simulaciones realizadas indican la capacidad de superar levemente este umbral si se añade un condensador de descarga aunque se corre el peligro de poder destruir el transistor y por tanto inutilizarlo para otros disparos. Una solución esto siempre podría ser conectar dos de los transistores integrados en paralelo para conseguir que la corriente se divida entre ambos. [15]

En el caso del transistor tipo p no teníamos ninguno para realizar las pruebas por tanto siempre se han realizado siguiendo el esquema inicial. Lamentablemente no he sido capaz de encontrar actualmente un diseño de transistor tipo pnp que cumpla los requisitos de intensidad de corriente y bajo volumen (la gran mayoría son transistores bipolares simples).



Figura 2.20 Encapsulado ULN2003

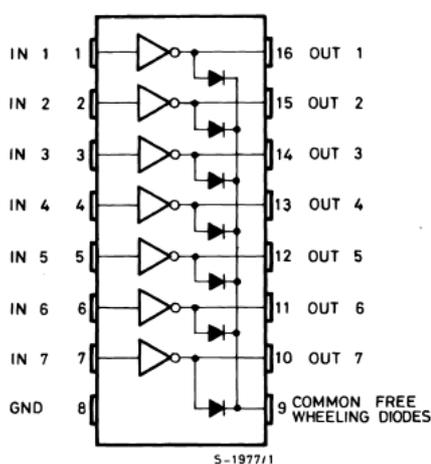


Figura 2.21 Conexión de pines [15]

2.3.1.1 Simulación

Para simular el funcionamiento electrónico del sistema conformado por el transistor ULN2003 y la resistencia se ha hecho uso del programa LTspice, el cual es un simulador gratuito desarrollado por Analog Devices, con la capacidad de diseño de esquemas y visor de formas de onda con mejoras y modelos para mejorar la simulación de circuitos analógicos. Su interfaz gráfica de captura de esquemas le permite sondear esquemas y producir resultados de simulación, que se pueden explorar más a fondo a través del visor de formas de onda incorporado. [16]

En la **Figura 2.22** debido a la falta de un transistor tipo pnp que cumpla las condiciones especificadas se ha realizado el diseño originalmente planteado en un principio:

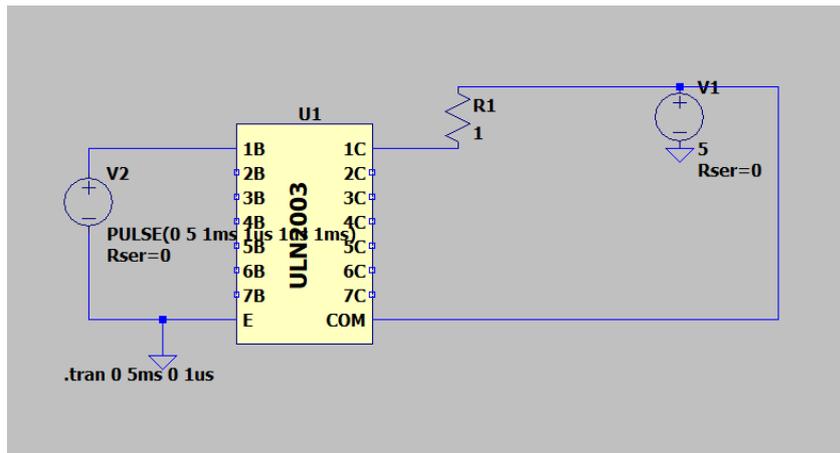


Figura 2.22 Esquema del sistema de disparo para un solo micro propulsor [18]

El componente ULN2003 actúa como múltiples transistores siendo los valores que terminan por una B las puertas y los que terminan en C los colectores, por último, queda la conexión E que sería el emisor común de los transistores. También se observa una conexión COM que sirve de protección frente a sobretensiones en el colector de los transistores. En la simulación se ha controlado la puerta mediante un pulso de 5V y duración de 1ms. Nos centramos en el funcionamiento del componente y no se tienen en cuenta los posibles valores resistivos que pudiese haber entre las conexiones de las fuentes (resistencias de los propios cables o pistas).

El resultado de la simulación nos da la siguiente corriente en la resistencia:

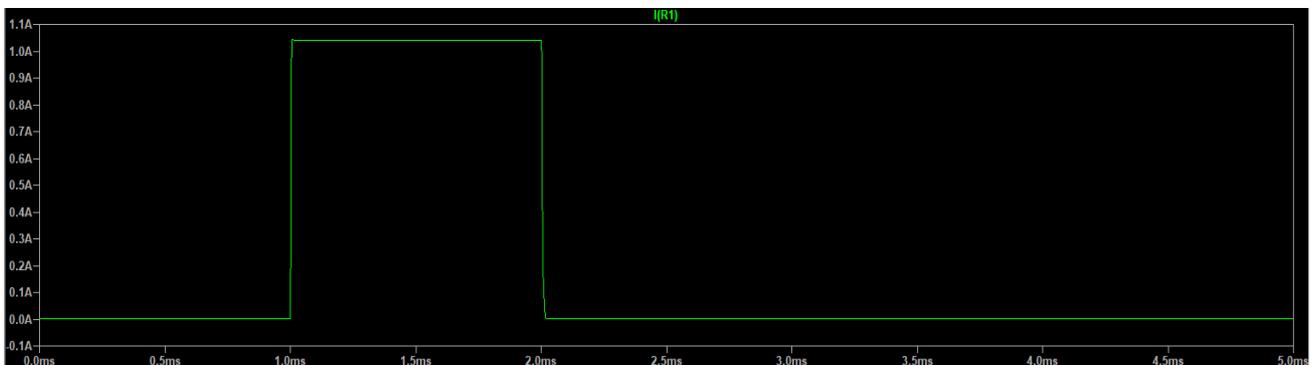


Figura 2.23 Forma de onda resultante

Según la simulación realizada en la **Figura 2.23** el sistema es capaz de mantener un amperio, pero de todas maneras aconsejo tener cuidado con este resultado debido a que LTspice no es capaz de simular la destrucción de un componente y además no contiene el componente ULN2003, por lo que tuve que descargarlo de una librería personalizada que había realizado una persona ajena a la empresa fabricante. **No sería de extrañar que hubiera errores en el componente descargado**, pero es lo mejor que logré encontrar de manera gratuita. [18]

2.3.2 Alimentación de la resistencia

Para las pruebas de disparo en el laboratorio se han probado principalmente dos formas de otorgar la corriente a la resistencia, una consiste en conectar directamente la resistencia a la fuente de tensión y aportar

en continua la corriente requerida, el otro método es utilizar un condensador de gran capacidad y alimentarlo con la fuente de tensión, posteriormente desconectamos la fuente y mediante un interruptor manual producimos una gran descarga de corriente en la resistencia. Este último método no es compatible con la red de conexiones debido a que la descarga del condensador producirá con seguridad la destrucción del transistor, pero dado que todavía estamos en desarrollo y no hay nada planteado, es un procedimiento válido para hacer las pruebas. Si se requiere siempre se puede volver al diseño original de conexión de un transistor por resistencia.



Figura 2.24 Fuente de tensión



Figura 2.25 Condensador de 26000 uF

En la **Figura 2.24** tenemos una fuente de tensión DC POWER SUPPLY IMHY3003D-3 que consiste en tres salidas de tensión, dos de ellas regulables entre 0 y 30 voltios y entre 0 y 3 amperios, con tres conexiones cada una (+, -, GND). La última solo tiene dos conexiones (+, -) y es fija a una tensión de 5 voltios, con un máximo de 3 amperios.

En el caso de la **Figura 2.25**, se trata de un condensador que se ha utilizado durante las pruebas, con una capacidad de 26000 uF y una tensión máxima de 35 V.

Las ecuaciones eléctricas que se explican el funcionamiento del circuito son:

$$V = I * R \quad (2.21)$$

Esta primera expresión es la ley de ohm que se define como la tensión (en V) como el producto de la corriente (en A) por la resistencia de paso (en Ω).

$$C_d = \frac{Q}{V} \quad (2.22)$$

$$I = -C_d * \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.23)$$

Estas dos expresiones son las que definen el funcionamiento de un condensador. La ecuación (2.22) iguala la capacidad C_d del condensador (en F) al cociente de la carga Q del condensador (en C) entre el voltaje V entre las placas de este (en V). La ecuación (2.23) iguala la corriente I (en A) al negativo de la capacidad del condensador (en F) por la derivada temporal de la tensión. Si se integra la ecuación (2.23) en función del tiempo podremos obtener los valores de tensión, intensidad y carga a lo largo del tiempo. En este caso, al requerirla después, solo mostraré la expresión de la carga en función del tiempo (para obtener el resto solo hay que aplicar las expresiones anteriores).

$$Q = C_d * V_0 * e^{\frac{-t}{R * C_d}} \quad (2.24)$$

Esto nos permite conocer el valor de la carga Q (en C) en cualquier instante de tiempo t (en s), a partir de los valores de la capacidad C_d del condensador (en F), la tensión inicial V_0 (en V) y la resistencia de paso (en Ω).

Dado que no se realiza un estudio en profundidad de lo que ocurre con los transistores al pasar la corriente, ni se llegan a realizar demasiadas pruebas con ellos más allá de algunas pruebas de disparo, para comprobar su validez, no veo necesidad de expresar sus ecuaciones de funcionamiento.

3 SIMULACIÓN Y DISEÑO DE LAS RESISTENCIAS

Una parte vital de este proyecto es comprender los procesos eléctricos y térmicos que tienen lugar en la resistencia, así como los efectos de estos en el combustible en contacto con esta. El problema es que intentar comprender la realidad aplicando a mano las ecuaciones teóricas se vuelve complejo, sumado a que se tienen que realizar multitud de pruebas diferentes y para casos de diseño distinto, y como se comprenderá, tampoco contamos ni con el dinero ni con el tiempo necesario para esperar a que lleguen todos los modelos diseñados, sobre todo si se tiene en cuenta que podrían ni siquiera ser útiles en la realidad. Es por esto por lo que se ha hecho uso de un simulador que permitirá comprobar todas estas posibilidades en poco tiempo y solamente modificando algunas propiedades de la simulación.

Otra parte importante es que una vez se tengan decididos cuáles serán las propiedades deseadas de nuestras resistencias será necesario preparar un diseño para elaborar en una placa de PCB para poder enviar a un fabricante y pedir su fabricación, o para poder elaborarla aquí mismo en los laboratorios de la escuela y de esta manera tener siempre equipo con el que realizar pruebas.

3.1 Simulación en COMSOL

Para todas las simulaciones se ha hecho uso de la licencia de estudiante del programa *COMSOL multiphysics 6.1*. Este programa desarrollado por *COMSOL*, es un ambiente de simulación interactivo utilizado para modelar y resolver todo tipo de problemas físicos o de ingeniería. El programa cuenta con un menú integrado con un *constructor de modelos* que permite diseñar en detalle la geometría, materiales y propiedades que sean necesarias para resolver problemas físicos. [19]

En este caso se han recreado y simulado todas las resistencias mencionadas en el capítulo anterior, y como responden tanto con una alimentación en continua como con la descarga de un condensador. En este apartado voy a centrarme sobre todo en la simulación de la resistencia del primer prototipo (100 μm de ancho y 16 μm de espesor), debido a que es la que más se ha usado en las pruebas, y en las resistencias de 75 μm y 50 μm de ancho y de 5 μm de espesor (tanto las del doble de longitud como las normales), dado a que son las que mejores expectativas de funcionamiento tienen (menor consumo de corriente).

Para comenzar desarrollaré todos los pasos previos necesarios para la elaboración y preparación del modelado para poder posteriormente realizar las simulaciones sin problemas.

3.1.1 Modelado del componente

Para comenzar se debe definir todas las dimensiones y variables de importancia, luego se realiza un diseño geométrico de lo que será el modelado a simular y finalmente se seleccionan los materiales a utilizar y las propiedades físicas respectivas.

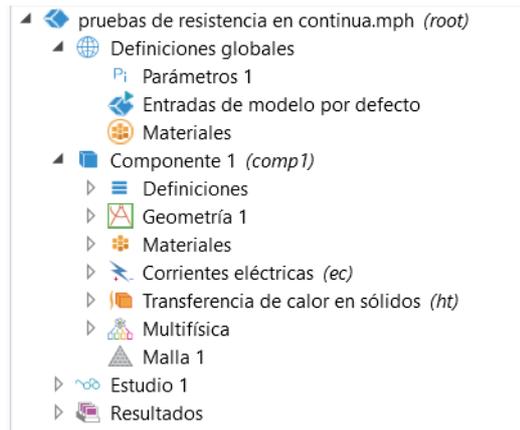


Figura 3.1 Menú integrado de COMSOL

1. Para comenzar debemos definir las variables que se van a utilizar en el apartado parámetros. La **Figura 3.2** muestra que la mayoría de ellas consiste en dimensiones geométricas o variables eléctricas (valores de resistencia, tensión o condensador) que ya han sido definidas en el capítulo anterior. Importante expresar entre corchetes las unidades de medida.

▼ Parámetros			
» Nombre	Expresión	Valor	Descripción
W1	100[um]	1E-4 m	
W2	100[um]	1E-4 m	
L	768 [um]	7.68E-4 m	
Hcu	16 [um]	1.6E-5 m	
Lpcb	5*L	0.00384 m	
Wpcb	5*L	0.00384 m	
Hpcb	1.6 [mm]	0.0016 m	
tfin	15 [s]	15 s	
TfusionCU	1086 [degC]	1359.2 K	para verificar que funde..
Tamb	25 [degC]	298.15 K	
Rpista	0.065226 [ohm]	0.065226 Ω	obtenida de simulación
tdesc	0.5e-3 [s]	5E-4 s	
Ipista	3.5 [A]	3.5 A	
Vpista	Ipista*Rpista	0.22829 V	

Figura 3.2 Tabla de parámetros

2. A continuación, se define el componente 1 y se construye el modelo que se va a implementar en la simulación, para ello se van añadiendo bloques y se hace uso de las posibilidades que nos aporta el programa para conseguir un diseño acorde. Por ejemplo, para facilitar el diseño de la resistencia se escoge la opción de matriz que permite repetir las veces que se requiera uno o varios componentes seleccionados en una dirección geométrica, pudiendo modificar la distancia entre cada repetición. Para el diseño del micro propulsor se ha decidido estudiar la interacción directa entre la pastilla de combustible, una vez esta se encuentra en el interior de las dos placas de PCB y hay conducción entre estas, por tanto, se han generado tres bloques: base, pastilla y tapa, en la que se ha dejado un hueco en el interior de la tapa para la pastilla y se ha colocado un serpentín que funcionará a modo de resistencia en la base, justo debajo de la pastilla. La base medirá 16x12x1.6 mm, la pastilla 2.5x5x0.5 mm y, por último, la tapa superior 16x12x1.6 mm con un hueco en el interior para la pastilla (Ancho x Profundidad x Altura).

- Una vez tenemos el componente formado, podemos seleccionar diferentes materiales integrados en el programa, y que vienen con sus propiedades físicas definidas (coeficientes térmicos, resistivos, de expansión...). Con los materiales seleccionados, podemos definir que bloques del componente son de un material u otro, lo que provoca que estos adquieran las propiedades de los materiales seleccionados. En este caso se han seleccionado como materiales el FR4 para la base y para la tapa, cobre para la resistencia y, debido a la falta de perclorato entre los materiales seleccionables, PDMS para la pastilla, aunque las propiedades importantes en el estudio se modificarán por unas más acordes.

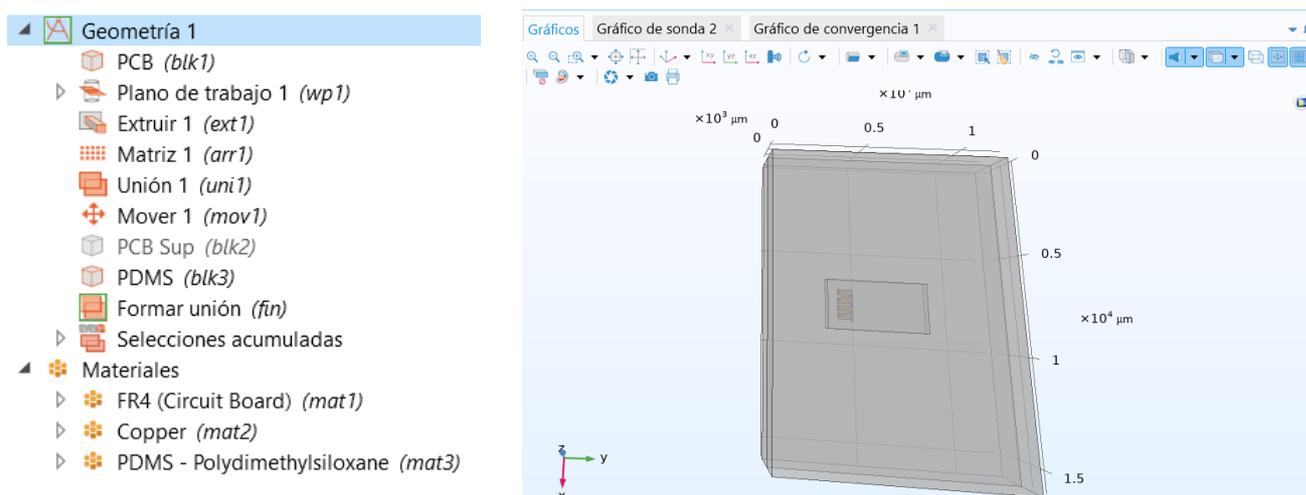


Figura 3.3 Modelo de la resistencia de 100 μm con materiales definidos

- El siguiente paso es seleccionar las físicas que tendrán lugar en la simulación y seleccionar que bloque queremos que interaccionen con esas físicas. Se utilizará la física de corrientes eléctricas seleccionando las pistas de la resistencia, colocando una entrada de alimentación en el inicio y una salida a tierra al fina, también se hará uso de la física de transferencia de calor en sólidos seleccionando todos los bloques del componente de tal forma que todos interactúen entre sí transmitiéndose calor unos a los otros, en este último también se añadirá un flujo de calor hacia el exterior por convección ($h_{cv}=10$).
- También, se debe añadir lo que el programa llama como una *multifísica* que es básicamente la interacción entre dos tipos de físicas distintas. En este caso es el calentamiento electromagnético, que consiste en el calentamiento de un material debido al paso de corriente a través de este.

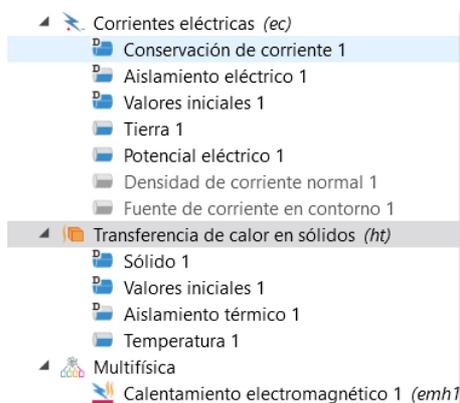


Figura 3.4 Físicas aplicadas

6. Si se requiere, se pueden añadir ecuaciones en el apartado de definiciones de las que dependa el funcionamiento de la simulación. En mi caso, por ejemplo, para el uso de un condensador para alimentar la resistencia, se añaden las ecuaciones de funcionamiento de este que fueron planteadas en el apartado *Alimentación de la resistencia*.

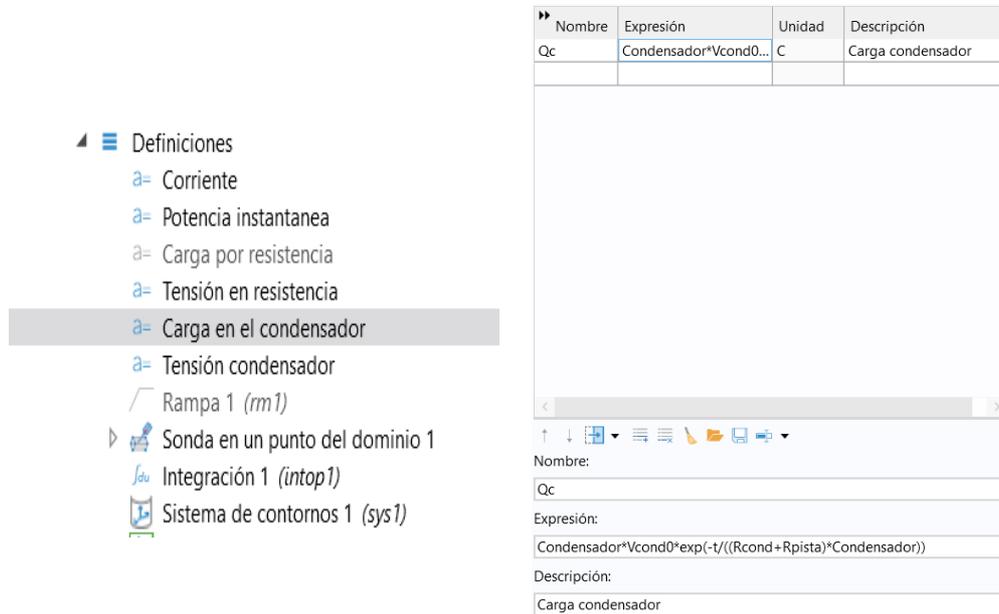


Figura 3.5 Ecuaciones de funcionamiento de un condensador

7. Para el estudio adecuado de las interacciones físicas que tienen lugar en el componente se puede hacer uso de las sondas, que básicamente obtienen información de lo que ocurre en un punto, superficie o volumen. En mi caso he añadido una en el punto medio de la resistencia y 70 μm en el interior de la pastilla para estudiar la evolución térmica en las cercanías de la superficie.

