

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de  
Telecomunicación

Diseño y Fabricación de Bomba Peristáltica  
Basada en Motores Paso a Paso

Autor: Claudio López García

Tutores: Carmen Aracil Fernández

Francisco Perdigones Sánchez

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

Sevilla, 2015





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

# **Diseño y Fabricación de Bomba Peristáltica Basada en Motores Paso a Paso**

Autor:

Claudio López García

Tutores:

Carmen Aracil Fernández

Profesora contratada

Francisco Perdigones Sánchez

Profesor contratado

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

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado: Diseño y Fabricación de Bomba Peristáltica Basada en  
Motores Paso a Paso

Autor: Claudio López García

Tutores: Carmen Aracil Fernández

Francisco Perdigones Sánchez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal



# Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>               | <b>1</b>  |
| 1.1. Objetivos del proyecto .....                   | 4         |
| 1.2. Estado del arte .....                          | 5         |
| 1.2.1. Tipos de bombas.....                         | 5         |
| 1.2.2. Microbombas .....                            | 10        |
| 1.2.3. Microbombas peristálticas .....              | 12        |
| <b>Capítulo 2. Diseño .....</b>                     | <b>13</b> |
| 2.1. Microfluídico.....                             | 13        |
| 2.1.1. Materiales empleados .....                   | 14        |
| 2.1.2. Estructura.....                              | 16        |
| 2.1.3. Actuación sobre la estructura .....          | 17        |
| 2.2. Electrónico.....                               | 18        |
| 2.2.1. Hardware.....                                | 19        |
| 2.2.1.1. Regulador de tensión.....                  | 19        |
| 2.2.1.2. Microcontrolador .....                     | 19        |
| 2.2.1.3. Puente en H.....                           | 20        |
| 2.2.1.4. Motores paso a paso.....                   | 22        |
| 2.2.1.5. Circuito combinacional .....               | 25        |
| <b>Capítulo 3. Fabricación.....</b>                 | <b>31</b> |
| 3.1. Fabricación electrónica .....                  | 31        |
| 3.1.1. Esquemático .....                            | 31        |
| 3.1.2. Layout .....                                 | 35        |
| 3.1.3. Construcción PCB.....                        | 37        |
| 3.1.4. Conectores de los motores paso a paso .....  | 39        |
| 3.1.5. Resultado final de la parte electrónica..... | 40        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2. Fabricación microfluídica.....                   | 41        |
| 3.2.1. Fabricación máscara.....                       | 42        |
| 3.2.2. Fabricación molde.....                         | 44        |
| 3.2.3. Fabricación PDMS.....                          | 45        |
| 3.3. Montaje completo.....                            | 47        |
| <b>Capítulo 4. Pruebas de funcionamiento .....</b>    | <b>51</b> |
| 4.1. Montaje experimental y procedimiento.....        | 51        |
| 4.2. Caracterización.....                             | 54        |
| 4.2.1. Introducción.....                              | 54        |
| 4.2.2. Curva de funcionamiento.....                   | 55        |
| <b>Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro.....</b> | <b>57</b> |
| 5.1. Conclusiones.....                                | 57        |
| 5.1.1. Aplicaciones al sistema de tres motores.....   | 57        |
| 5.1.2. Aplicaciones.....                              | 57        |
| 5.2. Trabajos futuros.....                            | 58        |
| <b>Bibliografía.....</b>                              | <b>59</b> |
| <b>Anexo I. Código fuente .....</b>                   | <b>61</b> |
| <b>Anexo II. Plano pieza 3D .....</b>                 | <b>69</b> |

# Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1.1. DISPOSITIVO MICROFLUÍDICO.....   | 1  |
| FIGURA 1.2. CORTE ESQUEMÁTICO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA. 1A CARCASA, 1B CUERPO DE BOMBA,<br>2 SOPORTE DE COJINETES, 3 TAPA DE DEPRESIÓN, 4 APERTURA DEL EJE, 5 CIERRE DEL EJE, 6<br>EJE..... | 5  |
| FIGURA 1.3. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE PALETA, DONDE SE VE LA PROGRESIÓN<br>DEL FLUIDO A LO LARGO DE LA BOMBA. ....   | 6  |
| FIGURA 1.4. ASPECTO DEL MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA PERISTÁLTICA LINEAL. ....   | 8  |
| FIGURA 1.5. FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA PERISTÁLTICA. ....   | 8  |
| FIGURA 1.6. BOMBA DE JERINGA.....  | 9  |
| FIGURA 1.7. MOVIMIENTO DEL FLUIDO EN UNA BOMBA DE UNA BOMBA DE MEMBRANA. ....  | 10 |
| FIGURA 2.1. DISEÑO DEL DISPOSITIVO MICROFLUÍDICO. ....   | 16 |
| FIGURA 2.2.PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO. ....   | 17 |
| FIGURA 2.3.DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA. ....   | 18 |
| FIGURA 2.4.PLACA DE DESARROLLO, O LAUNCHPAD, DEL MICROCONTROLADOR MSP430. ....   | 20 |
| FIGURA 2.5. ESTRUCTURA PUENTE EN H.....  | 21 |
| FIGURA 2.6. INTEGRADO L293B. ....  | 21 |
| FIGURA 2.7. MOTOR PASO A PASO UNIPOLAR. ....   | 23 |
| FIGURA 2.8. MOTOR PASO A PASO BIPOLAR. ....  | 23 |
| FIGURA 2.9. MOTORES PASO A PASO UTILIZADOS. ....   | 24 |
| FIGURA 2.10.DIAGRAMA DE FLUJO AL INICIO DEL SISTEMA.....   | 26 |
| FIGURA 2.11. DIAGRAMA DE FLUJO MODO DE CALIBRACIÓN.....  | 27 |
| FIGURA 2.12. DIAGRAMA DE FLUJO MODO AUTOMÁTICO. ....   | 28 |
| FIGURA 3.1. ESQUEMÁTICO DEL BLOQUE DE ALIMENTACIÓN DEL PCB. ....   | 31 |
| FIGURA 3.2. ESQUEMÁTICO DEL BLOQUE DEL MICROCONTROLADOR.....   | 32 |
| FIGURA 3.3. ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE MODO. ....  | 34 |
| FIGURA 3.4. ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO CONTROLADOR DEL MOTOR. ....   | 35 |
| FIGURA 3.5. RUTADO COMPLETO DE LA PLACA PCB. ....  | 37 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 3.6. MÁSCARAS CARA SUPERIOR E INFERIOR.....   | 37 |
| FIGURA 3.7. MÁSCARAS CARA SUPERIOR E INFERIOR.....   | 39 |
| FIGURA 3.8. ESQUEMÁTICO PARA EL CONECTOR DEL MOTOR. ....   | 39 |
| FIGURA 3.9. MÁSCARA PARA EL CONECTOR DEL MOTOR. ....   | 39 |
| FIGURA 3.10. RESULTADO FINAL DEL CONECTOR.....   | 40 |
| FIGURA 3.11. PLACA PCB TERMINADA. ....   | 41 |
| FIGURA 3.12. COMPONENTES PRINCIPALES DE LA PLACA PCB.....  | 41 |
| FIGURA 3.13. DISEÑO DE LA MÁSCARA MEDIANTE EL SOFTWARE L-EDIT. ....                                      | 42 |
| FIGURA 3.14. RESULTADO DE FABRICACIÓN DE LA MÁSCARA.....   | 43 |
| FIGURA 3.15. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MONTAJE COMPLETO: COLOCACIÓN DE LAS VARILLAS<br>ROSCADAS.....       | 48 |
| FIGURA 3.16. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MONTAJE COMPLETO: COLOCACIÓN PLACA INFERIOR DE<br>METACRILATO. .... | 48 |
| FIGURA 3.17. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MONTAJE COMPLETO: RESULTADO FINAL.....                              | 49 |
| FIGURA 3.18. MONTAJE COMPLETO. VISTA SUPERIOR. ....  | 49 |
| FIGURA 3.19. MONTAJE COMPLETO. VISTA FRONTAL.....  | 50 |
| FIGURA 4.1. ALINEACIÓN MOTORES PASO A PASO.....  | 52 |
| FIGURA 4.2. COMPROBACIÓN DE FUNCIONAMIENTO.....  | 54 |
| FIGURA 4.3. CAUDAL DE LA MICROBOMBA FRENTE A LA FRECUENCIA. ....   | 55 |

# Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| TABLA 2.1. SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES PASO A PASO..... | 24 |
| TABLA 2.2.MODOS DE FUNCIONAMIENTO.....                                 | 26 |
| TABLA 2.3. FUNCIONAMIENTO DE LOS LEDS.....                             | 29 |
| TABLA 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA. ....                           | 55 |



# Capítulo 1. Introducción

El estudio de los microfluidos es una ciencia y tecnología en la que se procesan o manipulan pequeñas cantidades de fluidos que van desde los microlitros, los nanolitros y hasta los picolitros (es decir cantidades menores a  $10^{-6}$  litros), usando canales con dimensiones de decenas a cientos de micrómetros. La primera aplicación de la tecnología de los microfluidos fue el análisis, para lo cual ofreció un gran número de útiles capacidades como la de emplear pequeñas cantidades de muestras o reactivos, la de llevar a cabo la separación y detección con una alta resolución y sensibilidad, bajo costo y pequeños tiempos para el análisis. Los microfluidos tienden a tener un comportamiento de flujo laminar y ofrecen la capacidad de controlar la concentración de las moléculas en el espacio y el tiempo. Como tecnología los microfluidos ofrecen muchas ventajas y pocas desventajas sin embargo aún no se convierten en una tecnología ampliamente utilizada. La microfluídica aplicada a equipos comenzó a desarrollarse desde hace 20 años principalmente en la manufactura de impresoras de inyección de tinta, las cuales poseen pequeños tubos que contienen tinta para impresión, los cuales pueden combinarse y aislarse de otros para cambiar el tono de los colores



Figura 1.1. Dispositivo microfluídico.

El estudio de los microfluidos es un campo multidisciplinar que comprende partes de la Física, la Química, la Ingeniería, la Biotecnología, la industria médica y las MEMS. Estudia el comportamiento de los fluidos en la microescala y la mesoescala, comprendiendo el diseño de sistemas en los que diminutas cantidades de fluido serán

utilizadas. El comportamiento de los fluidos en la microescala difiere sustancialmente de lo observado en la macroescala. La tensión superficial y la viscosidad son dominantes. En microcanales de 10 a 500 nanómetros de diámetro el número de Reynolds es extremadamente bajo; típicamente es de tan solo unas décimas. Por lo tanto, el fluido es siempre laminar y no ocurren turbulencias; sólo la difusión interviene en la mezcla de fluidos. Un efecto importante es que la relación de superficie por volumen es muy alta, por lo que cualquier reacción química en un microfluido se ve muy acelerada. En la actualidad existen diversos dispositivos comerciales que hacen uso de microfluidos, como los laboratorios en un chip (lab-on-a-chip).

Un dispositivo para microfluidos es identificado por el hecho de tener uno o más canales con al menos una dimensión menor a 1 mm. Cuando comenzó el estudio de estos dispositivos los fluidos comúnmente empleados eran muestras de sangre, suspensiones de células bacterianas, soluciones de proteínas y anticuerpos. Su propósito inicial fue el de medir coeficientes de difusión, viscosidad de estos fluidos y el estudio de la cinética de reacciones enzimáticas, sin embargo su uso pronto se extendió al estudio de la electroforesis capilar, al campo de la inmunología, al flujo citométrico, al análisis de proteínas por espectroscopia de masas, al análisis de DNA, a la manipulación celular, la separación celular, los análisis clínicos y más recientemente a la síntesis de productos farmacéuticos, inorgánicos, orgánicos, etc.; llegando incluso a emplearse en síntesis a escala industrial.

Muchos de los sistemas de microfluidos se han construido con polidimetilsiloxano o PDMS, este material es ópticamente transparente y es un elastómero. La facilidad con que se pueden llevar a cabo las pruebas en este material y su capacidad para resistir diversos componentes, como las válvulas neumáticas, han convertido al PDMS en el principal material para construir dispositivos de microfluidos. La microelectrónica ha tenido un importante papel en el desarrollo de los microfluidos, gracias a ella se han desarrollado materiales para sistemas especializados que requieran estabilidad térmica y química. Los dispositivos para microfluidos han tenido un rápido desarrollo en sus métodos de fabricación, los microcanales que sirven como tuberías y otras estructuras como las microválvulas, los micromezcladores y las microbombas, son elementos esenciales de las fábricas microquímicas en un chip.

Un sistema de microfluidos tiene una serie de componentes genéricos: un método para introducir los reactivos o las muestras (principalmente en forma de fluidos), métodos para mover los fluidos a través del chip, componentes para el mezclado de los reactivos y otros dispositivos tales como detectores para fines analíticos, componentes para la purificación de productos o sistemas usados para la síntesis. Dos principales contribuciones se han obtenido para la construcción de dispositivos, uno es el

desarrollo de la soft lithography en PDMS como un método para fabricar microdispositivos y el otro es el desarrollo de métodos para fabricar microválvulas activadas neumáticamente así como micromezcladores y microbombas basadas también en la litografía suave. Estos métodos han permitido construir microdispositivos en menos de dos días (desde el diseño hasta el trabajo para realizarlo) en comparación con otros dispositivos de silicio que se llevan hasta un mes. Las microválvulas neumáticas son componentes importantes que permiten el diseño y examinación de complicados dispositivos.