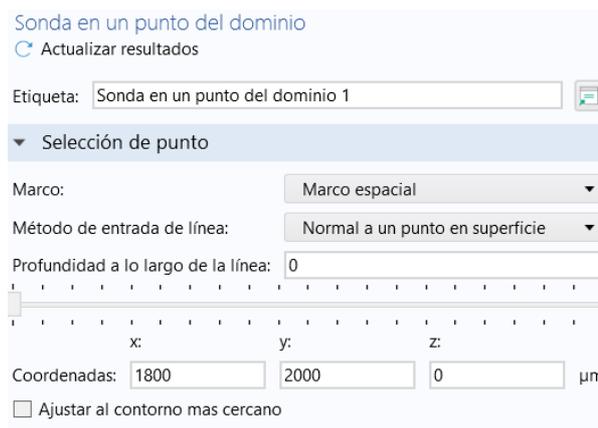


Figura 3.6 Sonda en un punto del dominio

8. Finalmente, solo queda seleccionar la opción de *Malla* en el menú para dividir el componente en pequeños fragmentos en los que se aplicarán los diversos cálculos en el volumen de estos. Tener en cuenta que tipo de mallado más fino produce resultados más exactos que el mallado grueso, pero requiere de un mayor consumo de memoria y tiempo de cálculo al tener que realizar mayor número de cálculos. En mi caso utilizaré la opción de tamaño de malla gruesa, pues se obtienen buenos resultados y no me consume toda la RAM del ordenador.

3.1.2 Simulación y resultados

Para las simulaciones tenemos dos apartados más en el menú, uno que se llama *Estudio* y que nos permite seleccionar las condiciones de la simulación, en mi caso haré uso del estudio temporal, que calcula los resultados obtenidos a lo largo del tiempo para los parámetros de funcionamiento dados en el modelado del componente, y del barrido paramétrico que realiza múltiples simulaciones modificando entre ellos uno o varios parámetros la cantidad de veces que se le pida. El otro apartado es *Resultados*, en el cual podemos generar tablas y gráficas de datos de los parámetros que le pidamos a lo largo del tiempo, de forma que podemos comprobar como un parámetro evoluciona a lo largo del tiempo.

En particular los parámetros que más interés tienen son la corriente de paso y la temperatura que alcanza la superficie de contacto de la pastilla con la resistencia. La ignición debería ser casi inmediata una vez se haya alcanzado la temperatura objetivo en la superficie, la cual viene descrita en la **Tabla 2.5**.

A continuación, se llevará a cabo el estudio de las múltiples resistencias planteadas en el apartado *Resistencia y diseño teórico*, del capítulo anterior. En concreto me centraré en el estudio del combustible 1 ya que considero que es el del cual se conocen mejor las propiedades físicas.

Un detalle para tener en cuenta es que estas simulaciones no demuestran la realidad con total precisión, y es que hay muchas variables que desconocemos de la composición de los combustibles y se han tenido que decidir “a ojo”.

3.1.2.1 Resistencia original de 100 μm de ancho y 16 μm de espesor

Comenzaremos con la resistencia inicial, es decir el prototipo aportado por el profesor José Manuel Quero, y con la cual hemos realizado el mayor número de pruebas en el laboratorio. La información geométrica se puede encontrar en la **Tabla 2.10** y en el simulador queda como se ve en la **Figura 3.7**:

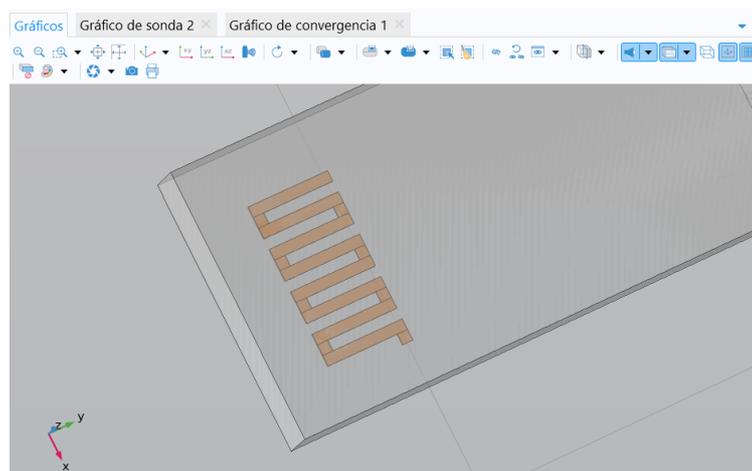


Figura 3.7 Resistencia original

Una vez se ha completado el diseño el programa al hacer una primera simulación nos aporta el valor que ha medido de la resistencia el cual es: 0.065226Ω , lo cual es muy cercano al valor calculado de forma teórica. A continuación, se va a realizar un estudio paramétrico con alimentación en continua, modificando la intensidad de paso comenzando en 0.5 A y terminando en 3.5 A, con saltos de 0.75 A.

De esta simulación se obtienen las gráficas de la **Figura 3.8** y la **Figura 3.9** que indican la temperatura alcanzada en la superficie de contacto de la resistencia con la pastilla de combustible y en cercanías.

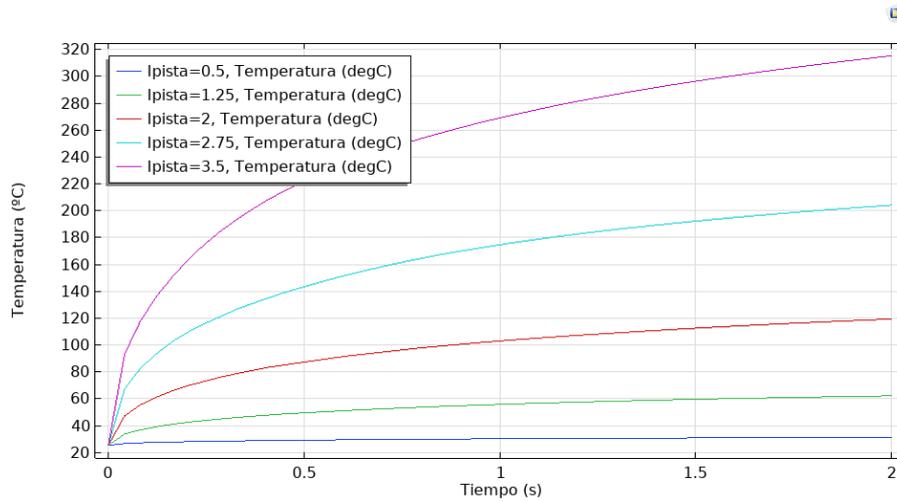


Figura 3.8 R100: Evolución de la temperatura superficial

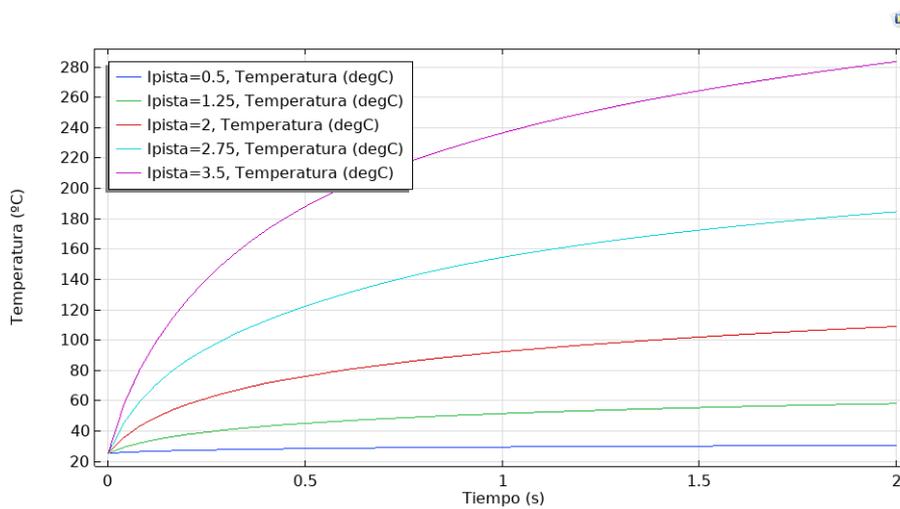


Figura 3.9 R100: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 um)

Algo a destacar de los resultados de la resistencia con ambos combustibles es que en el tiempo de simulación ninguno llega a alcanzar la temperatura de ignición y solo comienza a acercarse con un amperaje de 3.5 A. Esto nos indica que con estas resistencias el sistema tardará mucho tiempo en lograr el disparo de los micro propulsores, y por tanto tendría un retraso considerable de funcionamiento, y, además, requiere de un alto amperaje que daría problemas a los transistores de conexión y a la batería del satélite.

Para intentar paliar los problemas de alto consumo y tiempo de disparo se intentó implementar como sistema de disparo la descarga de un condensador. El condensador al empezar a descargarse produce un pico de corriente que al pasar a través de la resistencia provoca un calentamiento muy rápido del cobre, aunque de la misma manera se produce un rápido enfriamiento al dejar de pasar corriente. Para esta prueba se ha planteado la descarga de un condensador de 26000 uF, realizando un barrido paramétrico en el que se irá modificando la tensión inicial del condensador desde 3 V hasta 12 V, en saltos de 3 V.

Antes de comenzar, para la simulación con el condensador se han tenido que añadir las siguientes

expresiones en las definiciones del componente:

- Integral de contorno: Es una expresión utilizada para poder obtener los valores de corriente que pasan por la sección de la resistencia.
- Corriente: Simplemente añadimos el valor obtenido de la integral anterior con el signo acorde, en función del sentido de paso de la corriente.
- Tensión de la resistencia: Es el valor de tensión que cae en la resistencia a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta los valores de resistencia interna del condensador. Se mide en voltios.

$$V_{pista} = \frac{V_{cond} * R_{pista}}{R_{pista} + R_{cond}} \quad (3.1)$$

- Carga en el condensador: Es el valor de la carga que queda en el condensador a lo largo del tiempo. Es la misma expresión que (2.24) y se mide en culombios.

$$Q_c = C_{condensador} * V_{cond0} * e^{\frac{-t}{(R_{cond} + R_{pista}) * C_{condensador}}} \quad (3.2)$$

- Tensión en el condensador: Sirve para obtener el valor de tensión en el condensador a lo largo del tiempo y se mide en voltios.

$$V_{cond} = \frac{Q_c}{C_{condensador}} \quad (3.3)$$

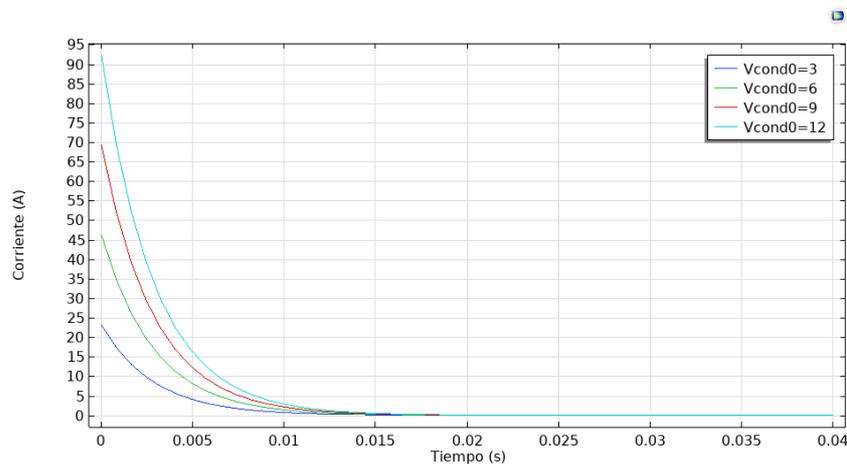


Figura 3.10 Condensador: Corriente a través de la resistencia

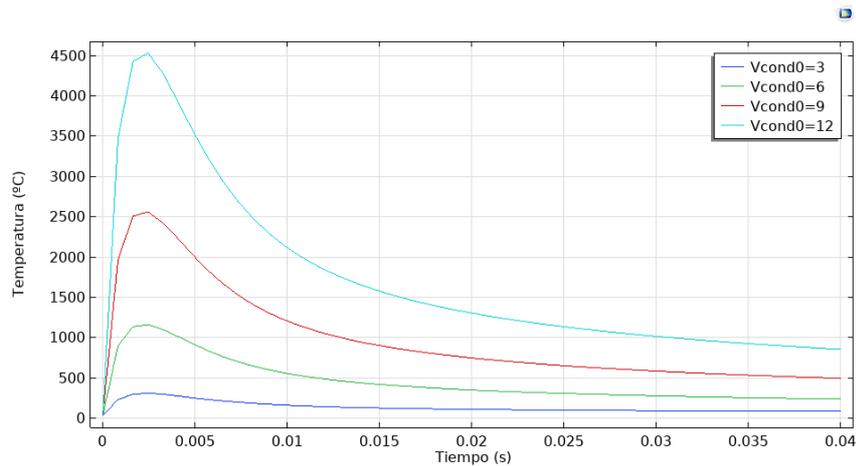


Figura 3.11 Condensador: Temperaturas alcanzadas

Se comprueban grandes picos de corriente en la **Figura 3.10** y, en la **Figura 3.11**, unas temperaturas máximas en la resistencia muy altas, pero que tienen una duración de unos pocos instantes y de nuevo rápidamente bajan de temperatura hasta estabilizarse. Estas altas corrientes pueden ser capaces de producir temperaturas tales que fundan el cobre de las pistas que conforman las resistencias, ya para voltajes mayores a los 6 V podríamos fundir el cobre que conforma la resistencia. Sin embargo, se observa un problema en la temperatura superficial de la pastilla (unas micras en el interior del combustible).

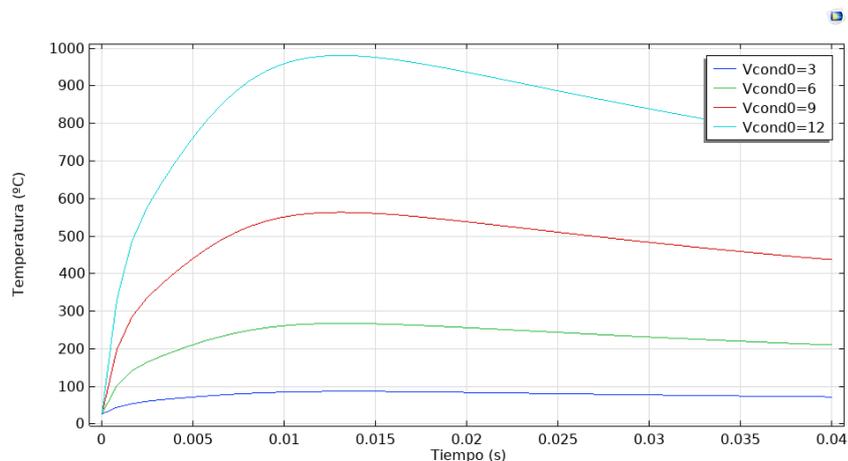


Figura 3.12 Condensador: Temperaturas en la superficie de la pastilla (70 μm)

En la **Figura 3.12** se puede comprobar que la transmisión al combustible no es tan rápida y es que parece que la mayor parte del calor se pierde en el volumen del combustible o hacia el PCB. Solo se logran alcanzar temperaturas de combustión para tensiones cercanas a los 12 V, pero como se puede observar en la **Figura 3.11** la resistencia se fundiría mucho antes de que la pastilla logre alcanzar la temperatura necesaria para la combustión. Un fenómeno que si puede llegar a producirse si se alcanzan temperaturas tales es el de una electro-explosión, pero la forma de la resistencia no beneficia esto, y por tanto podría no tener efecto en el inicio de la ignición.

Se intentó también realizar un ajuste más fino modificando los valores de tensión y de la capacidad del condensador para comprobar si era posible ajustar los valores de forma que se redujera la temperatura máxima y aumentara el tiempo de descarga, aplicando las expresiones del apartado 2.3.2., y así conseguir que le diera tiempo a la pastilla a alcanzar la temperatura requerida. Pero, debido a que el valor de la corriente final depende tanto de la tensión como de la capacidad, es un proceso complejo. El mejor resultado

obtenido se comprueba en la **Figura 3.13** y **Figura 3.14** con una tensión de 3.7 V y una capacidad total de 90 mF.

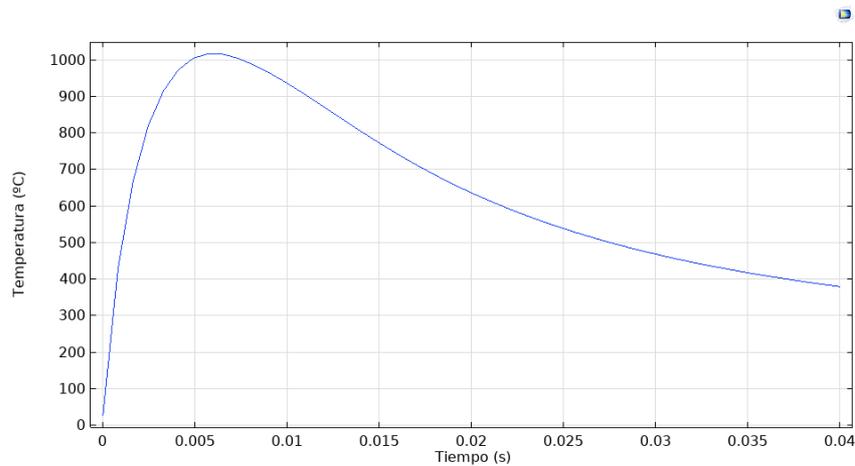


Figura 3.13 Condensador: Temperatura en superficie de resistencia obtenida en caso óptimo

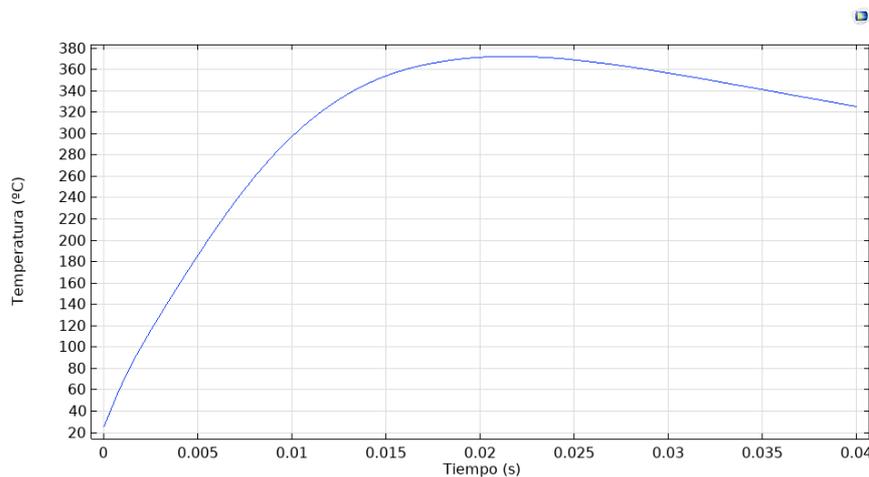


Figura 3.14 Condensador: Temperatura en superficie (70 um) de pastilla en caso óptimo

De todas maneras, el método de activación usando el condensador solo es utilizado para algunas pruebas en laboratorio y no estoy muy confiado en su uso real en el dispositivo final pues, si tiene una carga muy alta, destruirá cualquier tipo de transistor que utilizemos para controlar el paso de corriente, además de que tiene un volumen considerable. En los siguientes no se han realizado simulaciones con el condensador, pues no se ha llegado a realizado este tipo de pruebas con ellos y a que están más dirigidos a una activación en continua.

3.1.2.2 Resistencia nueva de 75 um de ancho

La siguiente resistencia es uno de los nuevos diseños planteados para corregir los problemas de alto consumo y tiempos largos de ignición que ocurrían con el diseño previo en las pruebas realizadas. Los datos de diseño están expuestos en **Tabla 2.12** y en el simulador queda como se ve en la **Figura 3.15**.

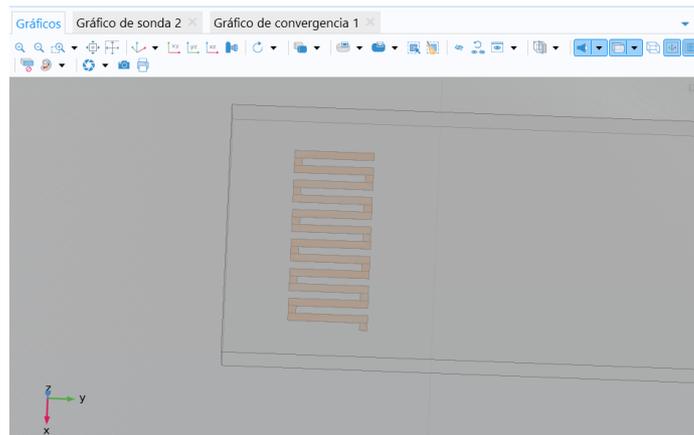


Figura 3.15 Resistencia de 75 μm

Una vez realizado el diseño hacemos una primera simulación y obtenemos un valor de la resistencia de: 0.415Ω , de nuevo un valor cercano al calculado de forma teórica. A continuación, se va a realizar un estudio paramétrico con alimentación en continua, modificando la intensidad de paso comenzando en 0.5 A y terminando en 2 A, con saltos de 0.375 A.