Juntos con los nuevos métodos de fabricación, los microfluidos han permitido explotar ciertas diferencias fundamentales entre las propiedades físicas de los fluidos que se mueven por grandes canales y aquellos que lo hacen por microcanales. Una de las más importantes es la turbulencia (la cual está ausente en el flujo laminar). A gran escala, los fluidos se mezclan convectivamente. Esto muestra que en los fluidos macroscópicos la inercia es más importante que la viscosidad, en el caso de los microfluidos, estos no se mezclan convectivamente, cuando dos corrientes de fluidos fluyen por un microcanal lo hacen en paralelo, sin turbulencia, y el mezclado solo es consecuencia de la difusión de las moléculas entre la interfase de los fluidos. El anterior tipo de flujo descrito es llamado laminar. También se han desarrollado micromezcladores los cuales se emplean en el caso de que el microproceso lo requiera.

Una característica muy útil de los microfluidos es el flujo electroosmótico. Cuando un microfluido que contiene iones (como el agua) se coloca en un microcanal que tiene cargas fijas en su superficie (tal como dióxido de silicio u óxidos de PDMS) y un potencial eléctrico es aplicado a lo largo de los canales, el fluido se mueve como un tapón, más que como un flujo parabólico (que es el perfil observado cuando solo se aplica presión al fluido). El flujo electroosmótico minimiza el ensanchamiento de tapones en la muestra, lo cual ocurre cuando se emplean muchos equipos para aplicar presión y permite una mejor resolución de las especies.

- Principios básicos de microfluidos

Hay dos métodos comunes por los que se logra que un fluido avance por un microcanal. Uno de ellos emplea presión para la conducción del flujo, por medio de este método el microfluido es bombeado a través del dispositivo usando bombas de desplazamiento positivo, tales como jeringas de bombeo. Cuando se emplea este método para el bombeo de microfluidos, se produce un perfil de velocidad parabólico dentro del canal, y se considera que la velocidad del fluido cerca de las paredes del microcanal es cero y en su parte central es máxima. El uso de la presión para el

bombeo es relativamente barato y reproducible. Actualmente se están desarrollando microbombas, por lo que el uso de esta técnica también tiende a la miniaturización.

Otro método común para el bombeo de microfluidos es el bombeo electroosmótico. Si las paredes de un microcanal tienen una carga eléctrica, entonces se formará una capa eléctrica doble. Cuando un campo eléctrico es aplicado a través del microcanal, los iones de la doble capa se mueven hacia el electrodo de polaridad de signo contrario. Esto crea un movimiento del fluido que está cercano a las paredes y se transfiere al resto del fluido debido a las fuerzas viscosas dentro del fluido. Si el microcanal está abierto, el perfil de velocidad es uniforme a lo largo del canal. Sin embargo si el campo eléctrico es aplicado a lo largo de un canal cerrado (o si se está aplicando presión con una bomba) se forma un patrón de recirculación, en el que el fluido que se mueve por el centro del canal se mueve en una dirección contraria a la del fluido de las paredes. En los canales cerrados, la velocidad a lo largo del centro del microcanal es solo un 50% de la velocidad de las paredes.

Una de las ventajas del flujo electrocinético, en determinados procesos, es que el perfil formado evita la difusión no uniforme que ocurre cuando se aplica presión, otra ventaja del flujo causado por este método es que se planea usarlo para otras aplicaciones electrónicas en chip. Sin embargo, el flujo electrocinético requiere de altos voltajes, dificultando así su miniaturización. Otra desventaja del flujo electrocinético es la variabilidad de propiedades de superficie lo cual repercute en la variación de la velocidad del flujo y por ello a veces se vuelven impredecibles los tiempos de residencia dentro de los microdispositivos.

## 1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del presente proyecto consiste en el diseño, fabricación y caracterización de un dispositivo microfluídico. El dispositivo microfluídico a realizar es una bomba peristáltica, compuesta principalmente por una estructura de tres cámaras de bombeo y dos puertos, todos unidos por microcanales entre sí, y tres motores paso a paso que ejercerán presión sobre las cámaras para desplazar el fluido. La estructura de cámaras, puertos y microcanales será fabricada con PDMS, y también se realizará una placa PCB necesaria para controlar los motores paso a paso. El objetivo más importante es comprobar que se puede conseguir desplazar fluido desde el puerto de entrada al de salida utilizando motores paso a paso para posteriormente analizar los resultados para caracterizar el dispositivo.

## 1.2. Estado del arte

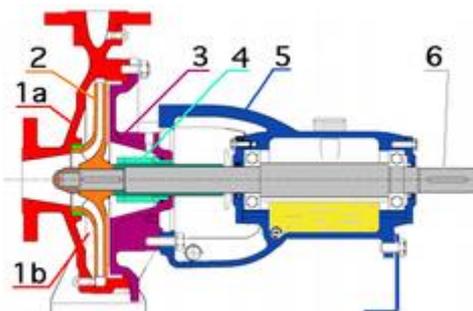
### 1.2.1. Tipos de bombas

En este apartado se muestran los distintos tipos de bombas comerciales, sus características, y su funcionamiento básico.

Existen dos tipos básicos de bombas, las centrífugas y las volumétricas, con un funcionamiento totalmente distinto que se describe a continuación.

#### a) Bombas centrífugas

La bomba centrífuga, también denominada bomba rotodinámica, es actualmente la máquina más utilizada para bombear líquidos en general. El funcionamiento de este tipo de bomba se basa en el principio del incremento de la cantidad de movimiento angular del líquido, es decir, incrementar de forma importante la energía cinética del líquido, para a continuación, transformarla en presión mediante la disminución de la velocidad del líquido. El incremento de energía cinética, se consigue mediante un rotor que da al líquido una gran cantidad de movimiento angular. La transformación de la energía cinética en presión se consigue mediante unas carcasas en forma de espiral y también a través de las aletas directrices que se sitúan a la salida del rotor.



**Figura 1.2. Corte esquemático de una bomba centrífuga. 1a carcasa, 1b cuerpo de bomba, 2 soporte de cojinetes, 3 tapa de depresión, 4 apertura del eje, 5 cierre del eje, 6 eje.**

#### b) Bombas volumétricas

Las bombas volumétricas o de desplazamiento positivo, basan su principio de funcionamiento en el cambio de volumen de una cámara o recinto, obligando por ello a que se desplace el líquido que en determinado momento ocupa dicho recinto, este desplazamiento se puede realizar a través de émbolos, engranajes, etc. Otra de las características de este tipo de bombas es que la cavidad de recepción o cámara de

aspiración, esta comunicada a través de unos espacios diseñados para ello, con la cavidad de descarga o cámara de impulsión, pudiendo tener una o varias cámaras de trabajo.

El gasto de estas bombas, depende de los volúmenes o dimensiones de la máquina y de la velocidad con que funcionan. Las presiones que pueden alcanzarse dependen de la potencia de los motores que las mueven y de la resistencia de los materiales con los que se han construido. Si se ignoran las pérdidas por fugas en estas máquinas, puede decirse que el gasto y la presión en ellas, son independientes entre sí.

Las velocidades de funcionamiento de las bombas volumétricas son bajas en comparación con las rotodinámicas, ya que en las bombas volumétricas las piezas móviles y sus mecanismos son pesados y complejos, respectivamente; en consecuencia, los gastos que pueden obtener resultan bajos en comparación con las bombas rotodinámicas.

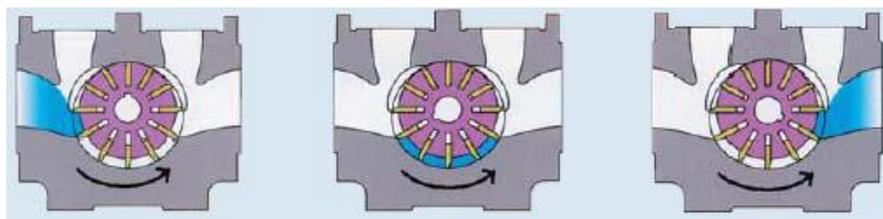
El ajuste preciso de las piezas móviles en estas bombas les da una gran capacidad de succión, comparadas con la relativamente baja capacidad de succión de las bombas centrífugas.

Las bombas volumétricas, no son aptas para el manejo de líquidos contaminados con partículas sólidas, como los lodos, pues el ajuste de sus piezas móviles se perdería por la acción abrasiva.

Existen varios tipos de bombas volumétricas, a continuación se muestran algunas de ellas:

- Bombas de paleta

El principio de funcionamiento de este tipo de bombas consiste en el giro del rotor y el movimiento de las paletas provocando la transferencia del fluido dentro del cuerpo de la bomba (en movimiento continuo) desde la aspiración hasta la descarga.



**Figura 1.3. Esquema de funcionamiento de una bomba de paleta, donde se ve la progresión del fluido a lo largo de la bomba.**

Partes de la bomba:

- Cuerpo de la bomba: En función de tipo de producto a bombear y del entorno de la bomba, existen tres posibles construcciones (Fundición, Acero o acero Inoxidable).
- Cierres mecánicos: Dependiendo de las necesidades, la bomba podrá ser equipada con cierres mecánicos simples o dobles normalizados.
- Paletas: en función del tipo de producto a bombear y de las condiciones de funcionamiento, la bomba irá equipada con paletas en polímeros o metálicas.

Su principal clasificación es:

- Bombas de paletas rígidas.
- Bombas de paletas flexibles.

Sus principales ventajas son su mantenimiento rápido y sencillo, no comprimimos el fluido, solo empuja y arrastra con lo que puede bombear fluidos de alta viscosidad, un gran poder de aspiración y su sencillez técnica.

Estas cualidades lo hacen idóneo para el sector petrolífero y químico debido a su capacidad de poder bombear cualquier tipo de fluido.

– Bombas peristálticas

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba de desplazamiento positivo, usada para bombear una gran variedad de fluidos. El fluido es contenido dentro de un tubo flexible empotrado dentro de la cubierta de la bomba.

En el caso de las bombas peristálticas, la presión se produce gracias a una serie de rodillos o “proyecciones de dedos” que presionan, intermitentemente, la línea de infusión de forma que el fluido es empujado a través del tubo.

Si los rodillos se encuentran alrededor de un eje central que gira se denomina bombas peristálticas rotatorias, mientras que si el tubo es presionado por una serie de dientes en sucesión cíclica (“proyecciones de dedos”) se denominan peristálticas lineales (Figura 1.4). Estas últimas poseen un espacio muerto entre el final de un ciclo y el comienzo del siguiente, lo que provoca una pequeña y transitoria disminución de la

velocidad del flujo. Para evitarlo se han desarrollado mecanismos que eliminan dicho espacio muerto, obteniéndose las denominadas bombas peristálticas de aceleración.

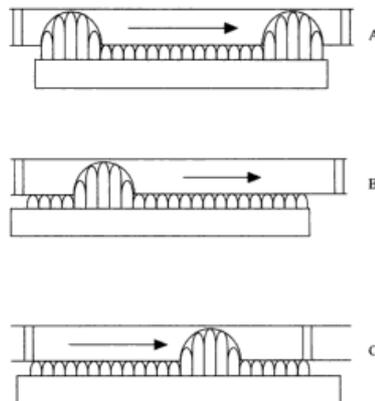


Figura 1.4. Aspecto del mecanismo de funcionamiento de una bomba peristáltica lineal.

Las bombas peristálticas rotatorias funcionan por aplastamiento y deslizamiento una membrana tubular, por medio de un juego de rodillos que giran solidariamente sobre el eje.

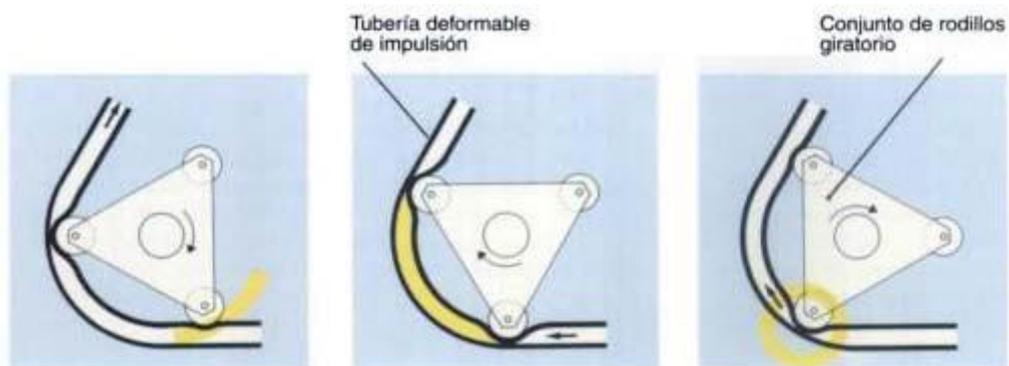


Figura 1.5. Funcionamiento de una bomba peristáltica.