De esta simulación se obtienen la **Figura 3.16** y **Figura 3.17** que indican la temperatura alcanzada en la superficie de contacto de la resistencia con la pastilla de combustible y en sus cercanías.

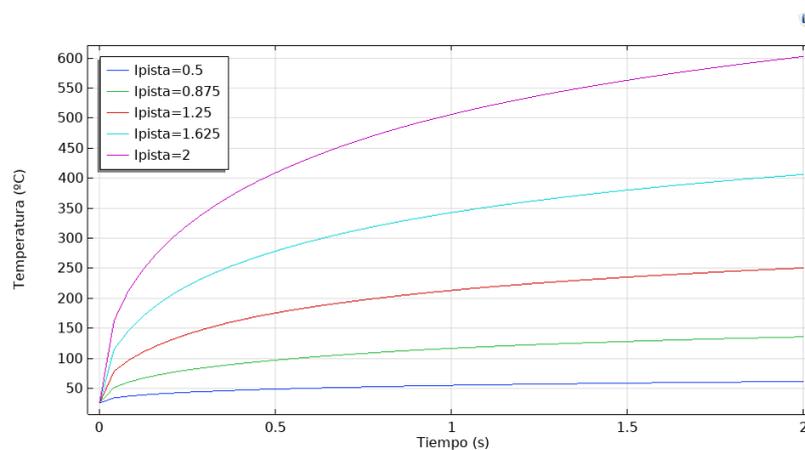


Figura 3.16 R75_L1: Evolución de la temperatura superficial

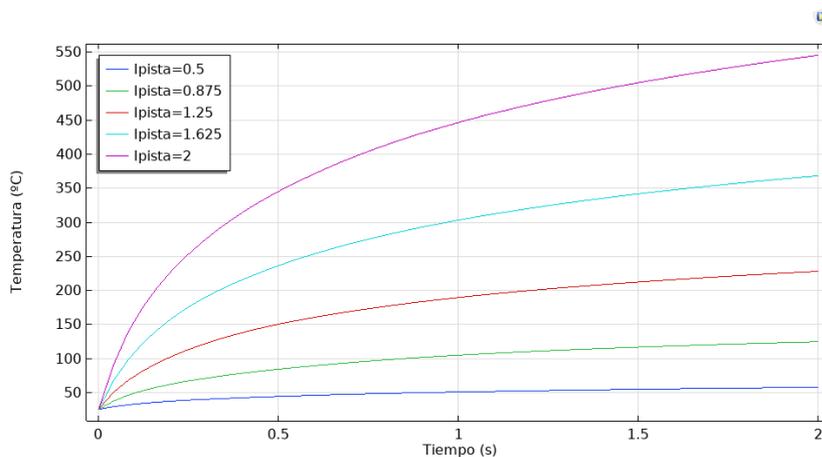


Figura 3.17 R75_L1: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 μm)

En este caso como se puede comprobar en las gráficas si se consigue alcanzar la temperatura de combustión del material consiguiendo subir hasta los 390°C en menos de 0.5 segundos para 2 A y en algo menos de dos segundos para 1.625 A, en la **Figura 3.16**. En la **Figura 3.17** tenemos una reducción de unos 50°C para las mayores corrientes, esto puede deberse simplemente a que se requiere mayor tiempo para poder transmitir energía suficiente al interior del combustible. De todas formas, no estoy seguro de cuán profundo debe penetrar el calor en el material para iniciar la combustión por lo que puede que la solución más correcta sea la comprobada en la primera gráfica.

3.1.2.3 Resistencia nueva de 75 um de ancho y doble de longitud

La siguiente resistencia es uno de los nuevos diseños planteados para corregir los problemas de alto consumo y tiempos largos de ignición que ocurrían con el diseño previo en las pruebas realizadas. Los datos de diseño están expuestos en **Tabla 2.13** y en el simulador queda como se ve en la **Figura 3.18**.

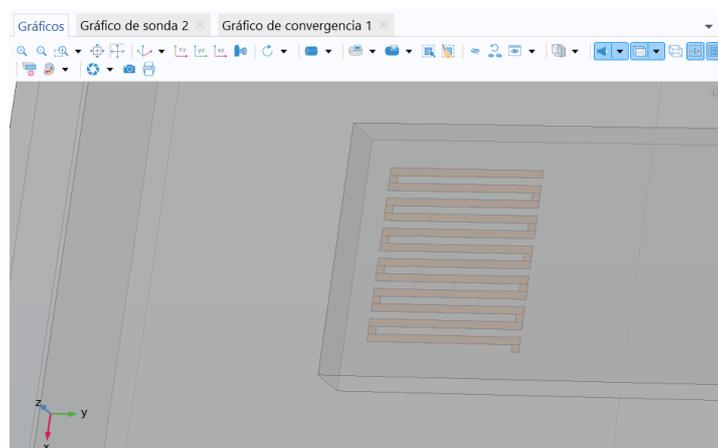


Figura 3.18 Resistencia de 75 um y longitud doble

Una vez realizado el diseño hacemos una primera simulación y obtenemos un valor de la resistencia de: 0.8245 Ω , de nuevo un valor cercano al calculado de forma teórica. A continuación, se va a realizar un estudio paramétrico con alimentación en continua, modificando la intensidad de paso comenzando desde 0.5 A y terminando en 2 A, con saltos de 0.375 A.

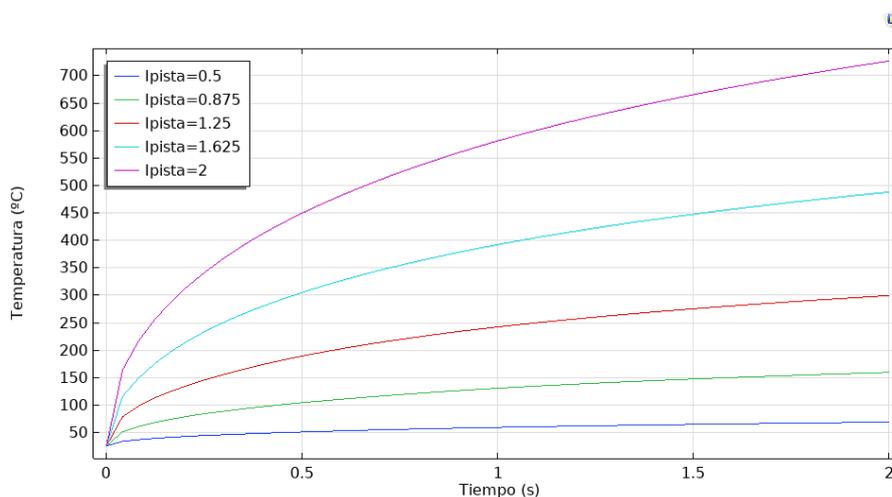


Figura 3.19 R75_L2: Evolución de la temperatura superficial

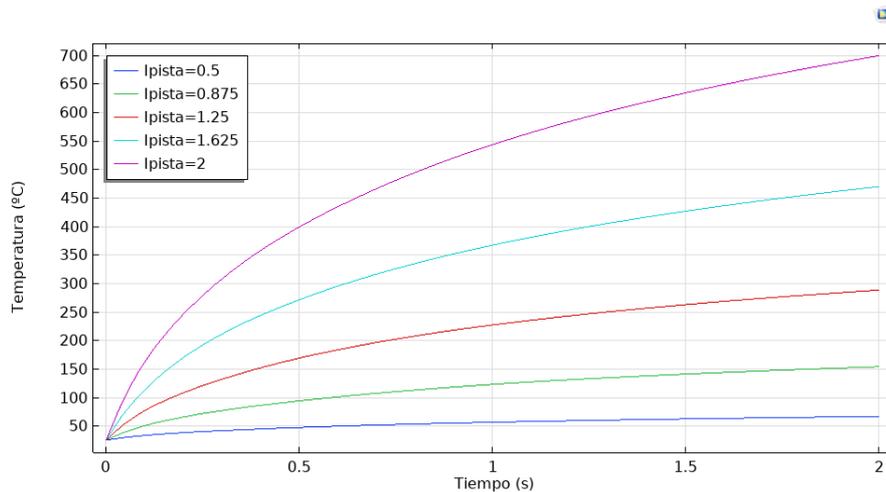


Figura 3.20 R75_L2: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 μm)

De nuevo se logra alcanzar la temperatura de combustión del combustible, tardando menos de 0.5 s en el caso de 2 A y en torno a 1 s para 1.625 A, también se observa que en torno a 1.625 A y 1.25 A podrían llegar a disparar a los 2 s, para la **Figura 3.19**. De nuevo en la **Figura 3.20** las temperaturas decaen, siendo mayor la caída cuanto mayor sea el incremento de temperatura (diferencia máxima de 50°C para 2 A). Hay una clara mejora en el sentido de calentamiento con el aumento de la resistencia, lo cual es lógico pues al aumentar la resistencia R estamos aumentando la potencia P , según la expresión del efecto Joule.

3.1.2.4 Resistencia nueva de 50 μm de ancho

La siguiente resistencia es uno de los nuevos diseños planteados para corregir los problemas de alto consumo y tiempos largos de ignición que ocurrían con el diseño previo en las pruebas realizadas. Los datos de diseño están expuestos en **Tabla 2.14** y en el simulador queda como se ve en la **Figura 3.21**.

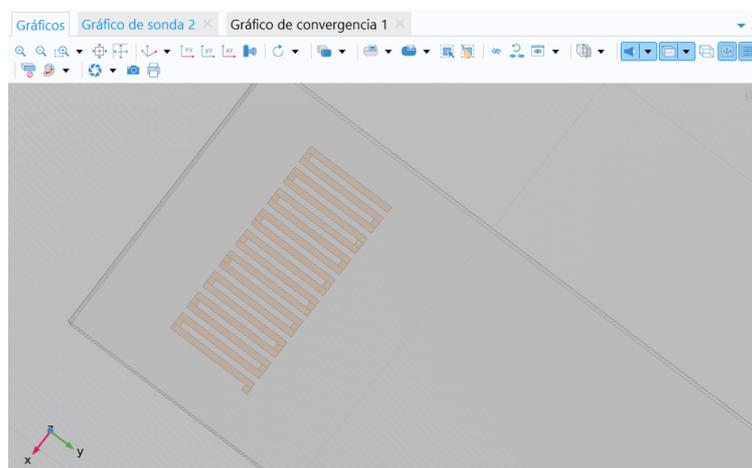


Figura 3.21 Resistencia de 50 μm

Una vez realizado el diseño hacemos una primera simulación y obtenemos un valor de la resistencia de: 0.929 Ω , de nuevo un valor cercano al calculado de forma teórica. A continuación, se va a realizar un estudio paramétrico con alimentación en continua, modificando la intensidad de paso comenzando en 0.5 A y terminando en 1.5 A, con saltos de 0.25 A.

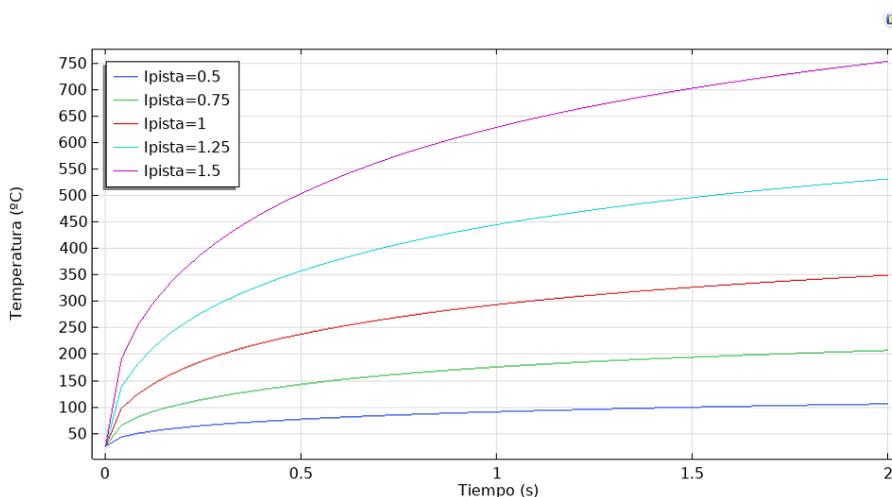


Figura 3.22 R50_L1: Evolución de la temperatura superficial

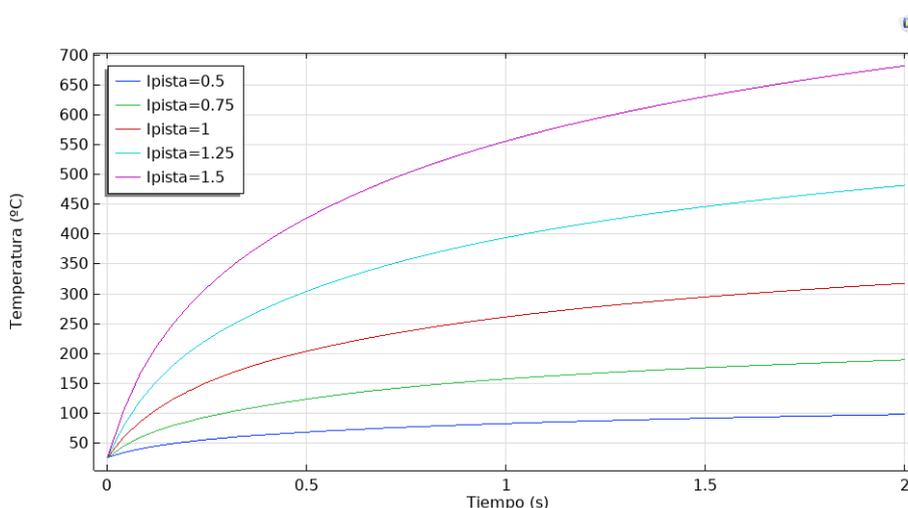


Figura 3.23 R50_L1: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 um)

Ahora se logran resultados muy favorables incluso con corrientes más bajas que en previas simulaciones, obteniendo en la **Figura 3.22** la temperatura objetivo en menos de 0.5 s con 1.5 A y en menos de 0.75 s con 1.25 A, incluso valores intermedios entre 1.25 A y 1 A logran alcanzar este valor en los 2 s de simulación. Es destacable esta mejora de calentamiento, considerando que apenas ha aumentado el valor de la resistencia en 0.1Ω , pero esto tiene sentido ya que se ha reducido el espacio entre pistas a solo 50 um, lo cual provoca que la pistas se calienten entre sí al estar más cerca y de esta forma se concentra el calor generado.

3.1.2.5 Resistencia nueva de 50 um de ancho y doble de longitud

La siguiente resistencia es uno de los nuevos diseños planteados para corregir los problemas de alto consumo y tiempos largos de ignición que ocurrían con el diseño previo en las pruebas realizadas. Los datos de diseño están expuestos en **Tabla 2.15** y en el simulador queda como se ve en la **Figura 3.24**.

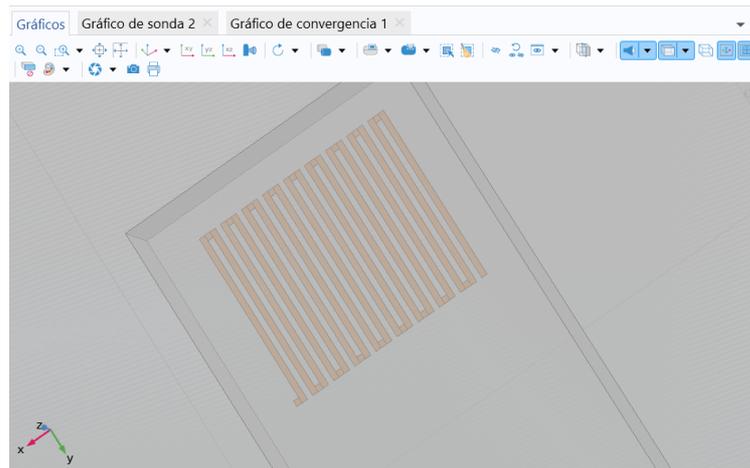


Figura 3.24 Resistencia de 50 μm y doble longitud

Una vez realizado el diseño hacemos una primera simulación y obtenemos un valor de la resistencia de: 1.85Ω , de nuevo un valor cercano al calculado de forma teórica. A continuación, se va a realizar un estudio paramétrico con alimentación en continua, modificando la intensidad de paso comenzando en 0.5 A y terminando en 1.5 A, con saltos de 0.25 A.

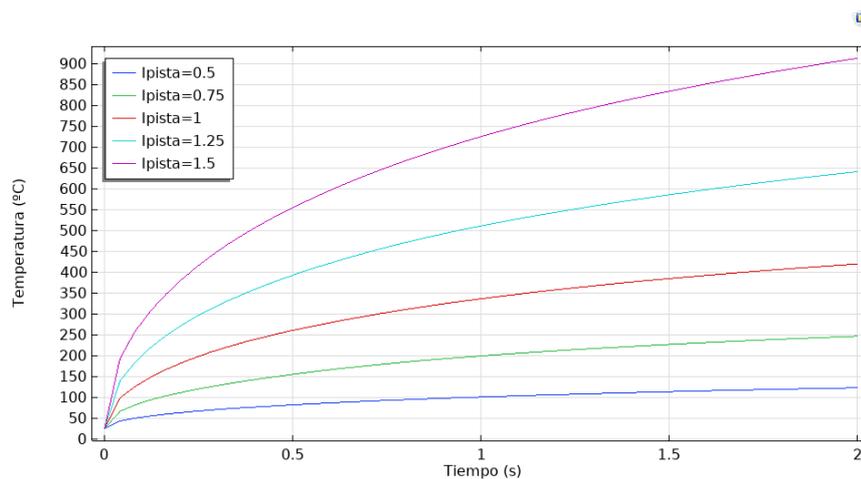


Figura 3.25 R50_L2: Evolución de la temperatura superficial

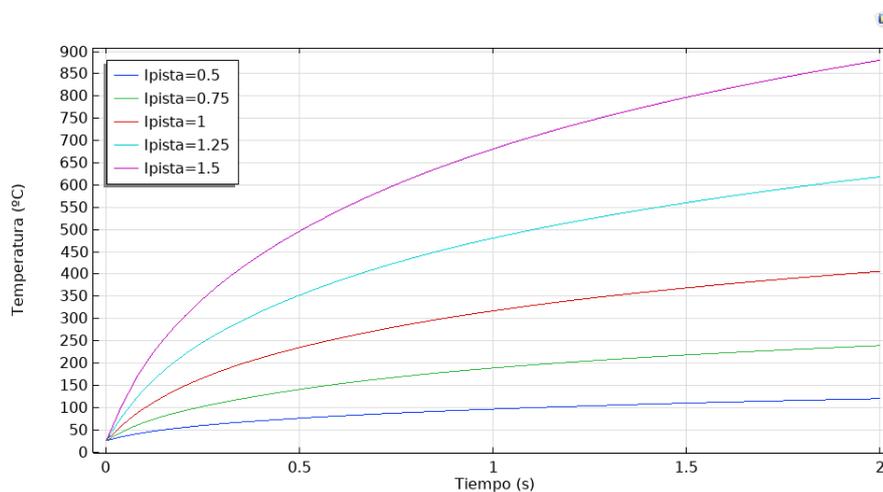


Figura 3.26 R50_L2: Evolución temperatura en el interior de la pastilla (70 μm)

Se mantiene la trayectoria de aumento de temperatura con el aumento de resistencia (como es lógico), aunque en este caso las principales mejoras son que se consigue una leve mejora en los tiempos de calentamiento y en las corrientes requeridas para lograr alcanzar la temperatura objetivo, logrando alcanzar esta temperatura con corrientes de 1 A o mayor en los 2 s que dura la simulación.

3.2 Diseño en KiCad

Una vez completadas las simulaciones y decidido cuáles tienen un mejor funcionamiento de cara al calentamiento superficial, ya podemos plantear la idea de elaborar un diseño a nivel de placa para poder solicitar a un fabricante su producción y envío.

Para esto se ha hecho uso del programa *KiCad 8.0*, el cual se trata de un software de código abierto planteado para la creación de esquemas de circuitos electrónicos, placas de circuito impreso y descripciones de piezas asociadas. *KiCad* también incluye varias utilidades para ayudar con el diseño de circuitos y PCB, incluida una calculadora de PCB para determinar las propiedades eléctricas de las estructuras de los circuitos, un visor Gerber para inspeccionar archivos de fabricación, un visor 3D para visualizar la PCB terminada y un simulador SPICE integrado para inspeccionar el comportamiento de los circuitos. [20]

3.2.1 Metodología de diseño

A continuación, explicaré detalladamente los pasos que he tomado para la realización de una placa de circuito impreso.