Este tipo de bombas que suministran fluido a baja velocidad tienen la ventaja de suministrar fluido de forma continua y ningún elemento mecánico está en contacto directo con el fluido, además las bombas peristálticas suelen ser más precisas que los controladores, pero menos que las denominadas de cassette o que las de jeringa, ya que las presiones y el rozamiento al que continuamente se ve sometida la línea provocan su deformación con el consiguiente incremento de la flexibilidad y del tamaño de la luz del tubo.

Por el contrario los inconvenientes que se señalan son otros, el importante volumen ocupado por la bomba, las presiones de trabajo reducidas a 3 bares como máximo que limitan la altura de impulsión, y fragilidad de la máquina ante la presencia de cuerpo

extraños, que pueden rasgar con facilidad la membrana tubular, así como la obligatoriedad de cambiar este elemento con cierta frecuencia, debido al envejecimiento del material flexible.

Debido a su higiene y precisión es muy utilizada en medicina y en el sector alimenticio, aunque requiere mantenimiento frecuente.

– Bombas de jeringa

Las bombas de jeringa consisten en un cilindro que se llena con el fluido y que es impulsado por un embolo a una determinada velocidad mediante un sistema de engranajes y un motor de paso.



Figura 1.6. Bomba de jeringa.

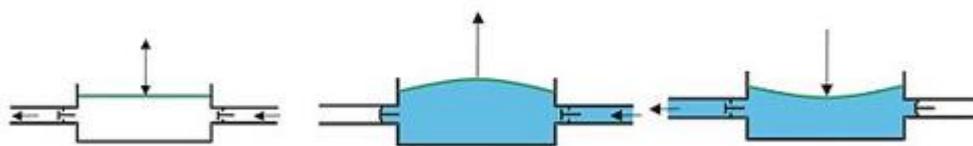
Este dispositivo puede suministrar pequeñas cantidades de fluido a velocidades tan bajas como 0,01 ml/hora, se utilizan cuando se requiere alta precisión a bajo flujo. Pueden alcanzar presiones bastante altas y no suelen precisar mantenimiento.

Sus desventajas son la limitada capacidad del depósito y un ligero cambio de flujo a presiones altas, así como la falta de suministro de fluido en el retroceso del émbolo. Son utilizadas en cualquier sistema que requiera gran precisión a la hora de inyectar fluido.

– Bombas de membrana o diafragma

La bomba de membrana o bomba de diafragma es un tipo de bomba de desplazamiento positivo (generalmente alternativo) en la que el aumento de presión se realiza por el empuje de unas paredes elásticas (membranas o diafragmas) que varían el volumen de la cámara aumentándolo y disminuyéndolo alternativamente. Unas

válvulas de retención controlan que el movimiento del fluido, para que se realice de la zona de menor presión a la de mayor presión.



**Figura 1.7. Movimiento del fluido en una bomba de una bomba de membrana.**

Poseen ciertas ventajas frente a otros tipos de bombas, ya que no poseen cierres mecánicos ni empaquetaduras que son las principales causas de rotura de los equipos de bombeo en condiciones severas. Estas bombas son autocebantes, es decir, no es necesario llenar la columna de aspiración de líquido para que funcionen, por lo que pueden ser utilizadas para sacar líquido de depósitos aspirando aunque la tubería de aspiración esté llena de aire inicialmente. Debido a la resistencia a la corrosión de estas bombas y a no ser necesario cebarlas para que funcionen, estos equipos son muy utilizados en la industria para el movimiento de prácticamente cualquier líquido y en multitud de industrias como ácidos, derivados del petróleo, disolventes, pinturas, barnices, etc.

Dependiendo del rango de temperaturas en el que vaya a trabajar la máquina, se utilizan unos materiales u otros para las membranas. Los materiales más utilizados son neopreno, teflón, poliuretano y otros materiales sintéticos.

### 1.2.2. Microbombas

Las microbombas pueden ser consideradas microaccionamientos dedicados a la acción específica de transporte de líquido (o gas). Se conocen diversos principios para estas bombas, algunas son accionadas por efectos mecánicos como en las bombas con motores rotativos, bombas con membranas y las bombas peristálticas; otras son accionadas por efectos eléctricos como las bombas electrohidrodinámicas y las electrocinéticas. Las más empleadas son las bombas mecánicas ya que, las de efecto eléctrico tienen bajas tasas de flujo. Sin embargo, tales microbombas mecánicas, son prácticas solamente cuando son mayores de cierto tamaño, debido a las fuerzas viscosas grandes del líquido para las geometrías pequeñas de la bomba.

Las microbombas se pueden clasificar en dos grandes grupos: microbombas accionadas mecánicamente y microbombas no accionadas mecánicamente.

i. Microbombas accionadas mecánicamente

Las microbombas accionadas mecánicamente requieren de una fuente de accionamiento que proporcione un ciclo de alimentación mecánica. Este tipo de accionamiento suele involucrar la deformación del material en los bordes debido al incremento y decremento de la presión para permitir el movimiento del fluido. Este tipo de actuadores pueden ser externos o integrados en el mismo dispositivo. Los actuadores externos se caracterizan porque no forman parte del dispositivo como tal, sino que requieren de componentes independientes o de acoplamiento a la microbomba, lo cual provoca un aumento considerable del tamaño total de ésta, aunque presentan como ventaja la capacidad de producir grandes fuerzas. Los actuadores integrados son micromecanizados y añadidos a la bomba como un componente más durante el proceso de fabricación, motivo por el que tienen una velocidad de respuesta alta y un acoplamiento mejor al dispositivo, aunque tienen la desventaja de aumentar la complejidad del proceso de fabricación del dispositivo. Algunos ejemplos de microbombas que requieren de actuadores mecánicos son: las bombas de desplazamiento positivo, las bombas de rectificación de geometría fija y las bombas peristálticas. También se considera en esta categoría a aquellas microbombas cuyo principio de funcionamiento se basa en límites fluido-fluido como las bombas permeables de gas.

ii. Microbombas no accionadas mecánicamente

Las microbombas no accionadas mecánicamente convierten la energía no mecánica en energía cinética del fluido. En la actualidad, las más conocidas son las microbombas no mecánicas basadas en bombeo electrocinético, electrowetting y en gradientes de tensión superficial. Una variante similar al bombeo electrocinético es el basado en electroósmosis que emplea las fuerzas que actúan sobre las cargas disueltas en el líquido. La electroósmosis sirve para producir un movimiento continuo del líquido mediante la aplicación de un campo tangencial a la superficie que produce fuerzas que arrastran el fluido.

La corriente alterna puede provocar movimiento continuo por electroósmosis, cuyo efecto depende de la frecuencia y de la amplitud de la señal aplicada.

### 1.2.3. Microbombas peristálticas

En esta sección se muestra una clasificación con los tipos de bombas peristálticas existentes, se clasifican según el material de fabricación (silicio y PDMS principalmente), y según el método de actuación.

Método de actuación:

- Termoneumático: Se calienta un fluido para que aumente su presión y de esta forma, mueva la membrana. Es un dispositivo que consta de una cavidad sellada llena de un medio térmicamente expandible que puede ser calentado o enfriado, lo que resulta en un cambio de presión en la cavidad. Este cambio de presión inducida se utiliza para accionar una parte flexible o movable, como una membrana o pistón. Gas o un sistema de gas/líquido se pueden utilizar como el medio en expansión. Un cambio de temperatura en la cavidad se puede lograr mediante calentamiento resistivo [2].
- Neumático: [4], [5].
- Electrostática: requieren la creación de pequeñas lagunas que complica el proceso de fabricación.
- Piezoeléctrico: requieren altos voltajes. A mayor voltaje, mayor flujo y carga de presión. Si el voltaje se sigue aumentando, se llega a una asíntota donde se encuentra el máximo flujo permitido por la bomba. A mayor flujo, la temperatura desciende [6], [7], [8], [9], [10].
- Magnético: [11], [12].

## Capítulo 2. Diseño

En el presente capítulo se va a realizar una descripción de la solución que ha sido seleccionada, además de una descripción de los materiales y componentes necesarios para llevar a cabo la fabricación de la bomba peristáltica.

El dispositivo microfluídico a realizar es una bomba peristáltica, compuesta principalmente por una estructura de tres cámaras de bombeo y dos puertos, todos unidos por microcanales entre sí, y tres motores paso a paso que ejercerán presión sobre las cámaras para desplazar el fluido. La estructura de cámaras, puertos y microcanales será fabricada con PDMS, y también se realizará una placa PCB necesaria para controlar los motores paso a paso.

Este capítulo se divide en dos apartados principales donde se describen cada una de las partes de las que está compuesta la bomba peristáltica. En un primer apartado se presenta el diseño propuesto para la parte microfluídica de la misma; estructura, materiales, dimensiones elegidas y actuación sobre la misma. En un segundo se presenta el diseño propuesto para la parte electrónica de la misma; funcionamiento, componentes.

### 2.1. Microfluídico

En este apartado se realiza una descripción de los materiales necesarios para llevar a cabo la fabricación, además de una descripción de la estructura elegida y la forma de actuación sobre la misma.

### 2.1.1. Materiales empleados

En el proceso de fabricación de la estructura microfluídica se emplearán cuatro elementos principales. Estos son la máscara, el sustrato PCB, el SU-8 y el PDMS. A continuación se detalla la información sobre todo este material.

#### a) Máscara

La máscara es la plantilla de material transparente, la cual contiene el fotolito o una imagen opaca impresa en ella y que hace las veces de patrón para así poder transferir éste mediante luz ultravioleta a la película de material fotosensible (resina) que previamente se ha depositado sobre la superficie superior de la oblea/sustrato. La máscara se coloca sobre la oblea/sustrato, donde está tiene depositada la fina capa de resina, y todo el conjunto es expuesto a la luz ultravioleta, que cambia las características de la resina sobre la que incide.

La máscara es una parte muy importante en el proceso de fabricación del dispositivo, ya que define la estructura del mismo y cualquier fallo a la hora de realizarlo influirá sobre la calidad final del dispositivo.

#### b) Sustrato PCB

El PCB (Printed Circuit Board) se empleará como soporte mecánico durante la fabricación del dispositivo. Los PCB están sustituyendo al silicio en el desarrollo de microistemas dando lugar a lo que se conocen como dispositivos PCB-MEMS. El material del que están hechas la mayoría de las placas de circuito impreso es FR-4 (Flame Retardant 4). Está compuesto por un tejido entrelazado de fibra de vidrio con un epoxy. Las ventajas de esta tecnología son las siguientes:

- Bajo coste. En comparación con el silicio es una tecnología extremadamente barata.
- Tecnología madura.
- Prototipado rápido y fácil.
- Alta integración. Se pueden integrar tanto dispositivos microfluídicos como dispositivos electrónicos.

c) SU-8

La estructura microfluídica del proyecto se realizará en PDMS, pero para conseguir la estructura deseada se emplea el moldeo, que consiste en realizar un molde con la geometría deseada. Para la realización de este molde se utilizará SU-8. La transferencia del patrón se lleva a cabo mediante litografía, para posteriormente rellenarlo de PDMS. Tras un tratamiento térmico se retira el molde y se obtiene la estructura PDMS, ya que existe baja adherencia entre ambos materiales. A esta técnica se le denomina soft lithography.

El SU-8 surge en los laboratorios de investigación IBM Zurich en los años 90. Se trata de una fotorresina que puede ser mecanizada mediante procesos fotolitográficos tradicionales de la industria electrónica obteniendo paredes prácticamente verticales. Puesto que no son necesarias instalaciones de alto coste para su tratamiento y presenta unas características mecánicas, químicas y ópticas muy buenas, además de verse reducidos los tiempos de fabricación, el SU-8 es ampliamente utilizado en la industria de microsistemas.

El SU-8 es una resina epoxy negativa sensible a la radiación ultravioleta que está disuelta en un disolvente orgánico. La resina epoxy es el copolímero bisphenol-A/formaldehído Novolac en un disolvente orgánico, que será ciclopentanona o gamma-Butirolactona (GBL), según el caso, y junto al generador fotoácido que pertenece a la familia de sales de triaril sulfonio. La cantidad de disolvente determina la viscosidad, y por tanto el rango de espesores posibles, extendiéndose desde el centenar de nanómetros hasta el milímetro. Este material se procesa con las técnicas de litografía.

A continuación se describen las propiedades que lo han convertido en uno de los materiales fundamentales en microsistemas:

- Verticalidad en las paredes y altas relaciones de aspecto.
- Alta transparencia. Esta propiedad permite visualizar líquidos dentro de un dispositivo y la posibilidad de integrar dispositivos ópticos.
- Biocompatibilidad.
- Resistencia química.
- Depositiones uniformes y muy bajo efecto de borde.