1. Una vez creado un nuevo proyecto aparecerán dos tipos de archivos, un archivo de esquemáticos y otro para el diseño en PCB. El primero es el archivo terminado en `.kicad_sch` y el segundo el terminado en `.kicad_pcb`.
2. Opcionalmente, se puede modificar el archivo de esquemáticos para añadir componentes, como pueden ser unos conectores tipo macho/hembra para tener conexión al exterior. Para esto se tiene que hacer click en el recuadro de componentes y saldrán cientos de opciones para buscar, una vez seleccionados se unen mediante cables. En mi caso no he hecho uso de un esquemático pues solo he utilizado pistas de cobre.

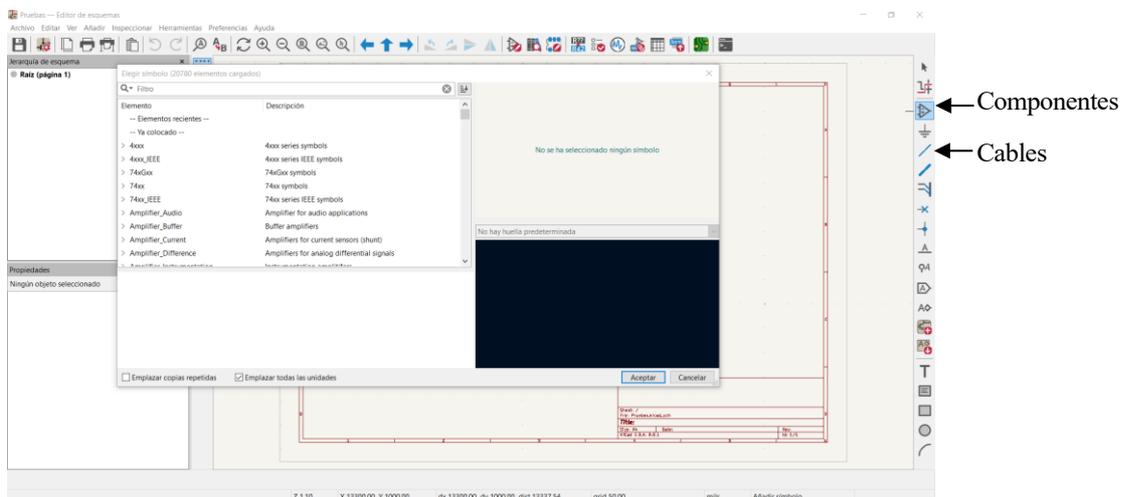


Figura 3.27 Lista de componentes

- Si se requiere, una vez dentro del archivo de diseño en PCB, se pueden importar diseños realizados en otros programas de tipo CAD. Para esto ir a la opción de *Archivo*, arriba a la izquierda y seleccionar *Importar*, y luego, *Gráficos*. Con esto solo queda buscar el archivo y seleccionar la escala y capa. Recomiendo importar en las capas F.Cu o B.Cu para poder editar.

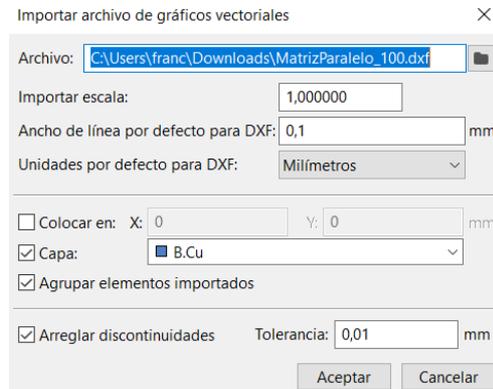


Figura 3.28 Importar archivos gráficos

- En la **Figura 3.29** se ve el archivo de diseño en PCB en el cual se hará uso de la capa F.cu para el diseño de todas las pistas y la capa User.Drawings para dibujar las dimensiones de la placa. Se utilizarán las opciones de enrutar pista para las conexiones, dibujar líneas para las dimensiones, añadir texto para dibujar letras o números en el diseño, añadir zonas de relleno para cubrir de cobre todo lo que no esté aislado y, por último, añadir áreas de regla para evitar que la cubierta de cobre tape los números.

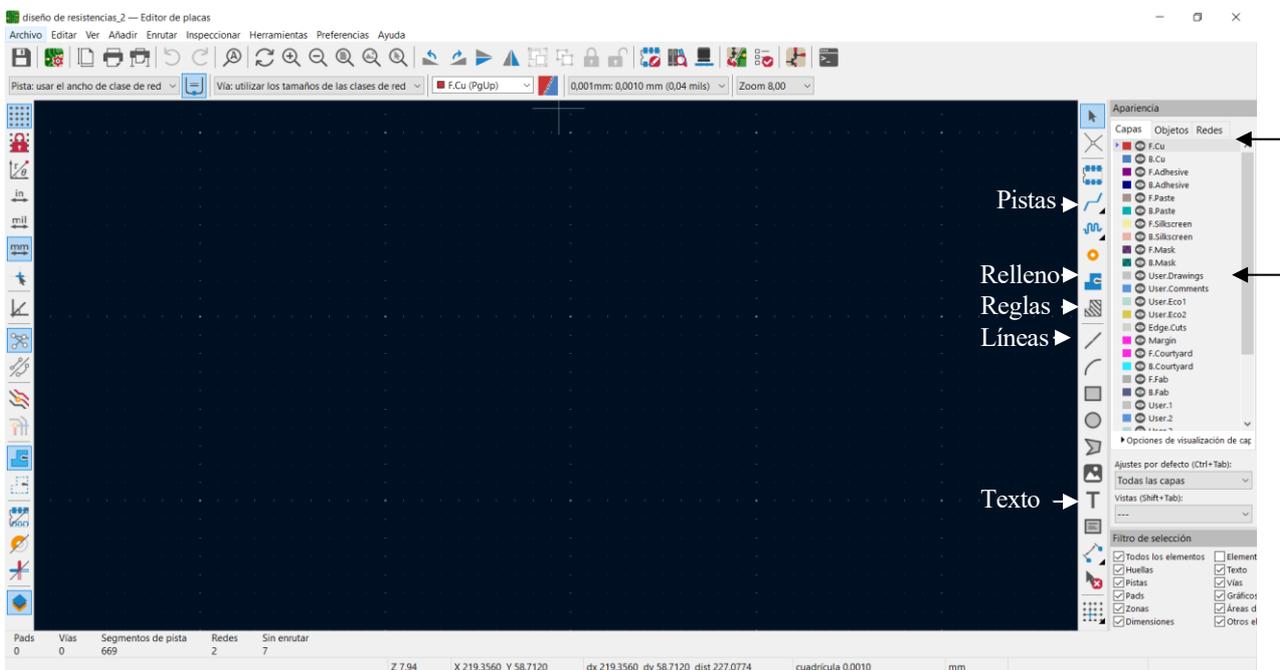


Figura 3.29 Menú de KiCad

- Se comienza realizando líneas en la capa User.Drawings para dibujar la forma de la placa de PCB objetivo. Las dimensiones que he utilizado las aportaré más tarde.

- En la capa F.Cu se llevarán a cabo todas las pistas que conformarán las resistencias y las conexiones eléctricas de la PCB. Las pistas de conexión utilizarán una dimensión de 1 mm y las de las resistencias variarán con el diseño a realizar. Algo importante a tener en cuenta es que, al no tener un esquemático, para poder conectar pistas entre sí se debe hacer click en estas y añadir o seleccionar la red que va a utilizar, como vemos en la **Figura 3.30**. Esto está pensado para evitar conectar por error pistas diferentes y para que estén aisladas de tierra.

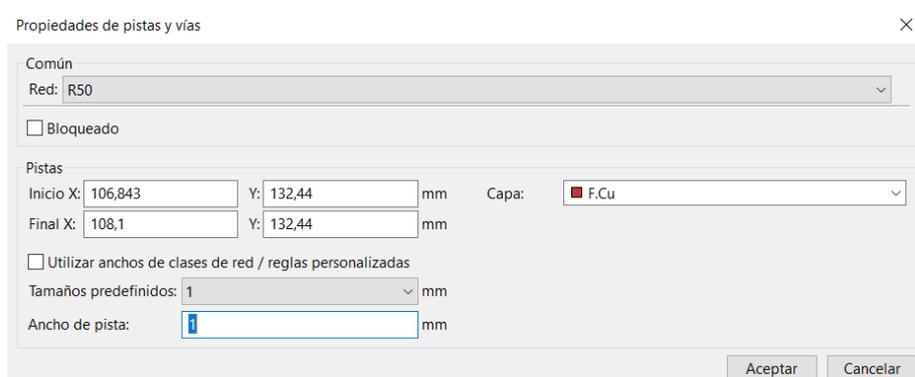


Figura 3.30 Configuración de pista

- Una vez completado el diseño, opcionalmente, se pueden añadir textos o números indicativos a la placa. En mi caso se hace uso de esto para indicar las medidas de las resistencias cercanas ya que a simple vista puede ser complicado de ver.
- Ya con todo realizado solo queda marcar las áreas de relleno y las de reglas. Para la primera se selecciona todo el bloque donde tengamos pensado vaya a ocupar el PCB, para de esta forma reducir la cantidad de cobre a eliminar (con el margen se indica el espacio entre relleno y pista). La segunda, al elegir el área seleccionamos la opción de área restringida para rellenos de área y seleccionamos las zonas donde tengamos textos o números.

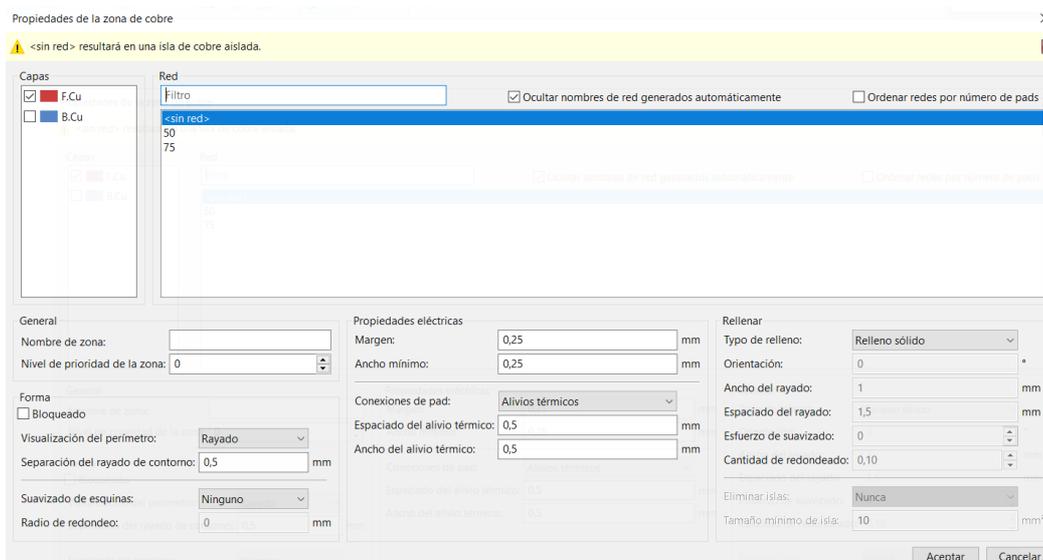


Figura 3.31 Configuración del área de relleno

9. Ya completados los pasos anteriores, solo queda rellenar las zonas seleccionadas. Para esto se selecciona la opción de *Editar*, arriba a la izquierda, y una vez dentro, *Rellenar todas las zonas*. A tener en cuenta, que si se realiza posteriormente alguna modificación se deberá repetir este paso de nuevo.

Como consideración aparte, cuando tuve que adaptar el diseño del PCB al archivo CAD enviado por mi compañero, hice uso de una opción bastante útil que es, teniendo seleccionado lo que queremos mover, hacer click derecho y seleccionar la opción *Herramientas de posicionamiento*, y dentro *Mover con precisión*.... Esto me permitió una colocación precisa y girar los componentes en un ángulo exacto.

3.2.2 Diseños realizados

Para el proyecto se llevaron a cabo en específico cinco diseños de PCB, los primeros tres de ellos para comprobar si era posible realizar las resistencias en el laboratorio de la escuela, el cuarto es, una vez comprobado esto último, una mejora en el diseño modificando las pistas de conexión y las resistencias integradas en el sistema. Por último, el quinto diseño es una adaptación del PCB al diseño en CAD elaborado por mi compañero Alejandro, para de esta manera poder realizar mayor número de pruebas de micro pulsos sin requerir de un tercero para su fabricación.

3.2.2.1 Primer diseño

Para comenzar a realizar las pruebas de fabricación se decidió empezar realizando un diseño en PCB de 50x50 mm y colocando varias resistencias distintas en fila para comprobar si eran funcionales tras el proceso de fabricación. En este caso se mantuvo una primera fila de 125 μm , otra con resistencias de 75 μm y una última con 50 μm . Dos de las resistencias de cada fila mantiene una longitud de cada columna igual a la original del prototipo, es decir, de 0.76 mm, y las otras tres doblan esta longitud midiendo 1.52 mm. En este caso todas las resistencias de la placa tienen un espacio entre pista de 0.1 mm y la misma cantidad de ciclos en el serpentín, siendo este valor 7 ciclos.

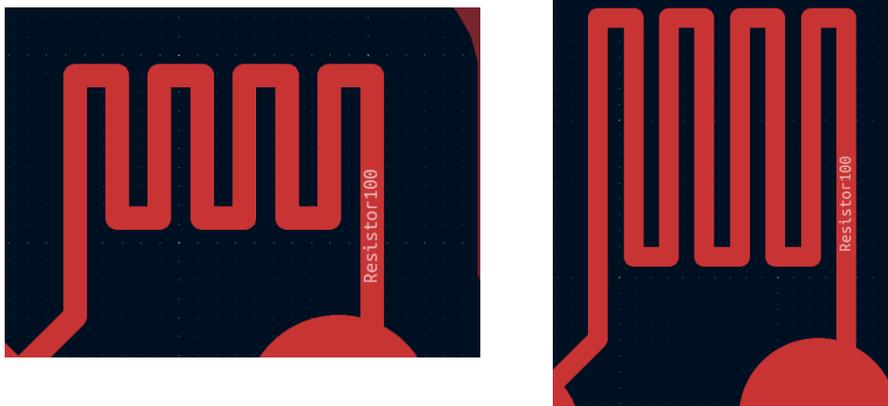


Figura 3.32 Diseño 1: Resistencias de 125 μm

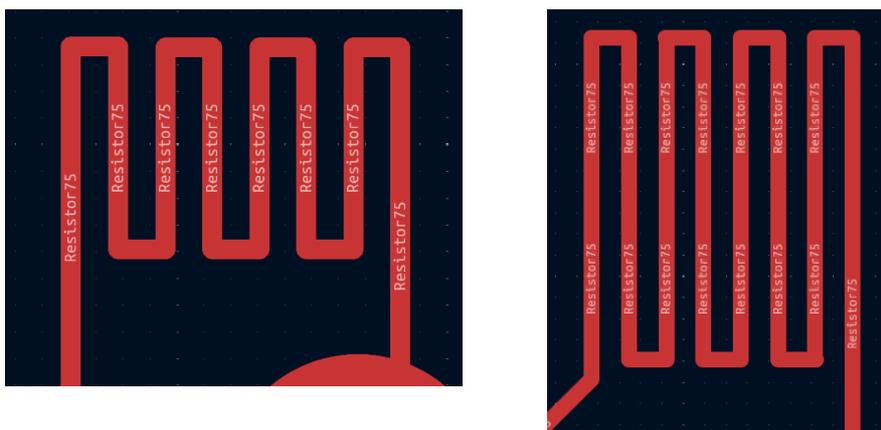


Figura 3.33 Diseño 1: Resistencias de 75 um

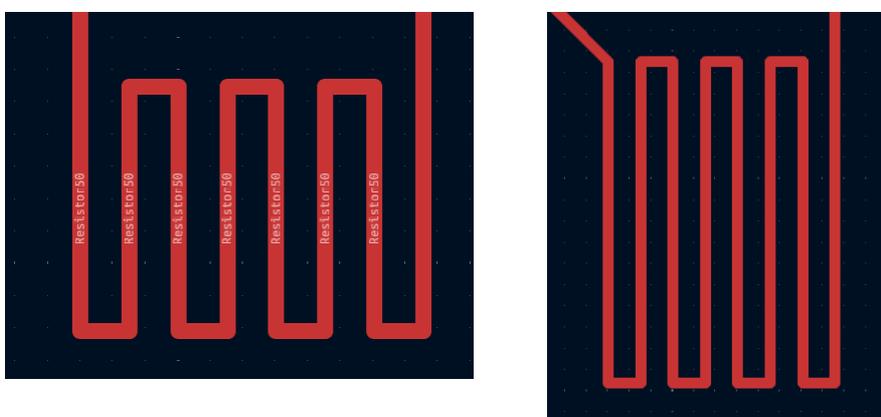


Figura 3.34 Diseño 1: Resistencias de 50 um

Para conectar las resistencias, en principio se decidió usar una pista común por cada fila para unir a una de las conexiones de las resistencias, esta pista cruza toda la PCB hasta salir por un lateral. La conexión restante se alargaba individualmente hasta que saliera de la placa. Para las pistas de conexión se utilizó un grosor de 1 mm, y para donde debería realizarse una soldadura se aumentó el grosor hasta 1.5 mm para facilitar este trabajo. Inicialmente el margen del área de relleno es de 0.5 mm. El resultado sería el de la **Figura 3.35**.

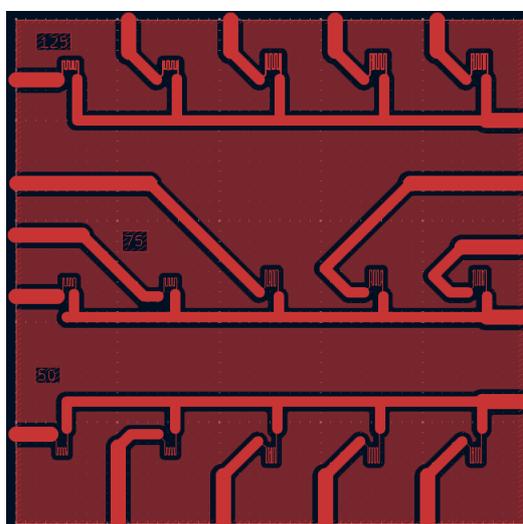


Figura 3.35 Diseño 1 completo

3.2.2.2 Segundo diseño

En este caso se han mantenido los diseños de las resistencias previamente mostradas, pero se han alterado los métodos de conexionado de las resistencias. Por consejo del profesor Francisco Perdignes, se han redistribuido las conexiones comunes para que una misma pista no esté alimentando a más de dos resistencias como máximo. Esto se realiza para evitar los disparos de múltiples resistencias por corrientes parásitas, que es un problema que se puede dar si se producen descargas rápidas mediante condensador (por si se llegasen a realizar pruebas de este tipo). La única otra diferencia es que las pistas de conexionado se mantienen siempre con un grosor 1 mm. El resultado sería el de la **Figura 3.36**.

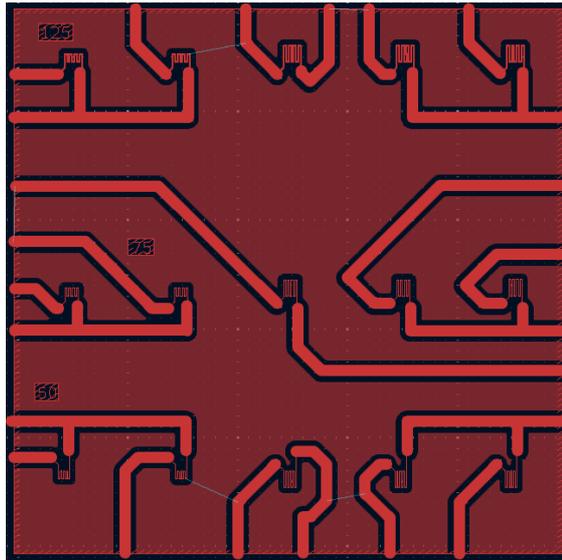


Figura 3.36 Diseño 2 completo

3.2.2.3 Tercer diseño

Para el tercer diseño se modificaron el número de ciclos de los serpentines de las resistencias de 75 μm y 50 μm , ya que el tamaño total que ocupaban al tener menor espesor de pista era menor que en el caso de las resistencias originales del prototipo de micro propulsor (que se considera que es el tamaño objetivo). Por ello se aumentó a 9 ciclos en el caso de las resistencias de 75 μm y a 11 ciclos las de 50 μm . Por último, se cambió una de las resistencias de 50 μm , para añadir una de 100 μm y que sería por tanto del mismo grosor que el prototipo.