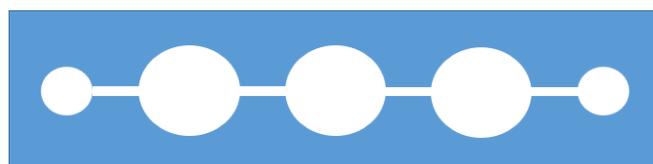
d) PDMS

Se trata de un polímero orgánico basado en silicio ampliamente utilizado en la fabricación de dispositivos microfluídicos para aplicaciones biomédicas. Se trata de un polímero orgánico mineral (una estructura que contiene carbono y silicio) de la familia de los siloxanos (palabra derivada de silicio, oxígeno y alcano). Fuera del ámbito de los microsistemas se utiliza como aditivo alimentario (E900), en champús, y como un agente anti-formación de espuma de bebidas y en aceites lubricantes. A continuación se detallan las propiedades que presenta este material:

- Transparencia. Esta propiedad permite el uso de sensores ópticos y la visualización de líquidos.
- Biocompatible.
- Químicamente inerte. El PDMS no reacciona ante la mayoría de reactivos.
- Isotrópico y homogéneo con una buena estabilidad térmica.
- Respetuoso con el medio ambiente e ignífugo.
- Buena adhesión al silicio y vidrios.
- Compatibilidad con otros materiales y procesos de fabricación.
- Elástico.

### 2.1.2. Estructura

El diseño que se propone en este proyecto es el que se muestra en la Figura 2.1. Consta de tres cámaras conectadas entre sí por dos microcanales y dos puertos, uno de entrada y otro de salida, unidos a las cámaras a través de microcanales.



**Figura 2.1. Diseño del dispositivo microfluídico.**

Las dimensiones que se han elegido para este diseño se detallan a continuación. Cada cámara tiene un radio de 2.2 mm y están conectadas por dos microcanales principales de 3.7 mm de largo y 400  $\mu\text{m}$  de ancho. La separación entre cámaras viene determinada por los motores paso a paso, ya que es la distancia más pequeña a la que se pueden colocar dos motores sin que interfieran entre sí. Cada puerto tiene un radio de 1 mm y está conectado, a través de un microcanal de 3.7 mm de largo y 400  $\mu\text{m}$  de ancho a la cámara correspondiente (inicial o final). La profundidad de cámaras y microcanales es de 300  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.3. Actuación sobre la estructura

El funcionamiento de este tipo de bombas está basado en un desplazamiento positivo, en las que el aumento de presión se realiza por el empuje de unas membranas que varían el volumen de la cámara, aumentándolo y disminuyéndolo alternativamente.

Para conseguir dicho desplazamiento positivo los motores paso a paso deben presionar las membranas del sistema siguiendo una secuencia determinada.

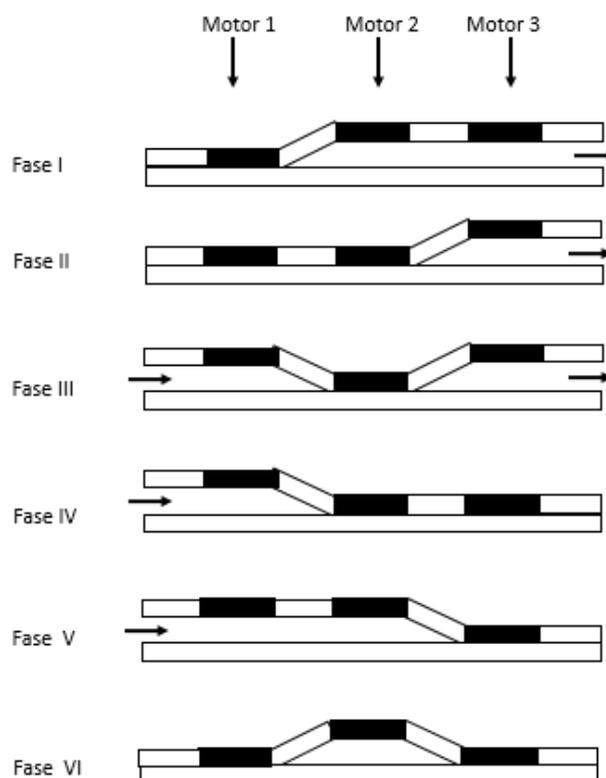


Figura 2.2.Principio de funcionamiento.

En la Figura 2.2 se muestra el principio de funcionamiento de la microbomba, al ejercer presión los motores sobre las membranas en el orden indicado, se consigue el movimiento peristáltico de la bomba, cuando un motor ejerce presión sobre la membrana transmite el fluido hacia la siguiente cámara (o puerto de salida), y debido a que siempre está presionada la membrana anterior no hay flujo en sentido inverso.

## 2.2. Electrónico

La parte electrónica del sistema se encarga de controlar el diseño microfluídico para conseguir funcionamiento deseado. Para ello es necesario utilizar un microcontrolador que es el encargado de controlar los motores paso a paso.

El diseño que se propone es un PCB con las dimensiones más reducidas posibles en el que se instalen tanto el microcontrolador, puentes en H, además, los motores paso a paso y la lógica de control utilizada para controlar el sistema, así como todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema: condensadores, resistencias, conectores, pulsadores, led, etc. De esta manera se diseña una placa que incluye pulsadores para llevar a cabo la tarea para la que es programada.

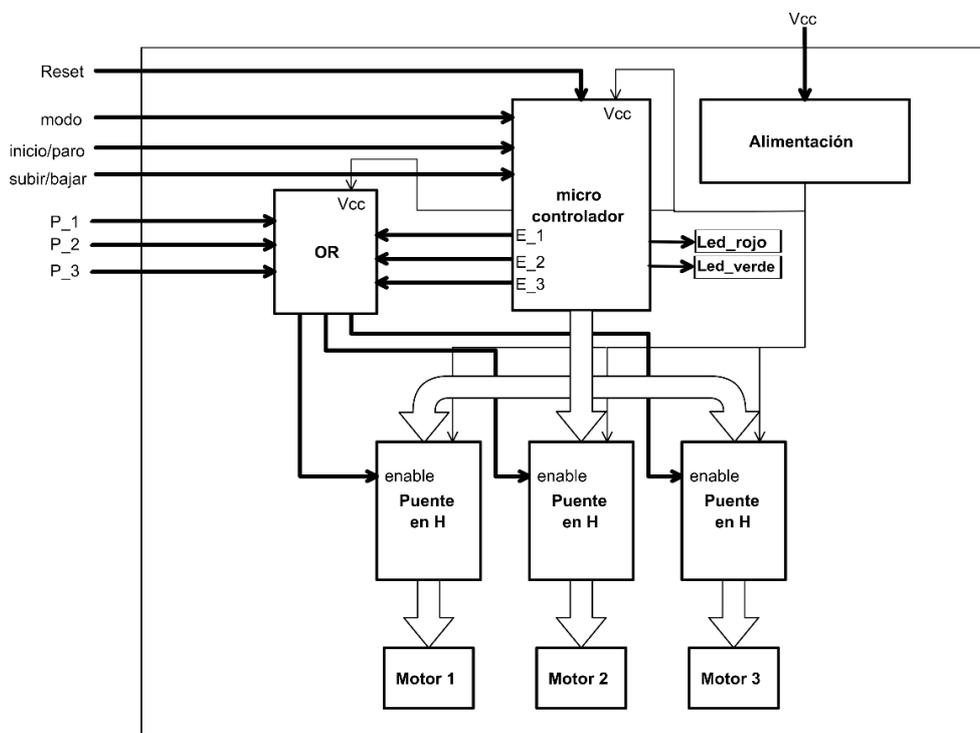


Figura 2.3. Diagrama de bloques del sistema.