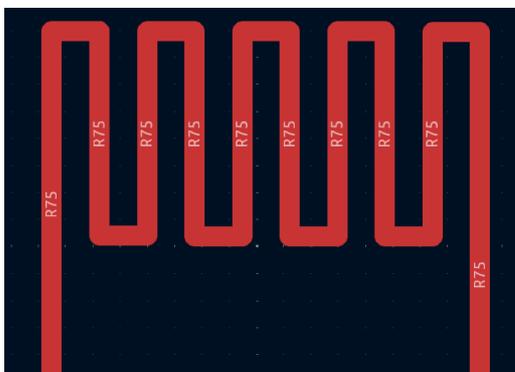


Figura 3.37 Diseño 3: Resistencias de 75 μ m

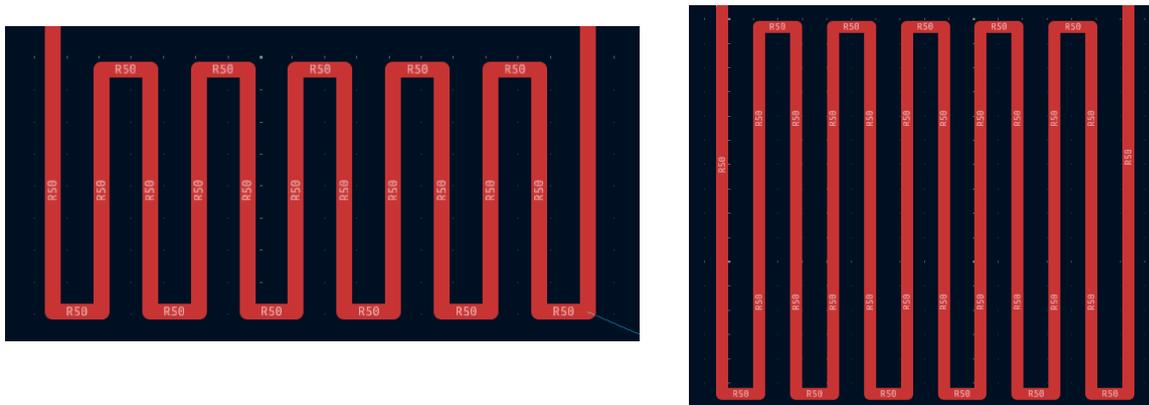


Figura 3.38 Diseño 3: Resistencias de 50 μ m

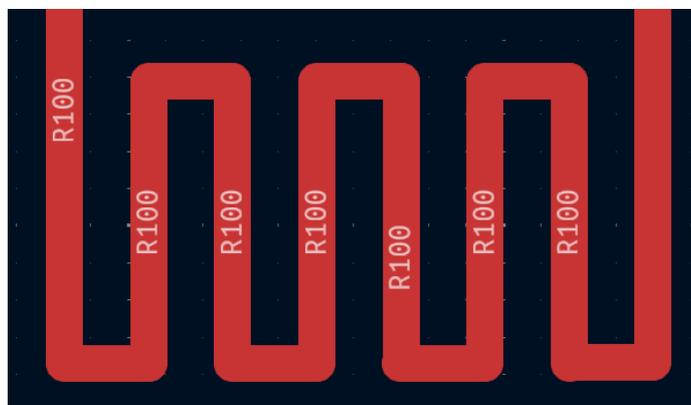


Figura 3.39 Diseño 3: Resistencia de 100 μ m

Se mantiene el mismo diseño de las pistas de conexión que en el caso anterior, quedando el diseño como se observa en la **Figura 3.40**.

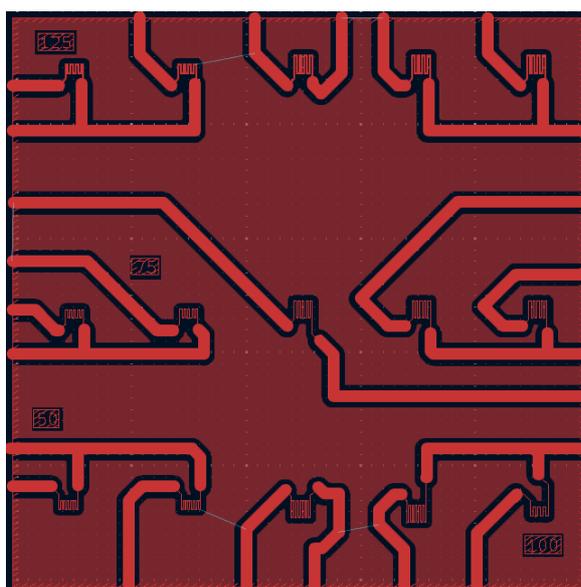


Figura 3.40 Diseño 3 completo

3.2.2.4 Cuarto diseño

En este punto ya se ha realizado una prueba fabricación con resultados muy positivos. Por esto se elimina la fila de 125 μm y se sustituye por otra de 50 μm , de esta manera tenemos dos filas de 50 μm y una de 75 μm . De nuevo, se modifican las resistencias, en este caso dejando un espacio entre pista igual al tamaño de pista de la resistencia. Esto nos permite modificar de nuevo el número de ciclos de las resistencias, teniendo un valor final de 11 para las de 75 μm y 17 para las de 50 μm .

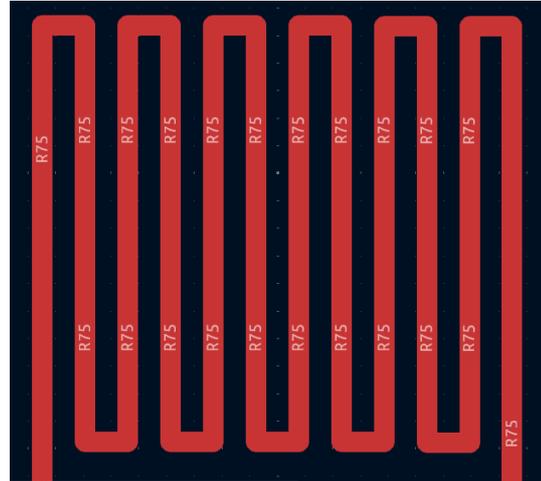
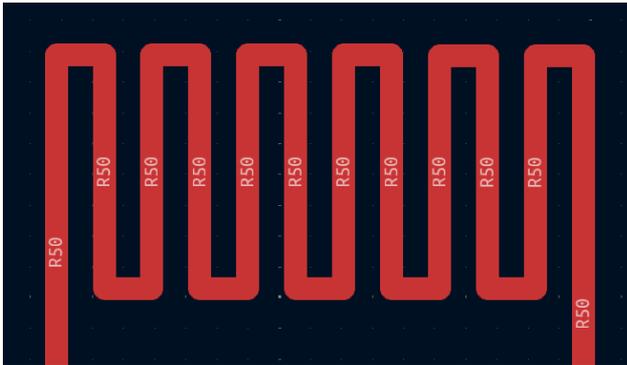


Figura 3.41 Diseño 4: Resistencias de 75 μm

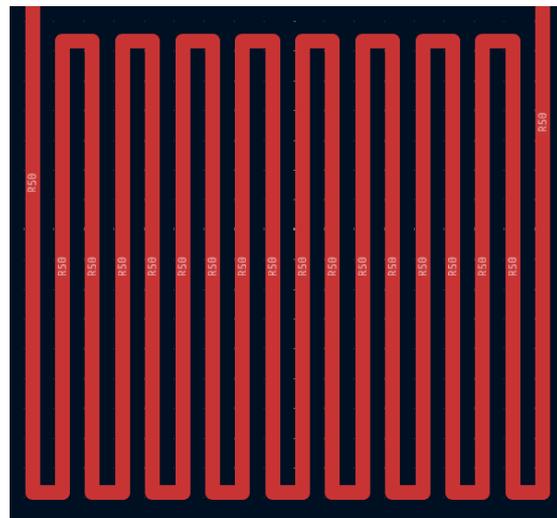
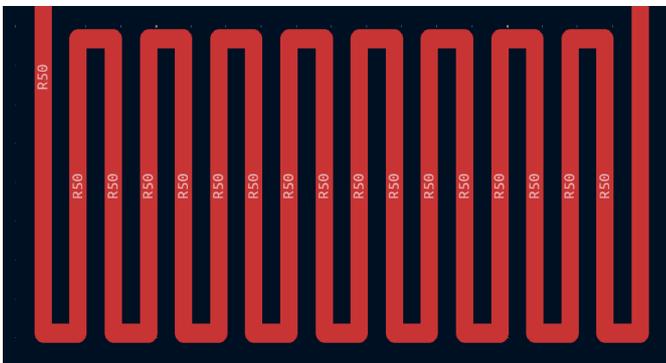


Figura 3.42 Diseño 4: Resistencias de 50 μm

Para el diseño del conexionado también se han realizado unas leves modificaciones y es que se han aumentado la longitud de las pistas más allá del área de relleno de forma que se facilite la soldadura de cables sin peligro de provocar cortocircuito. Esto aumenta el tamaño del PCB hasta medir 56x56 mm. Por último, se ha modificado el margen de relleno hasta 0.25 mm. El resultado de este diseño se muestra en la **Figura 3.43**.

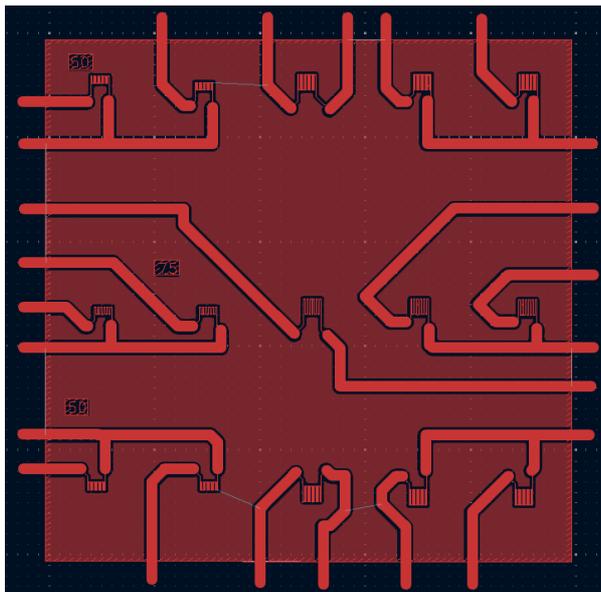


Figura 3.43 Diseño 4 completo

3.2.2.5 Diseño final

Aquí se ha intentado realizar una implementación del PCB para que coincida con el diseño estructural, mostrado en la **Figura 3.44**, de los depósitos diseñados y fabricados en metacrilato por mi compañero Alejandro, de tal forma que se puedan disparar como si fueran los depósitos reales de un micro propulsor.

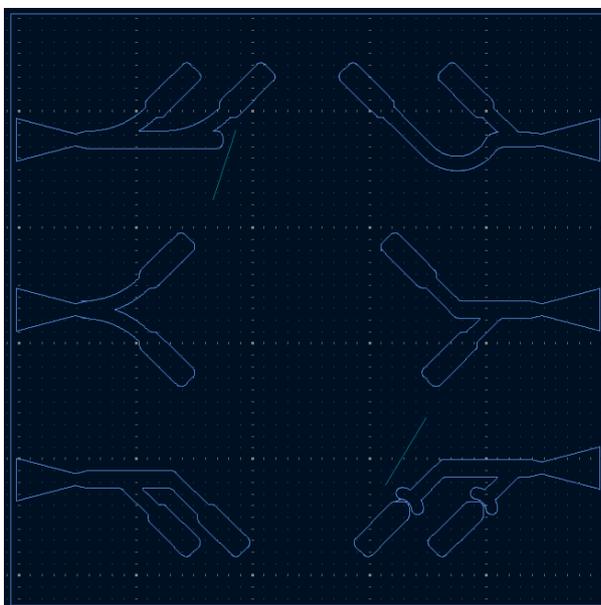


Figura 3.44 Diseño estructural

En el caso de las resistencias no se han realizado modificaciones estructurales. Se han colocado justo en las salidas de los depósitos, de forma equitativa entre las de 50 μm y las de 75 μm , teniendo siempre en cada estructura una larga y otra normal.

Para el conexionado de nuevo se usan pistas de 1 mm, aunque en las zonas cercanas a las resistencias y acceso complejo se han usado pistas de 100 μm para la conexión. De nuevo se alargan hasta los bordes de

la PCB, donde en este caso hemos generado un área de relleno distinta a la del interior, teniendo la del interior un margen de 0.25 mm, mientras que la del exterior un margen de 1 mm. De esta forma eliminamos menos cobre de la placa y facilitamos la posterior soldadura. Tenemos por tanto un tamaño final del PCB de 61x61 mm. El resultado final se muestra en la **Figura 3.45**.

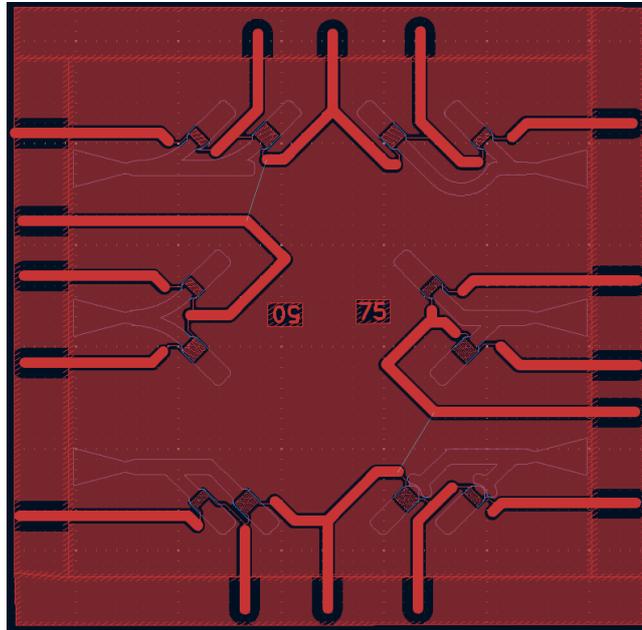


Figura 3.45 Diseño final completo

4 FABRICACIÓN DE RESISTENCIAS

Debido al agotamiento de los micro propulsores para realizar pruebas, se hizo necesario producir mayor cantidad de estos. El problema viene cuando nos planteamos que la última entrega realizada por el fabricante tardó en torno a 6 meses en llegar desde el día que se hizo el pedido. Esto en si mismo ya era un problema bastante grande ya que producía un gran retraso de tiempo para la realización de pruebas. Sumado a esto el diseño original de los micro propulsores tenía resistencias demasiado pequeñas y que no daban siempre buenos resultados, aparte de que consumían corrientes para disparar de aproximadamente a 3.5 amperios.

Este capítulo, por tanto, se centrará tanto en el proceso seguido para conseguir llevar a cabo la fabricación de resistencias en los laboratorios de la escuela mediante los diseños realizado en KiCad, como en las herramientas requeridas para poder llevar esto a cabo.

4.1 Equipamiento

Para comenzar será necesario el uso de una habitación adaptada a este tipo de actividades. En cuestión, debe ser una habitación sin ventanas, o en su defecto, que estas tengan los cristales tapados con cartulinas negras de un espesor suficiente para que no entre nada de luz, esto se requiere debido a que para la elaboración de las máscaras y de las resinas se utiliza la incidencia de ciertas frecuencias de luz para marcar o endurecer el material, y el sol de por sí ya emite estas frecuencias, por lo que nos estropearía el trabajo realizado. También debe contar con un extractor de aire para eliminar partículas de polvo, que podrían alterar el resultado final, y gases que se produzcan por los químicos utilizados durante los procesos de fabricación. Por último, un fregadero sería de utilidad para algunos de los pasos de fabricación (para alguna mezcla se requiere agua) y para la limpieza de las bandejas utilizadas para las mezclas.

- **Iluminación**

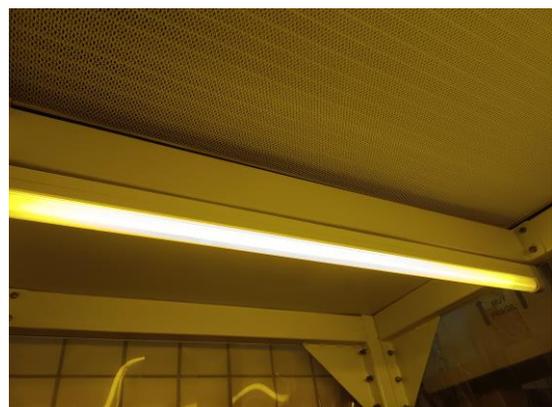


Figura 4.1 Tubos fluorescentes azul y amarillo respectivamente

Se requieren dos tipos de iluminación, una muy tenue de color azul que se utiliza cuando se manipulan las láminas de acetato fotosensible, ya que se marcan mediante luz infrarroja, y otra de un color amarillo que se utilizará cuando se esté utilizando una resina fotosensible, ya que se endurecen/ablandan (resina negativa/positiva) al recibir luz ultravioleta.

- **Photoplotter**



Figura 4.2 Photoplotter

El photoplotter se utiliza para imprimir sobre las láminas de acetato fotosensible el diseño realizado previamente, mediante la aplicación de un láser en las posiciones requeridas. La lámina se coloca en el rodillo interior y se adhiere usando cinta adhesiva. Tiene que estar conectada a un ordenador y recibir a través de este el diseño de impresión.

- **Revelador para acetato**



Figura 4.3 Revelador para acetato

El revelador se utiliza para diferenciar entre las zonas dibujadas en el acetato fotosensible, dejando las zonas no marcadas de un color blanco, mientras que se mantiene en color negro el diseño implementado. No debe en ningún caso caer fijador sobre el revelador. Se mezcla con agua en una proporción de 1:2 para obtener el producto a utilizar.

- **Ordenador**

Se requiere un ordenador para convertir el diseño extraído de KiCad en algo que la photoplotter pueda interpretar e imprimir. Se utilizarán los siguientes programas: *LinCAD4* para crear archivos .Gerber, *Convert Gerber to bitmap* para convertir el diseño en un bitmap, *view FPF* para comprobar que el diseño se haya convertido correctamente, y *Run_Photo_USB* para configurar y dar inicio a la impresión.

- **Láminas de acetato fotosensible**

Estas láminas son sensibles a la luz infrarroja por una de sus dos caras, teniendo un lado de color marrón y otro negro (o al menos esos son los colores que se pueden percibir a oscuras), pudiendo aplicar mediante láser el dibujo que se quiere obtener. Estas láminas tienen que ser extraídas y manipuladas siempre a oscuras solo iluminado con luz azulada. Deben recortarse antes de introducirlas en el photoplotter.

- **Fijador para acetato**



Figura 4.4 Fijador para acetato

El fijador es el paso final para obtener la máscara en la lámina de acetato y es que se utiliza para que aquellas áreas que hayan tomado ese color blanco comiencen a transparentarse, de forma que el resultado final sea una lámina transparente con el circuito impreso en ella de color negro. Se mezcla con agua en una proporción de 1:3 para obtener el producto a utilizar.

- **Placa de PCB**



Figura 4.5 Placa de PCB sin resina

Se trata de una placa de PCB con una capa de cobre de 5 μm y con una capa de resina negativa que viene pensada para saltarnos un paso del proceso de fabricación, aunque de todas formas esta se elimina porque se prefiere trabajar con la resina positiva de los laboratorios.

- **Acetona**

Se requiere el uso de acetona para eliminar las capas de resina depositadas sobre la capa, tanto para la limpieza final, como para eliminar la resina que viene originalmente sobre la placa de PCB, y eliminar posibles fallos de deposición de la resina.

- **Resina en espray**



Figura 4.6 Lata de resina positiva

Para la deposición se va a hacer uso de una resina positiva (se ablanda al recibir luz ultravioleta) que se deposita mediante espray. Se necesitará también de un lugar preparado para hacer la deposición (mancha).

- **Placa térmica**



Figura 4.7 Placa térmica con protección de papel de aluminio

Ya se explicó en el primer capítulo, pero básicamente permite alterar la temperatura superficial de la placa entre 0 y 540°C.

- **Alineadora**

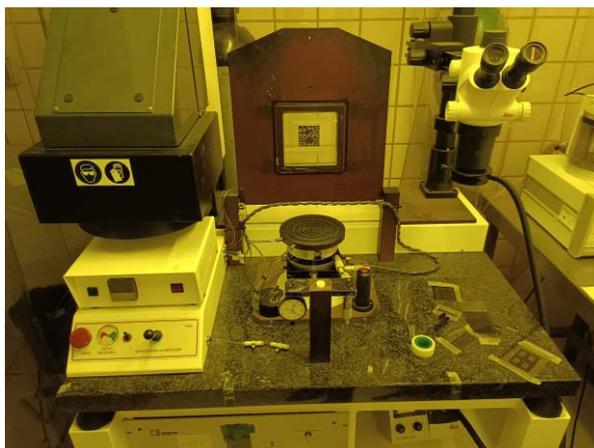


Figura 4.8 Máquina alineadora

Esta máquina se utiliza para que el diseño de la máscara se traslade a la resina depositada sobre el PCB. Para ello se coloca la PCB en un soporte y la máscara se pega al vidrio de la placa superior que luego se depositará encima, luego, se baja la placa y mediante una manecilla se baja la altura de la placa hasta que ejerza la máxima presión sobre el soporte (tenemos un manómetro indicador). Por último, solo queda desplazar la insoladora sobre la placa y pulsar el pulsador que inicia las emisiones de rayos UV durante unos 15-20 s. Detalle importante es que es la máquina más cara de la sala y la que mayor consumo tiene, siendo tal que cada encendido reduce su tiempo de vida en unas horas. Debe esperarse 15 min entre encendido y uso, lo mismo entre apagado y encendido.

- **Revelador de PCB**



Figura 4.9 Revelador de PCB

Este revelador se utiliza para eliminar la resina que no haya quedado endurecida tras el proceso de exposición a luz UV, de tal forma que solo quede el circuito impreso en esta. Viene de fabricación como unas bolsitas llenas de un compuesto sólido. Para obtener la mezcla se ha de combinar en una proporción de un litro de agua por cada bolsita.

- **Ácido clorhídrico para el ataque**



Figura 4.10 Botellas de agua fuerte (20% HCl) y agua oxigenada respectivamente

Para el ataque del cobre se utiliza ácido clorhídrico. Normalmente, se realiza una mezcla con una proporción de 25 ml de agua fuerte, 25 ml de agua oxigenada y 50 ml de agua, pero en mi caso se ha diluido algo más el ácido para controlar mejor el ataque con una proporción de 15 ml de agua fuerte, 15 ml de agua oxigenada y 70 ml de agua (para llenar una bandeja hacemos 60 ml, 60 ml y 280 ml).

- **Equipo de laboratorio**

Será necesario disponer de una bandeja para las distintas mezclas a realizar (una para revelador, otra para fijador y otra más para los procesos de revelado y ataque del PCB), probetas para medir los volúmenes de líquidos utilizados y botellas para los desechos químicos. También se necesitarán guantes y bata de laboratorio para evitar manchas e irritaciones.

4.2 Fabricación de las máscaras

Para iniciar el proceso de fabricación, es necesaria la creación de unas máscaras de acetato (resolución 30 - 40 μm) en las que vendrá impreso el circuito diseñado y con las cuales se podrá llevar a cabo la posterior exposición del PCB, y así poder realizar el ataque del cobre.

1. Para comenzar debemos hacer una conversión del diseño realizado en *KiCad* a un archivo tipo Gerber. Para ello, dentro de *KiCad*, se selecciona arriba a la izquierda la opción de *Trazar*, y en la ventana que se abre seleccionamos solo la capa F.Cu y en el formato de trazado, elegimos Gerber.

5. Por último, solo queda utilizar el programa *Run_Photo_USB* que controla la impresión del photoplotter. Se carga el archivo creado y le damos a *Play*, luego seleccionamos las opciones *Resolution (2032x8600)* e *Intensity 160*. Pero antes de darle a imprimir debemos preparar la photoplotter y los químicos necesarios.
6. Hay que preparar todo con antelación, debido a que a continuación, vamos a trabajar a oscuras. Primero abrimos el photoplotter y colocamos el rodillo en su posición inicial (indicado por flechas), también debemos conectarla con USB al pc y poner el interruptor en modo *Auto*. Además, debemos preparar el revelador y el fijador que vamos a utilizar, y depositarlos en bandejas separadas para poder hundir la lámina de acetato.
7. A continuación, se apagan todas las luces de la sala (incluido la pantalla del ordenador) y cerramos la puerta, para evitar cualquier iluminación, y encendemos únicamente el tubo fluorescente azul.
8. Ahora se pueden sacar las láminas de acetato fotosensible de su empaquetado y cortarlo con unas tijeras para conseguir pequeños recuadros. Uno de estos recuadros se pegará con cinta adhesiva al rodillo (la carilla de color negro debe colocarse mirando hacia arriba) comenzando desde la posición inicial e intentando evitar en la medida de lo posible cualquier arruga o bulto.
9. Una vez completado el paso anterior, cerramos la photoplotter y ya podemos darle a imprimir en el pc (mientras la photoplotter esté cerrada se pueden encender luces). Esto tardará unos cuantos minutos en función del tamaño del diseño.
10. Una vez completada la impresión, de nuevo con solo la iluminación azul, se saca la lámina de acetato y se lleva al fregadero donde están todas las bandejas a utilizar.
11. Para empezar el proceso de revelado se deposita la lámina en el interior de la bandeja con el revelador y se remueve durante un minuto. Si todo se ha realizado correctamente, debería verse de un color blanquecino aquellas partes que no estén dentro de la zona de impresión.
12. Después, se pasa la lámina por agua para eliminar el revelador y se deposita en la bandeja de fijador, donde se removerá durante 1–2 min hasta que se compruebe que los bordes blanquecinos se han transparentado.
13. Una vez completado este proceso, se pasa por agua de nuevo y se deja secar. Ya se pueden encender las luces.

4.2.1 Resultados

En este caso se decidió llevar a cabo dos de los diseños elaborados en *KiCad*, en específico el tercer diseño, para comprobar si era viable la elaboración de las resistencias, y el diseño final, el cual estaba ya adaptado a un diseño estructural de varios micro propulsores.

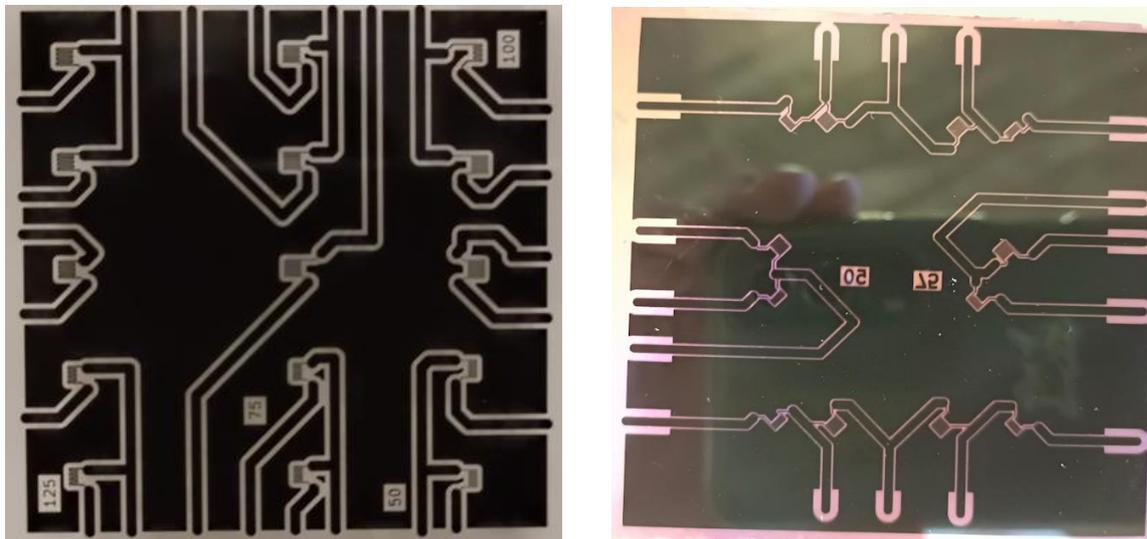


Figura 4.13 Tercer diseño y diseño final respectivamente

4.2.2 Problemas

Para la elaboración de las máscaras el principal problema encontrado fue que en las primeras fabricaciones aparecían bordes negros y borrosos en los alrededores del circuito impreso, provocando que no quedaba muy bien definidos los bordes de este, ni las resistencias diseñadas. Encontramos que el problema se daba con el revelador, y es que estaba muy envejecido por lo que no funcionaba correctamente. Para solucionarlo simplemente bastaba con elaborar de nuevo la mezcla del revelador con un químico más nuevo.

Otro problema, que podría darse es una mala colocación de la lámina de acetato en el photoplotter, provocando que salga el diseño cortado, o si ponemos el lado negro en la parte baja, que directamente no se produzca una correcta impresión.

4.3 Fabricación de resistencias en PCB

Una vez obtenidas las máscaras ya es posible la fabricación sobre el PCB, ya que estas son un paso clave para conseguir obtener el producto final. Para todo el proceso se recomienda utilizar guantes como protección y una bata de laboratorio (experiencia personal).

1. Para comenzar se utilizarán solamente los tubos fluorescentes amarillos, para evitar que la resina sufra cambios imprevistos. También se encenderán el extractor y la alineadora, para utilizarla posteriormente (necesita encenderse 15 min antes de usarse).
2. Ya con la placa de PCB en mano, el primer paso será eliminar la capa de resina negativa que viene de base. Para ello se utilizará acetona, que al verterse sobre la resina y dejarlo reposar unos

segundos comenzará a deshacerla. Este paso se repetirá hasta eliminar toda la resina, y si se requiere podemos ayudarnos con una servilleta para rascar cualquier resto.

3. Se deja secar la acetona de la superficie. Para ello se puede simplemente dejar la placa secando a temperatura ambiente o colocarla sobre la placa térmica a unos 60°C para acelerar el proceso.
4. Una vez seca se utilizará una servilleta o gasa para eliminar cualquier residuo que se haya podido depositarse sobre la placa, como puede ser polvo o suciedad.
5. A continuación, se depositará la resina mediante espray. El procedimiento consiste en colocar la placa en un banco (altura cómoda) y comenzando desde una esquina superior, ir rociando la resina lentamente y en dirección horizontal, y al llegar al borde contrario, bajar y seguir rociando en el sentido contrario. Esto se repetirá hasta que toda la placa quede rellena, momento en el cual se cogerá la placa y se colocará verticalmente para que el exceso de resina se deposite en las zonas con menor espesor o se absorba por la base de papeles sobre la silla. Si al terminar se observan múltiples capas de resina o muchas partículas sobre esta, se recomienda empezar de nuevo, vertiendo acetona, pues estos defectos alterarán el resultado final.
6. El siguiente paso será dejar la resina calentándose durante 6 min a 70°C sobre la placa térmica, de forma que esta comience a solidificarse.

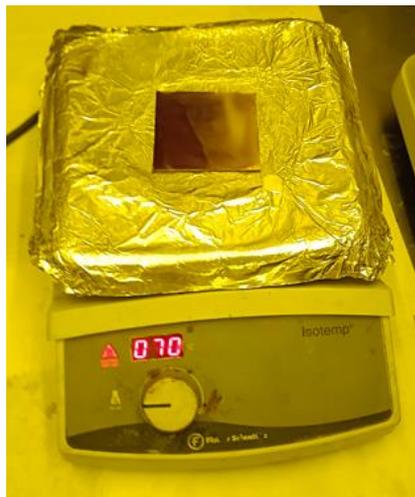


Figura 4.14 Placa térmica con PCB encima

7. Mientras la resina se calienta se puede ir preparando la bandeja y la mezcla de revelador de PCB si no se tiene ya. De nuevo esto se realizará junto al fregadero.
8. Tras terminar de calentarse y dejar que se enfríe durante un par de minutos, toca ir a la alineadora. En la alineadora se ha de colocar sobre el cristal la máscara que vamos a utilizar y, sobre el soporte, el PCB con la resina encima. A continuación, se baja la placa con la máscara sobre el soporte y se alinea el PCB con la máscara para que el circuito impreso quede en el interior. Una vez completado simplemente se aplica presión sobre el soporte y se desplaza la insoladora sobre la placa. Se realizarán cuatro emisiones de luz UV durante 20 s con descansos de 10 s entre ellos para evitar que la resina se sobrecaliente.



Figura 4.15 Placa con máscara y soporte con PCB

9. El siguiente paso será llevar el PCB después de la exposición al fregadero donde se sumergirá en una bandeja con el revelador de PCB vertido. Se mantendrá sumergido unos pocos segundos y luego se limpiará con agua. Esto se repite hasta poder observar claramente el circuito impreso sobre la resina.

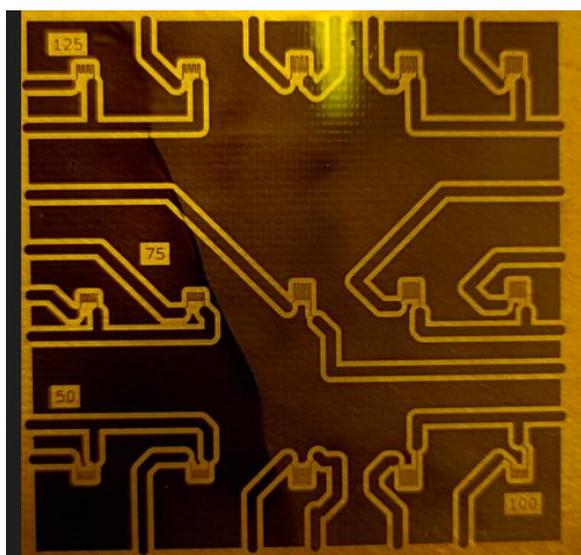


Figura 4.16 PCB revelada

10. Ahora se rellena una bandeja con una mezcla de agua fuerte, agua oxigenada y agua (la proporción se puede encontrar en *Equipamiento*). Esto permite obtener un ácido clorhídrico diluido, pero lo suficientemente fuerte para atacar el cobre de la placa no protegido. Este es un proceso crítico en el que hay que estar muy atento al ataque pues si se saca muy pronto no se habrá eliminado bien el cobre y habrá cortocircuitos entre las pistas, pero si se deja demasiado tiempo se puede producir “underetching”, que básicamente es la eliminación del cobre bajo la resina provocando que se rompan las pistas más finas. Se recomienda ir eliminando las burbujas que se vayan produciendo en la superficie para mejorar el ataque.
11. Una vez se considere que se ha completado el proceso de ataque podemos limpiar el PCB con agua y depositar la mezcla de ácido clorhídrico en un envase de residuos químicos.

12. Por último, la resina restante se elimina vertiendo acetona sobre la superficie y de esta forma se obtiene el resultado final.

4.3.1 Resultados

Como se han realizado dos máscaras hemos podido realizar dos circuitos integrados distintos. En el caso del tercer diseño las resistencias se pueden observar a simple vista, excepto quizás las de 50 μm .

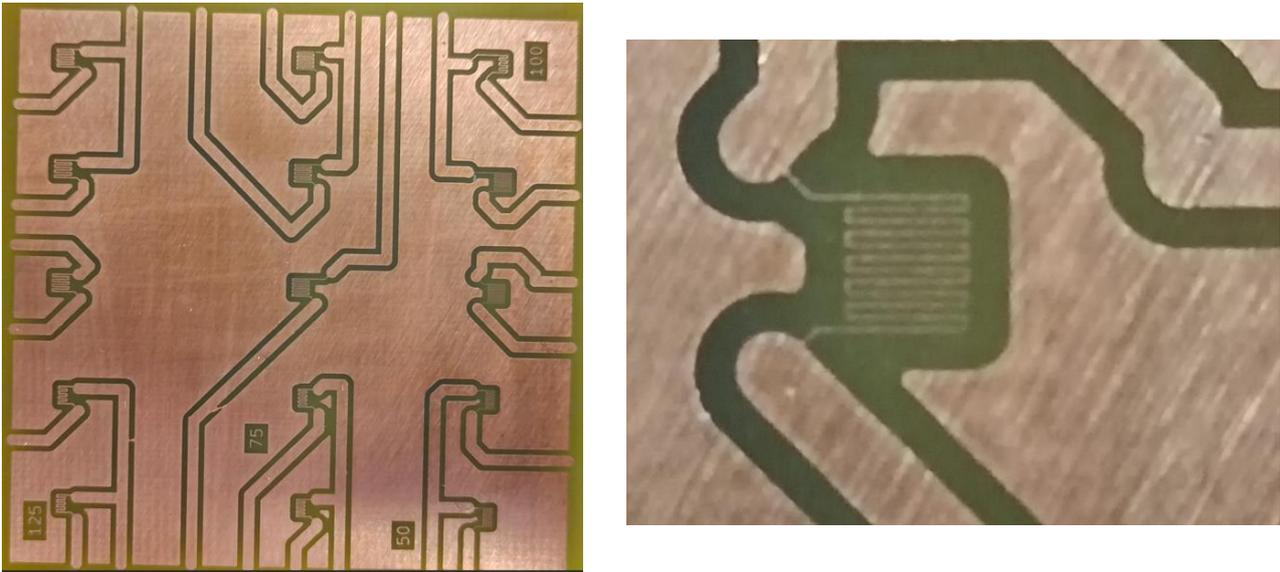


Figura 4.17 Tercer diseño de circuito impreso y resistencia de 50 μm de doble longitud

En el caso del circuito impreso del último diseño, dada la poca separación de las pistas y el gran número de ciclos de los serpentines, resulta casi imposible a simple vista comprobar si las resistencias han salido correctamente.

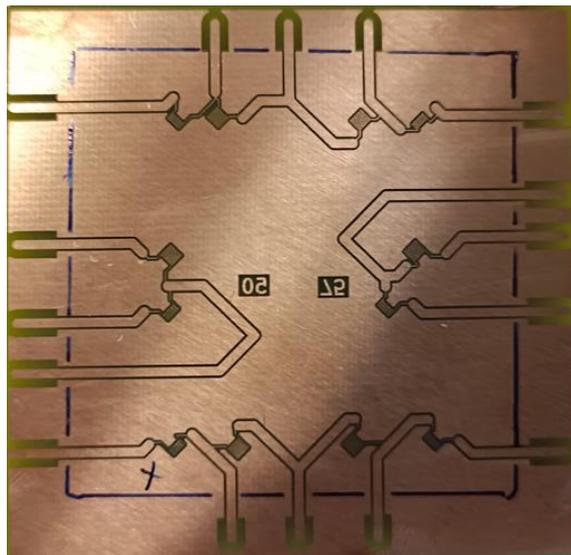


Figura 4.18 Último diseño del circuito impreso

Las resistencias, aunque al límite de la capacidad de diseño, en su mayoría han tenido un resultado positivo obteniéndose pistas bien definidas y con altos valores de resistencia.

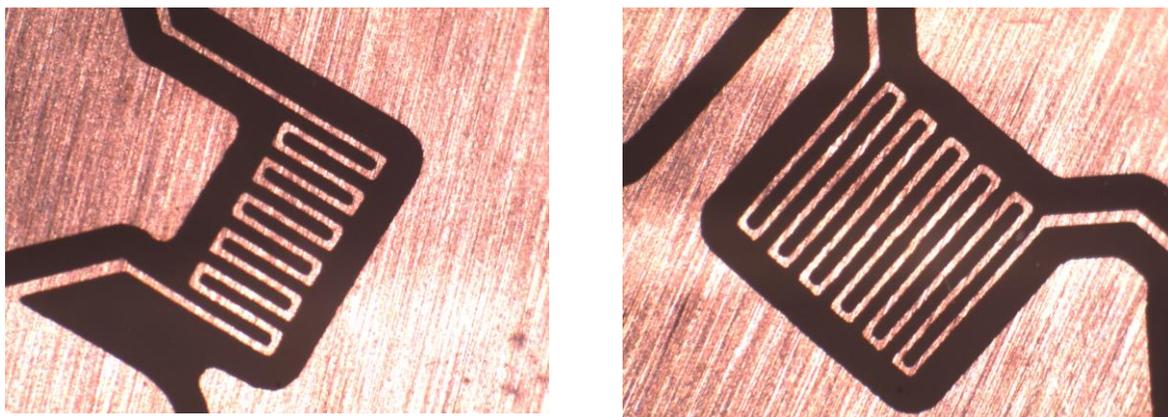


Figura 4.19 Resistencias de 75 μm

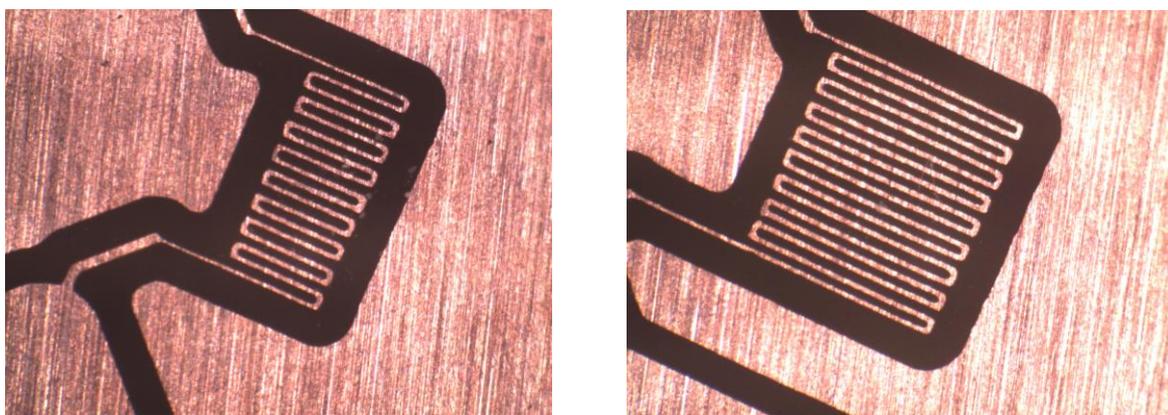


Figura 4.20 Resistencias de 50 μm

4.3.2 Problemas

En este último proceso de fabricación sí que han llegado a comprobarse mayor número de problemas. Uno de ellos sería la aparición de cortocircuitos entre las pistas de las resistencias debido a un tiempo de ataque insuficiente, o por partículas sobre la resina. También tenemos el caso contrario en el que una pista se ha cortado debido a un tiempo de ataque excesivo (aunque no dispongo imágenes de esto último). Una solución a estos dos problemas sería aumentar el espaciado entre pistas, para que al haber más espacio entre ellas haya menos posibilidades de cortocircuito y, al haber más área, tarde más tiempo en producir “underetching”.

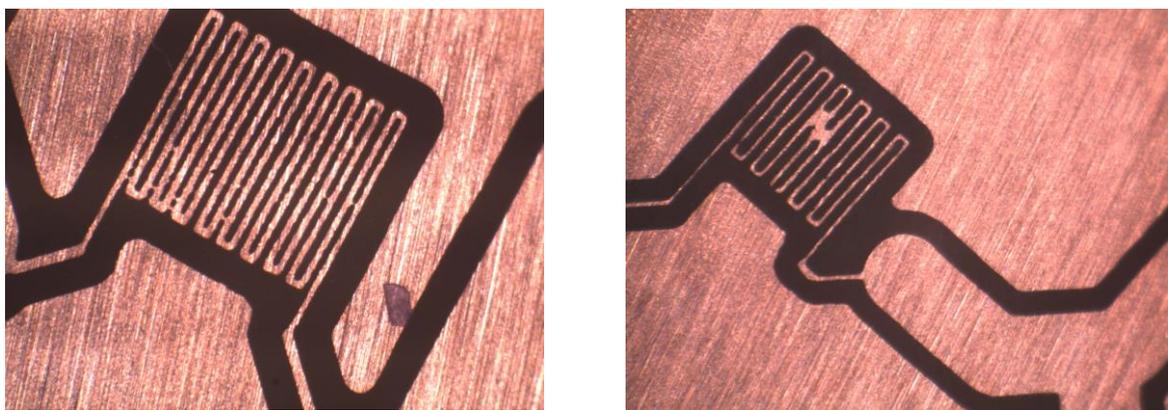


Figura 4.21 Cortocircuitos de pistas

También se han producido defectos debido a la no uniformidad de la capa de resina que producía líneas gruesas sobre el PCB, como se observa en la **Figura 4.16** o en la **Figura 4.22**. Esto es un problema que puede solucionarse cortando estas uniones, a no ser que pasen a través de una resistencia, en cuyo caso no hay solución posible. Para evitar este problema se intentará conseguir la mayor uniformidad posible en la capa de resina.

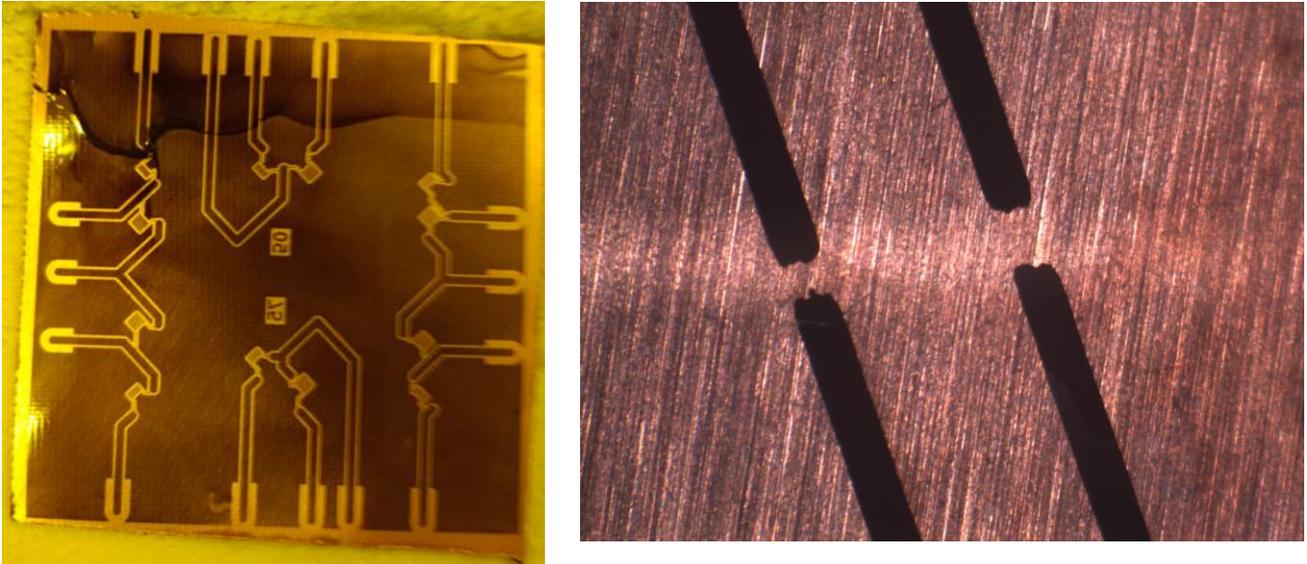


Figura 4.22 Problemas de uniformidad de la resina

Por último, un problema que he tenido personalmente es la agresividad del ácido clorhídrico sobre la ropa y piel (aunque en este caso solo una leve irritación). Por ello recomiendo encarecidamente el empleo de guantes y ropa de protección (a no ser que quieras tener que tirar toda la ropa a la basura).

5 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN

Este será el último capítulo de este trabajo y estará centrado en las pruebas de ignición realizadas en el laboratorio de la escuela. Se han realizado pruebas y apuntado los resultados de todos los diseños de resistencias fabricados y de los prototipos originales aportados. Para estas pruebas se han realizado diferentes montajes para simular un funcionamiento real del sistema y se han utilizado diversas herramientas para lograrlo.

A continuación, se comenzará citando las distintas herramientas utilizadas durante las pruebas para poder realizar los montajes y para poder obtener los resultados de experimentación.

5.1 Equipamiento

- Fuente de tensión



Figura 5.1 Fuente de tensión

Se tiene una fuente de tensión DC POWER SUPPLY IMHY3003D-3 que consiste en tres salidas de tensión, dos de ellas regulables entre 0 y 30 voltios y entre 0 y 3 amperios, con tres conexiones cada una (+, -, GND). La última solo tiene dos conexiones (+, -) y es fija a una tensión de 5 voltios, con un máximo de 3 amperios.

- Condensador



Figura 5.2 Condensador 22000 uF

El condensador que se ha utilizado en las pruebas es uno de 26000 uF con una tensión máxima de 35 V.

- **Osciloscopio**



Figura 5.3 Osciloscopio [21]

Para poder observar la forma de onda que se produce durante las descargas realizadas con el condensador, se hace necesario el uso de un osciloscopio que nos permite comprobar con gran precisión como se produce esta, en unos pocos instantes de tiempo.

- **Generador de señales**



Figura 5.4 Generador de señales [22]

Haciendo uso de un generador de señales es posible controlar la activación de los transistores npn utilizados para controlar el paso de corriente a través de la resistencia, de forma que sepamos también el tiempo requerido.

- **Cables de cobre de 1mm² de sección, bloque de conexiones, Protoboard y cables de alimentación con pinza**

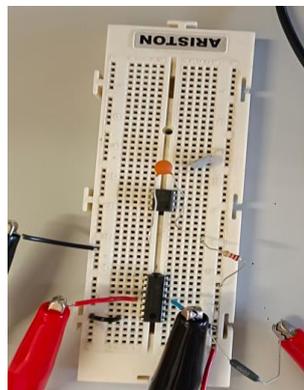


Figura 5.5 Protoboard con componentes y conexiones

Se han realizado las conexiones de los componentes integrables (transistores, resistencias) mediante estos

cables, soldándolos a los PADs de las resistencias, y en caso de requerir un montaje más avanzado se ha utilizado una protoboard donde se han ido colocando los componentes necesarios. Los cables se dejan libres por un lado para poder pinzarlos con los cables de alimentación.

- **Soldador y estaño**



Figura 5.6 Soldador e hilos de estaño

Se necesita un soldador para poder unir los cables a los PADs de conexión de las resistencias, haciendo una soldadura mediante estaño. De esta forma los cables quedan fijos a las conexiones y permiten el paso de corriente.

- **Multímetro**



Figura 5.7 Multímetro

Se hará uso de un multímetro para poder comprobar las tensiones y corrientes que pasan a través del sistema y de esta forma poder obtener con cierta precisión los valores para los que se consigue una ignición en el sistema. Junto a la fuente (muestra valores de tensión y corriente aportados) tiene gran importancia para la obtención de resultados.

- **Termómetro de termopar**

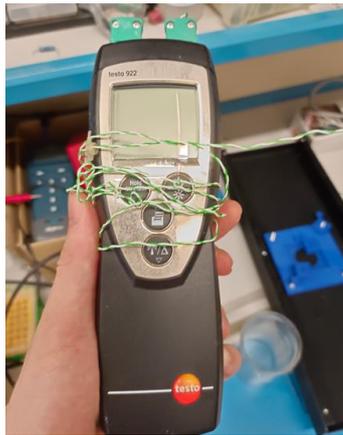


Figura 5.8 Termómetro de termopar

Con este instrumento se puede lograr medir la temperatura en la punta del cable del termopar con gran precisión. De esta forma, se puede colocar sobre la resistencia para medir la temperatura exacta que se alcanza en función de la corriente de paso. Lamentablemente, no se le puede dar uso para temperaturas muy altas porque dañan el termopar, así que solo se puede utilizar para comprobar que la resistencia funcione correctamente.

5.2 Montajes y metodología

En el siguiente apartado se va a desarrollar la metodología que se lleva a cabo para conseguir obtener resultados satisfactorios y fiables de la ignición. También, se van a mostrar y explicar los distintos montajes que se llevaron a cabo en el laboratorio para realizar las pruebas.

Se realizará un apartado para cada uno de los montajes y se explicará la metodología aplicada en cada uno de estos.

5.2.1 Montaje para el prototipo original con disparo en continua

Este fue la primera prueba realizada en los laboratorios y, en este caso, se contaba con el diseño original del micro propulsor, lo cual requería instalar el combustible en el interior del depósito, unir ambas caras del micro propulsor con una soldadura (este paso se podría saltar y simplemente realizar las pruebas añadiendo algo de peso sobre la pastilla para con seguir el mejor contacto) y, finalmente, soldar cables de cobre a los PADS de conexión de este. Con esto ya era posible hacer pruebas de ignición. Posteriormente, se añadió un bloque de conexión en el cual los micro propulsores se ajustaban perfectamente, lo cual permitía hacer las conexiones sin tener que estar soldando los cables a los PADS continuamente, teniendo ya unos cables soldados a la cara exterior del bloque.

Lo único que queda en el diseño es conectar el sistema a la fuente mediante cables de alimentación con pinzas que se fijan a los cables sueltos.

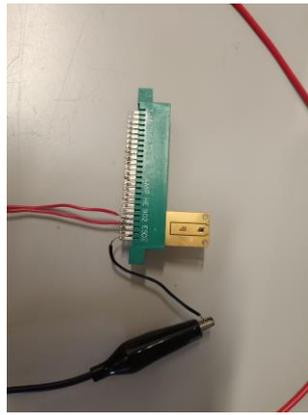


Figura 5.9 Prototipo dentro del bloque de conexiones

Para la metodología el procedimiento es relativamente sencillos. En este caso al ser alimentación en continua, conectamos directamente la fuente a la resistencia y comenzamos a subir la corriente de paso poco a poco, estando atentos al combustible (o al valor que marca el termómetro, si lo que se desea estudiar es la temperatura superficial que va alcanzando la resistencia). Se puede conectar el multímetro para poder medir los valores de tensión que se dan en la resistencia (la resistencia es similar en valor a la de los cables). Una vez el combustible entre en ignición, se fijará la corriente a este valor alcanzado y se quitará la alimentación (bajamos tensión a 0). Las siguientes pruebas consistirán en subir rápidamente la tensión, de forma que se alcance rápidamente la corriente anterior y se logra la ignición. Este valor de corriente se podrá ajustar levemente para lograr igniciones en menor tiempo o para evitar que la resistencia se rompa.

5.2.2 Montaje para el prototipo original con disparo usando un condensador

Esta prueba se planteó cuando comprobamos que las corrientes necesarias para lograr una ignición eran excesivamente altas y requerían demasiado tiempo para el disparo. Por ello, se consideró lograr la ignición con una rápida descarga del condensador que lograra el disparo en pocos instantes. El mayor problema de este diseño es que no es compatible con la red de conexionado mediante transistores (los destruye).

Para este montaje se requiere de un condensador de gran capacidad, de forma que se logren grandes descargas y duraderas (expresiones en 2.3.2), también se hará uso del bloque de conexiones utilizado en el montaje anterior, y, por último, se añadirá un interruptor manual entre el cable conectado a la resistencia y el positivo del condensador, de forma que una vez cargado solo haya que pulsar el interruptor para permitir la descarga. Adicionalmente, en algunas pruebas se han añadido resistencias para conseguir una descarga más prolongada.

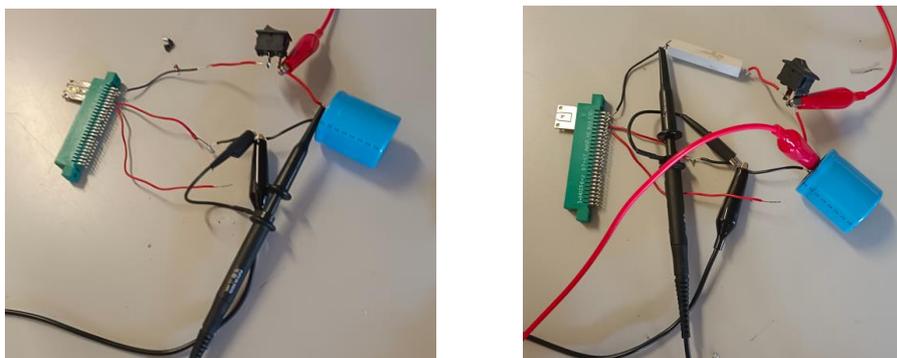


Figura 5.10 Descarga por condensador sin y con resistencia

La metodología en este caso tampoco es muy compleja. Se comienza fijando un micro propulsor al bloque de conexiones y conectando los cables de alimentación, importante recordar que el positivo de la fuente se conecta al positivo del condensador y el negativo de la fuente al negativo del condensador (el condensador puede explotar en caso de error), también, se puede conectar un multímetro, para medir la tensión del condensador, y un osciloscopio, para observar cómo queda la forma de onda de la descarga. El siguiente paso es alimentar el condensador hasta la tensión deseada y, una vez cargado el condensador, se apaga la fuente. Finalmente, solo queda pulsar el interruptor para provocar la descarga del condensador y que se caliente la resistencia. El procedimiento seguido fue ir subiendo poco a poco la tensión de alimentación del condensador e ir realizando descargas, para comprobar a partir de que valor se lograba conseguir una ignición.

5.2.3 Montaje para los diseños fabricados en laboratorio

Finalmente, cuando ya no quedaban micro propulsores para poder realizar más pruebas, se fabricaron PCBs con diversas resistencias impresas sobre estos, lo que permitía comprobar como respondían distintos diseños. Gracias al menor amperaje requerido en los disparos se pudo realizar pruebas con los transistores proporcionados originalmente.

Para este montaje, por tanto, se requiere de una PCB con resistencias impresas. Para el conexionado se tienen que estañar los PADS y soldar cables a estos, con lo cual ya sería posible realizar pruebas de ignición directamente utilizando la fuente. Sin embargo, para comprobar también la validez de los transistores adquiridos, se montó sobre una protoboard el diseño básico que viene en el inicio de este TFG (2). Se añadió por tanto un dispositivo ULN2003 y se cableó todo correctamente.

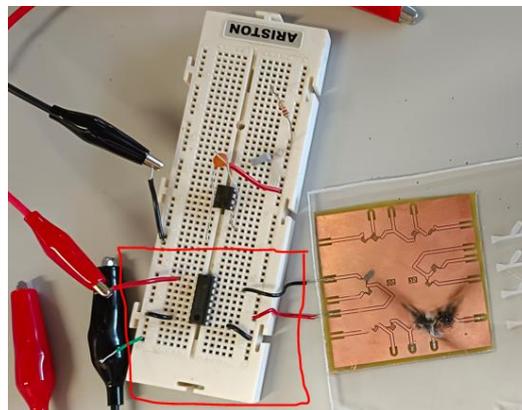


Figura 5.11 Placa PCB con transistor ULN2003

Como se ha expresado previamente, podemos aplicar el mismo procedimiento que en el primer montaje para las pruebas de disparo, pero si utilizamos el transistor este varía ligeramente. Primero, debemos conectar la alimentación a un lado de la resistencia y la tierra en el común del transistor, luego debemos conectar la salida de la resistencia a la entrada colector del transistor. Para el control de la puerta se utiliza un generador de señales que impondrá 5 V en la puerta durante un pulso de 500 ms. Finalmente, solo queda ajustar la alimentación de la resistencia, que para el primer disparo se puede actuar como en el primer diseño, subiendo poco a poco la corriente de paso y al lograr el disparo fijar el límite en esta.

5.3 Resultados

Este apartado estará centrado como su nombre indica en los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en los laboratorios con ambos combustibles, utilizando los diversos montajes expresados previamente. Será importante recalcar que este documento se centra en estudiar la corriente necesaria para producir la ignición y no en los resultados obtenidos de esta como pueden ser empuje o fuerza generada. El tiempo de disparo si que podría ser un detalle interesante para medir, pero lamentablemente no se contaba con el equipo necesario para obtener estos tiempos que en algunos casos eran menores al segundo.

También, se incluirán algunas imágenes mostrando el resultado final de la combustión y como queda la resistencia.

5.3.1 Prototipo en continua

Se da inicio entonces con las pruebas realizadas en los prototipos de micro propulsores con una alimentación en continua, haciendo uso de la fuente de tensión. Para comenzar se midió el valor de la resistencia integrada en el depósito mediante el multímetro, obteniéndose unos valores oscilantes entre 0.1 y 0.2 Ω . Este valor es mayor que el obtenido teóricamente de 0.063 Ω , pero esta diferencia se deberá principalmente a que los cables de conexión del multímetro tienen una resistencia interna de en torno al 0.1 Ω , provocando que no sea posible ver con exactitud el valor de la resistencia.

Para comenzar se llevaron a cabo algunas pruebas que consistían en comprobar que intensidad de corriente era necesaria para quemar la resistencia sin ningún combustible colocado sobre esta, obteniéndose un valor medio de 2.5 A.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las distintas pruebas. Como hemos dicho previamente estarán centradas en obtener los valores de corriente alcanzados. El número de pruebas realizado es mucho mayor considerando que tendríamos algo más de 50 resistencias en los micro propulsores, pero detallaré solamente las pruebas exitosas y más destacadas a lo largo del tiempo.

Para los disparos mayores de 3 A, se ha configurado la fuente para que funcione en paralelo, pudiendo aportar hasta 6 A en total.

Tabla 5.1 Datos obtenidos durante las pruebas en continua

Número de prueba	Corriente de disparo/fusión alcanzada	Detalles y explicaciones asociadas
1	2.7 A	Esta fue la primera prueba realizada en laboratorios, utilizando un combustible que ya tenía preparado el profesor Quero de una mezcla realizada previamente. La prueba se realizó colocando simplemente la pastilla sobre la resistencia y aplicando presión (al aire). Este combustible sería similar al combustible 1, aunque posiblemente variase en proporción. Se consigue un disparo, pero con tiempos mayores a los 10 segundos. Con amperajes mayores se logran disparos en menor tiempo.

2	2.8 A	Primera prueba realizada en un micro propulsor completo y sellado. Aumenta ligeramente la corriente de disparo y de la misma manera que en el interior caso se requiere de un largo tiempo para el disparo. Pruebas con mayor amperaje mejoran el tiempo.
3	2.8 A	Prueba realizada con combustible 1 al aire. Una vez agotadas las primeras pastillas de combustible se realiza más cantidad de estas, pero en esta ocasión la mezcla es exactamente el expresado como combustible 1. Se obtienen resultados similares en cuanto al amperaje, y con tiempos en torno a 3 o 4 s. $\uparrow A \rightarrow \downarrow t$
4	1.4 A	Prueba realizada con combustible 1 al aire. Para intentar mejorar la corriente requerida se planteó lijar la resistencia de forma que se redujera la sección de paso de esta y así lograr una mayor temperatura con una menor corriente. Aunque tuvo un resultado favorable, era un procedimiento muy inexacto que podía llevar a la destrucción de la resistencia. Se consiguió la ignición en unos 3 o 4 s.
5	2.6 A	Prueba realizada con combustible 1 al aire. Se intentó reducir el amperaje necesario probando algunas combinaciones de combustibles distintas, en este caso se usó una primera capa de pólvora sobre la resistencia y posteriormente se colocó la pastilla encima. Realmente, no se conseguía una gran mejora y se producían dos igniciones discontinuas que no favorecerían realmente el funcionamiento.
6	3 A	Prueba realizada con combustible 1 al aire. Siguiendo la misma ruta que la prueba anterior, se intentó combinar de nuevo la pastilla con pólvora, pero añadiendo un pegamento que asegurara el contacto de la resistencia con la pastilla y que mantuviera la resistencia unida, pese a las altas temperaturas. Lamentablemente, no tuvo un resultado muy positivo, aumentando el amperaje requerido y con tiempos largos de ignición.
7	3 A	Prueba realizada con combustible 1 sellado. De nuevo se produce un aumento del corriente debido posiblemente a la transmisión de calor con las paredes del micro propulsor. El tiempo en este caso fue de unos 2 o 3 s. Figura 5.12
8	3-3.3 A	Pruebas realizadas con combustible 2 al aire. En este momento se decidió modificar el combustible añadiendo a la mezcla una pequeña proporción de metales, de forma que se obtuviese una combustión más potente y fiable. En este momento se empezó a tener problemas para disparar las pastillas de combustible 1 (seguramente debido a la humedad), por lo que se modificó la mezcla. De nuevo las combustiones tardaban unos pocos segundos.

9	3.32-3.65 A	Pruebas realizadas con combustible 2 sellado. El amperaje de nuevo aumenta cuando tenemos la pastilla en el interior del depósito. Aunque, se obtienen amperajes más altos que para el primer combustible, la fiabilidad de estos es mayor consiguiendo mayor número de igniciones exitosas que en el caso anterior. La mayoría de las pruebas disparaban en menos de 2 s. Figura 5.13
10	4 A	Prueba realizada con combustible 2 sellado. Se observa un aumento considerable de la corriente de disparo, y es que estas pruebas se realizaron cuando las pastillas ya tenían unas pocas de semanas desde su producción, aumentando la humedad en estas. En este momento fue cuando nos planteamos el problema real de la humedad.
11	2.5-2.7 A	Prueba realizada con combustible 1 sellado. Se realizó de nuevo la mezcla 1 una vez se tuvo en cuenta el problema de la humedad. Se conseguían disparos fiables, pero solamente cuando se había introducido el combustible en forma de pastillas una vez madurado, y no cuando se había dejado madurar estas en el interior del depósito, en cuyo caso el material no combustionaba antes de romperse la resistencia. De nuevo igniciones en pocos segundos. Figura 5.15
12	3.8 A	Se realizó también algunas pruebas con micro propulsores en los que se había realizado un wire bonding (2.2.2), utilizando ambos combustibles. En este caso el hilo se rompía antes de lograr la ignición, posiblemente debido al hecho de que la superficie de contacto era muy pequeña. FRACASO
13	3 A	Prueba realizada con combustible 1 sellado y que llevaba varios días en el armario. Se observa aquí el problema que provoca la humedad en la temperatura de ignición, aumentándola y provocando que se requieran mayores corrientes y tiempos para lograr la ignición del combustible.
14	3 A	Prueba realizada con combustible 2 al aire. Para intentar alterar la temperatura de combustión se roció un poco de azufre sobre la pastilla, logrando reducir el tiempo de disparo en menos de 1 s. Se intentó realizar una mezcla del combustible 2 con algo de azufre, pero esta no conseguía madurar quedando en un estado semilíquido y, por tanto, inutilizable.

Finalmente, se decidió de cara a los resultados obtenidos que el combustible 2 tenía mayor viabilidad que el primero, principalmente debido a que era más fiable que el otro, puesto que tenía mayor número de disparos exitosos y a que se deterioraba más lentamente que el combustible 1. A todo esto se le sumaba que tenía mayor fuerza de empuje que el primero, aunque esto no sea el objetivo de este TFG.

A continuación, se muestran imágenes de los resultados de algunas de las pruebas realizadas.

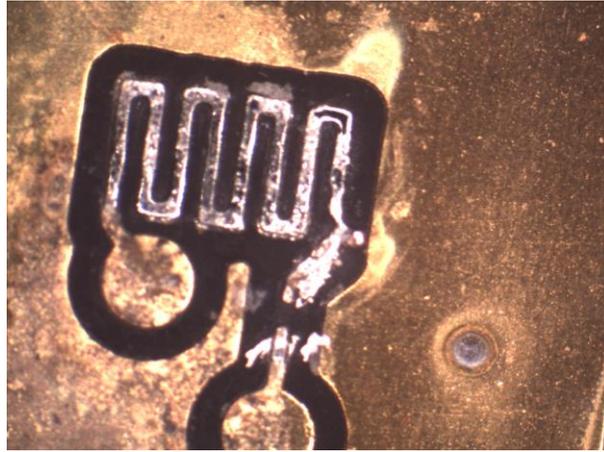


Figura 5.12 Disparo fallido de combustible 1



Figura 5.13 Ambas caras de un disparo exitoso con combustible 2



Figura 5.14 Disparos exitosos, pero con un sellado deficiente o tobera bloqueada que rompió los depósitos



Figura 5.15 Resultado de la combustión de la prueba 11 al madurar en depósito

5.3.2 Prototipo con condensador

Debido a los altos valores de corriente requeridos y a los largos tiempos de ignición, se consideró utilizar la descarga de un condensador para de esta manera lograr una ignición muy rápida mediante un procedimiento tan sencillo, como es la carga y descarga de un condensador. Con este procedimiento, también, se logró obtener el valor real de la resistencia al comprobar la forma de onda que tenía la descarga y aplicando la siguiente expresión:

$$\tau = R * C \quad (5.1)$$

Sabiendo el valor del condensador y que tau (τ) es igual al instante de tiempo en el que la curva vale (0.63-1) por la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la tensión. Se consigue obtener un valor de tau de unos 0.0016 s y, por tanto, un valor de la resistencia de unos 0.062 Ω , que es muy cercano al valor real (esto son estimaciones a partir de los datos obtenidos en el osciloscopio).



Figura 5.16 Descarga del condensador con 2 V

A continuación, se muestra una tabla con los resultados más significativos de las diversas pruebas realizadas en los laboratorios con un condensador de 26000 μF . Todas las pruebas con condensador se realizaron con las pastillas de combustibles colocadas sobre la resistencia, no dentro del depósito.

Tabla 5.2 Datos obtenidos durante las pruebas con condensador

Número de prueba	Tensión requerida para disparo	Detalles y explicaciones asociadas
1	30 V	Esta fue una primera prueba realizada con la primera producción de pastillas proporcionada, utilizando el condensador integrado en la fuente. Para esto se le quitan los límites de corriente y tensión a la fuente (girar al máximo la rueda de límite), y una vez montado todo se conecta rápidamente el cable de alimentación a la fuente produciendo una descarga que produce la ignición.
2	5-6 V	Prueba realizada con el combustible 1. Se intenta fabricar un sistema de ignición por condensador, y se realiza el montaje visto con anterioridad. Para disparar se va subiendo la tensión de voltio en voltio hasta alcanzar el valor necesario. En este caso la resistencia funde sin disparar, por tanto, FRACASO. Figura 5.17
3	18 V	Prueba realizada con el combustible 1. Para intentar mejorar el funcionamiento se añade una resistencia de 1 Ω en la entrada, para reducir la corriente máxima y aumentar el tiempo de descarga del condensador, y así conseguir ignición. De nuevo la resistencia funde sin ignición. FRACASO.
4	21 V	Prueba realizada con el combustible 2. Se intenta el mismo montaje que en el caso anterior, pero utilizando la nueva mezcla de combustible, para comprobar si con esta es viable el método. De nuevo no hay ignición. FRACASO.
5	5 V	Prueba realizada con el combustible 2. La última prueba realizada con condensadores es intentar un disparo con la nueva mezcla, pero deshaciéndonos de la resistencia en serie de 1 Ω . De nuevo no se logra ninguna mejora fundiéndose la resistencia sin lograr la ignición. FRACASO. Figura 5.18

Los resultados de estas pruebas demuestran que las simulaciones, pese a contar con errores de cálculo en la simulación, estaban en lo cierto en lo que respecta a la transmisión de calor de la resistencia al combustible, y es que parece ser que la resistencia sufre un calentamiento demasiado rápido que la lleva a destruirse sin llegar a poder transmitir este calor al combustible.

En lo que respecta a la primera prueba, este éxito puede deberse posiblemente a que la fuente nunca llega a dar más del amperaje máximo para la que está diseñada, a diferencia de un condensador que si poder dar muchos más. De esta manera al conectar el cable de alimentación solo pasan 3 A en continua, que en unos pocos instantes logran calentar lo suficiente para disparar. Otra posibilidad, es que el condensador interno de la fuente sea de una capacidad mucho menor, por lo que no lograr destruir la resistencia y lo que activa

la ignición es la corriente en continua que le sigue a la descarga.

A continuación, algunas imágenes mostrando los resultados obtenidos de varias de estas pruebas.



Figura 5.17 Formas de onda de las tensiones del condensador y la resistencia antes de rotura de esta última (4 V) en prueba 2

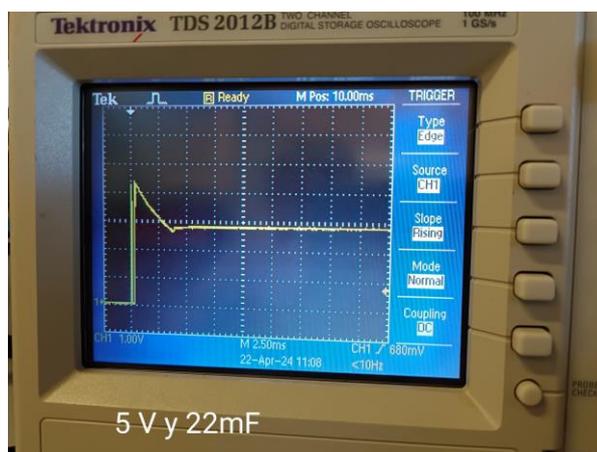


Figura 5.18 Prueba 5. Forma de onda de la tensión a la entrada de la resistencia al fundirse



Figura 5.19 Aspecto de las resistencias al fundirse por descarga del condensador

Hay que destacar que en su mayoría las resistencias suelen romper por los laterales, es decir, por la entrada/salida de la resistencia, manteniendo el centro relativamente completo, aunque con aspecto de haberse fundido parcialmente.

5.3.3 Diseños fabricados en laboratorio

Por último, solo quedan por mostrar los resultados obtenidos de las resistencias impresas en placas de PCB. En específico se elaboraron tres placas para las pruebas, aunque realmente solo se considerarán en este documento las dos últimas realizadas, que en principio constituyen el diseño final de las resistencias.

Como se ha podido ver en el capítulo 4, se han elaborado varias resistencias diferentes para de esta manera comprobar cómo se modifica la corriente necesaria en cada caso. Se debe tener en cuenta que estas placas se realizan manualmente y por tanto pueden contener fallos, por ello puede que resistencias supuestamente idénticas puedan tener distinto valor (cortocircuitos y roturas).

Para estas pruebas se realizó sobre un panel de metacrilato un modelo con diversos depósitos, que simularían el diseño final del micro propulsor, y se introdujeron pastillas del combustible 2.

Tabla 5.3 Corrientes para ignición del PCB

Pruebas en primera placa PCB				
Resistencias	1	2	3	Corriente
R75 L1	0,8	1,1	-	A
R75 L2	0,8	0,9	-	A
R50 L1	0,6	0,8	0,5	A
R50 L2	0,4	-	-	A

Los huecos de la **Tabla 5.3** ocupados por un – quieren decir que la resistencia estaba dañada o cortocircuitada, de forma que no se podía probar su funcionamiento.

Para comprobar la fiabilidad de la fabricación se hizo una medida de todas las resistencias de la segunda placa, de forma que podamos ver un valor medio de la resistencia en caso de estar correctamente impresa.

Tabla 5.4 Valores de resistencias del PCB

Valores de resistencia de la segunda placa PCB				
Resistencias	1	2	3	Resistencia
R75 L1	0,5	0,6	0,6	Ω
R75 L2	0,9	0,8	0,9	Ω
R50 L1	1	0,5	0,9	Ω
R50 L2	1,6	0,7	1,5	Ω

Con la **Tabla 5.4** se pueden comprobar que valores se desvían más del conjunto, quedando claro que en estos la resistencia no se imprimió bien, posiblemente teniendo cortocircuitos entre las pistas de esta.

El siguiente paso fue comprobar el funcionamiento de los transistores encapsulados en el dispositivo ULN2003, observándose que un solo transistor era capaz de soportar hasta 0.9 A durante bastante tiempo, tal como se observaba en la simulación del apartado 2.3.1.1. Aun así, se desaconseja trabajar en estas condiciones pues se supera con creces el límite impuesto por el fabricante, pudiendo producirse resultados inesperados. También, se realizó una prueba con dos transistores en paralelo llegando a pasar hasta 1.8 A, pero en este caso la carcasa del componente estalló, posiblemente por sobrecalentamiento de los componentes.

Para finalizar, se quiso combinar el sistema de disparo mediante transistor junto a las placas de PCB fabricadas, para comprobar si era posible el disparo de las pastillas utilizando estos transistores. De esta forma se llevó a cabo el montaje visto en la **Figura 5.11** y se obtuvieron los siguientes resultados. A tener en cuenta que estas pruebas se realizaron utilizando un único transistor del encapsulado ULN2003.

Tabla 5.5 Pruebas de disparo con dispositivo ULN2003

Pruebas de disparo			
R50 L1	0,85	0,9	A
R50 L2	0,7	0,65	A

Al comprobar estos resultados podemos declarar que, si se fabrican resistencias con las mismas características que las expresadas en este TFG, es de hecho factible la elaboración de una red de conexionado como la vista en la **Figura 2.19** para el disparo individual de cada micro propulsor, haciendo uso del encapsulado ULN2003. Aunque se debe tener en cuenta que superamos ampliamente la corriente máxima propuesta por el fabricante, por lo que se recomienda emplear en paralelo dos transistores del encapsulado para de esta manera reducir el esfuerzo que sufre cada uno individualmente.

A continuación, algunas imágenes de las pruebas realizadas.



Figura 5.20 Resultados de las combustiones sobre la placa PCB

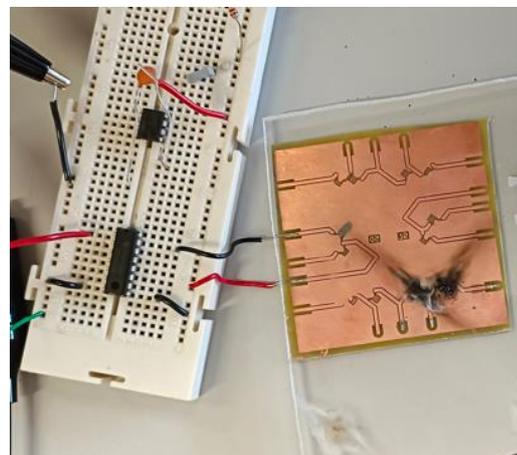
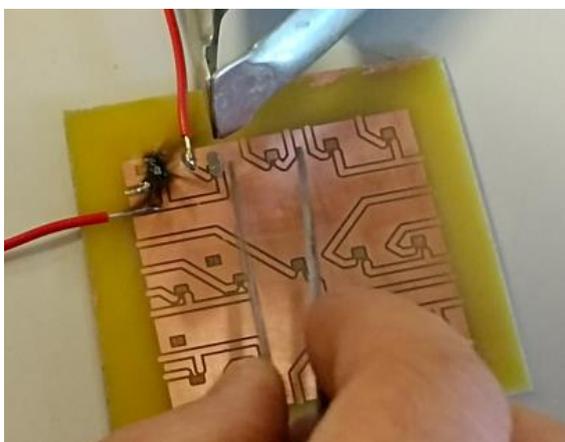


Figura 5.21 Colocación de las pastillas y pruebas de disparo

5.4 Conclusión

Los resultados observados durante la fase de experimentación han ayudado a confirmar las hipótesis inicialmente planteadas y, también, a confirmar la validez de las simulaciones realizadas en COMSOL, aunque se ha de decir que difieren ligeramente en lo referido al calentamiento real de la resistencia y la pastilla, requiriendo relativamente menos intensidad de corriente en realidad (posiblemente se deba a no tener conocimiento de las propiedades reales de los combustibles). Se asegura la viabilidad de un sistema integrado para el disparo del conjunto de los micro propulsores, sin necesidad de grandes componentes ni de gran cantidad de estos, haciendo uso de una red de conexión controlado mediante transistores encapsulados en el componente ULN2003. Se ha logrado también, al modificar el diseño de las resistencias, reducir el amperaje requerido para lograr la ignición de las pastillas de combustible de tal manera que pueda ser instalado en un satélite sin exigir un gran consumo, y aumentando el rango que podemos aumentar la corriente para lograr una reducción en el tiempo de disparo, que pueda ser vital a la hora del funcionamiento. Por último, las pruebas en el laboratorio demostraron lo que ya se observaba en las simulaciones, y es que resulta muy complejo lograr una ignición empleando un condensador de 26000 uF, y solo sería posible ajustando de forma precisa los valores de tensión y capacidad del sistema de disparo.

5.5 Mejoras y trabajo a futuro

A partir de lo desarrollado en este TFG hay múltiples vías de mejora. De primeras tenemos la posibilidad de centrarnos en el estudio de un sistema de disparo con el condensador, ajustando de forma precisa los valores de tensión y capacidad, o en su defecto, diseñando la resistencia de tal forma que facilite el disparo por electro-explosión (modificando su forma y/o material de diseño). Otra ruta de desarrollo es encontrar un transistor tipo pnp que cumpla las especificaciones requeridas, de tal forma que con muy pocos componentes logremos desarrollar una matriz de micro propulsores, y de esta manera, a partir de un único microcontrolador, poder activar los transistores requeridos de forma sencilla. Por último, también estaría el punto de lograr una forma de producir en masa las resistencias elaboradas en los laboratorios, pues tienen un proceso algo largo y tedioso, con fiabilidad indefinida.

Luego, a partir de las resistencias fabricadas y de lo que ya tenemos, también podemos realizar diversas pruebas. Entre ellas estaría el probar la ignición en condiciones de vacío, haciendo uso de una campana, y comprobar si es viable la ignición en temperaturas bajo cero. Ambas son condiciones que deberá enfrentar el micro propulsor una vez esté en el espacio. También, se pueden realizar más pruebas con distintas proporciones de combustible o probando directamente con combustibles sólidos nuevos, para comprobar si tienen mejor funcionamiento (temperatura, empuje ...) y si tienen menor deterioro a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS

- [1] M. N. Sweeting, "Modern Small Satellites-Changing the Economics of Space," in Proceedings of the IEEE, vol. 106, no. 3, pp. 343-361, March 2018, doi: 10.1109/JPROC.2018.2806218.
- [2] Colaboradores de Wikipedia. (2024a, enero 18). Satélite pequeño. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Sat%C3%A9lite_peque%C3%B1o
- [3] Colaboradores de Wikipedia. (2024, 27 junio). Satélite artificial. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Sat%C3%A9lite_artificial
- [4] Liu, B., Li, X., Yang, J., & Gao, G. (2019). Recent Advances in MEMS-Based Microthrusters. *Micromachines*, 10(12), 818. <https://doi.org/10.3390/mi10120818>
- [5] Jianbing Xu, Jiangtao Zhang, Fuwei Li, Shiyi Liu, Yinghua Ye, Ruiqi Shen, "A review on solid propellant micro-thruster array based on MEMS technology", *FirePhysChem*, Volume 4, Issue 2, 2024, Pages 95-106, ISSN 2667-1344.
- [6] Bernigaud, P., Davidenko, D., & Catoire, L. (2023). A revised model of ammonium perchlorate combustion with detailed kinetics. *Combustion And Flame*, 255, 112891. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112891>
- [7] Perclorato de Amonio – (Consultar precio) – Sanafria Industries. (s. f.). <https://sanafriaindustries.com/producto/perclorato-de-amonio-consultar-precio/>
- [8] Team, E. (2023, 9 mayo). Introduction to poly-di-methyl-siloxane (PDMS) - Elveflow. Elveflow. <https://www.elflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/the-poly-di-methyl-siloxane-pdms-and-microfluidics/>
- [9] Chem. Rev. 1969, 69, 4, 551–590, Publication Date: August 1, 1969 <https://doi.org/10.1021/cr60260a005>
- [10] Muñoz, C. L., Cascales, J. R. G., Velasco, F. J. S., Serna, J., Belchí, A. L., Martínez, R. A. O., Rey, F., Laso, A., Mur, R., & Moratilla, D. (2017). Caracterización de la combustión de propulsantes sólidos. *Digitum*. <http://hdl.handle.net/10201/90700>
- [11] K Kishore, K Sridhara, Dr APJ ABDUL KALAM, 1999, SOLID PROPELLANT CHEMISTRY Condensed Phase Behaviour of Ammonium Perchlorate-Based Solid Propellants. DEFENCE RESEARCH & DEVELOPMENT ORGANISATION MINISTRY OF DEFENCE
- [12] Jianbing Xu, Jiangtao Zhang, Fuwei Li, Shiyi Liu, Yinghua Ye, Ruiqi Shen, "A review on solid propellant micro-thruster array based on MEMS technology", *FirePhysChem*, Volume 4, Issue 2, 2024, Pages 95-106, ISSN 2667-1344.
- [13] SCIELO - Scientific Electronic Library Online. (s. f.). <https://www.scielo.org.mx/scielo.php> (FUENTE BORRADA)
- [14] Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The art of electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- [15] Texas instrument, December 1976, revised June 2024. ULN200x, ULQ200x High-Voltage, High-Current Darlington Transistor Arrays.
- [16] González, M. L. (2018). LTSpice. <https://doi.org/10.35537/10915/69818>
- [17] Shukla, H., & Velidi, G. (2024). Energetic material characterization and ignition study of MEMS based micro-thruster for multi spacecrafts missions. *FirePhysChem*, 4(2), 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2023.08.001>

- [18] For LTspice users. Libraries of models, examples, etc. (s. f.). <http://bordodynov.ltwiki.org/>
- [19] COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. (s. f.). COMSOL. <https://www.comsol.com/>
- [20] KiCad EDA. (s. f.). KICAd EDA. KiCad Website. <https://www.kicad.org/>
- [21] China Oscilloscopes Manufacturer, multimeters, spectrometers supplier - Shen Zhen Sweet Ocean Technology Limited. (s. f.). <https://www.made-in-china.com/showroom/sales-sweetocean/>
- [22] Generador de forma de onda arbitrario RS PRO SDG1062X → 60MHZ | RS. (s. f.). <https://es.rs-online.com/web/p/generadores-de-formas-de-onda/1882474>