En la Figura 2.3 se representa un diagrama de bloques con los principales elementos del sistema encargado del control de los motores paso a paso. El microcontrolador es el elemento fundamental de esta parte del diseño ya que, que por un lado, envía la secuencia necesaria a los puentes en H para hacer funcionar a los motores paso a paso, y por otra recibe señales necesarias para configurar y controlar el sistema. A continuación se describe el funcionamiento de esta parte del sistema y las características de los principales componentes utilizados.

### 2.2.1. Hardware

En este apartado se describen la funcionalidad y principales características de los componentes seleccionados.

#### 2.2.1.1. Regulador de tensión

En el sistema existen componentes alimentados a dos tensiones distintas (3,3 y 5,5 V). De manera que se emplea un regulador de tensión para poder usar una sola fuente de alimentación (batería) y que la tensión del microcontrolador sea lo más estable posible.

#### 2.2.1.2. Microcontrolador

El microcontrolador será el encargado de generar las secuencias de funcionamiento de los motores paso a paso, controlar la activación de los mismos, y por lo tanto el encendido y apagado de la bomba. El microcontrolador del que se dispone para este proyecto es el MSP430G2553.

Los microcontroladores de la serie MSP430 (MSP quiere decir Mixed-Signal Processor) de Texas Instruments son procesadores de señal combinada de 16 bits, basados en la arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer o Computador de Conjunto de Instrucciones Reducidas), diseñados para tener un consumo ultrabajo. Además, disponen de una cantidad de periféricos muy variado para realizar proyectos muy diversos. Estos dispositivos están enfocados a aplicaciones embebidas de bajo costo y baja potencia, como equipos operados por baterías.

A continuación se muestra una imagen de la placa de desarrollo en la que viene conectado el MSP430g2553:



Figura 2.4. Placa de desarrollo, o LaunchPad, del microcontrolador MSP430.

Sus principales características son:

- Velocidad del reloj: configurable entre 1 y 16 MHz.
- Operan en un rango de voltaje de 1.8V a 3.6V.
- Memoria FLASH: 16KB.
- Memoria SRAM: 512B.
- Memoria NVM: 56KB.
- Memoria SRAM: 4KB.
- Pines GPIO: 24 como máximo.
- 2 Temporizadores.
- Convertidor ADC de 8 canales.
- UAR.
- I2C, SPI.

### 2.2.1.3. Puente en H

Se emplea un puente en H por cada motor paso a paso.

El puente en H está formado por cuatro transistores que trabajan en conmutación y se comportan como interruptores controlados por la señal que les llega a las entradas C.1 y C.2. Su funcionamiento es el siguiente:

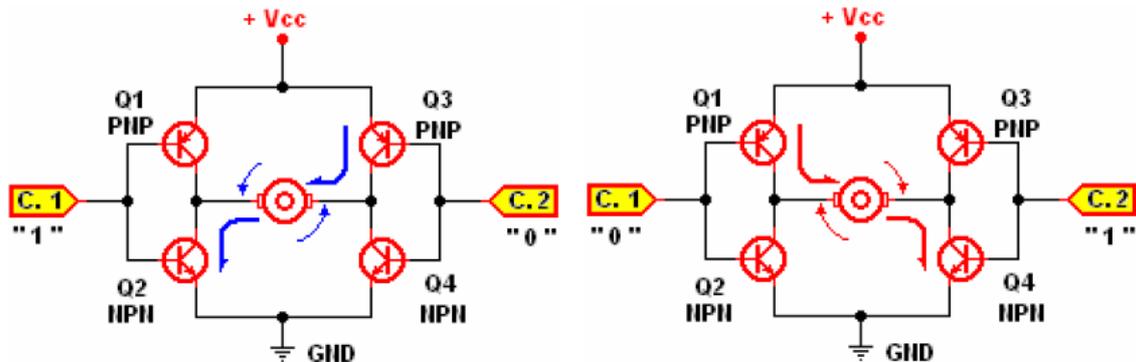


Figura 2.5. Estructura puente en H.

- Cuando se activa la entrada C.1 a nivel alto y la entrada C.2 a nivel bajo los transistores Q3 y Q2 (NPN y PNP) entran en saturación simultáneamente, mientras que Q1 y Q4 están en corte por ser signo contrario (PNP y NPN respectivamente).
- Cuando se invierte la señal de entrada, es decir C.1 a nivel bajo y C.2 a nivel alto. Los transistores que se saturan son Q1 y Q4 mientras que los que entran en corte son Q2 y Q3.

El chip seleccionado para este proyecto es el L293B, es un driver de 4 canales capaz de proporcionar una corriente de salida de hasta 1A por canal. Cada canal es controlado por señales de entrada compatibles TTL y cada pareja de canales dispone de una señal de habilitación que desconecta las salidas de los mismos. Dispone de una patilla para la alimentación de las cargas que se están controlando, de forma que dicha alimentación es independiente de la lógica de control.

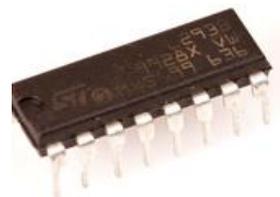


Figura 2.6. Integrado L293B.

#### 2.2.1.4. Motores paso a paso

Los motores paso a paso son los componentes más importantes de la bomba, ya que generan el movimiento de la misma. Su función consiste en presionar las cámaras de PDMS siguiendo la secuencia de funcionamiento que le indique el microcontrolador para conseguir el movimiento lineal deseado.

Como es importante tener control de la posición y velocidad de la membrana se utilizan motores paso a paso para este proyecto.

Un motor paso a paso, como todo motor, es en esencia un conversor electromecánico, que transforma energía eléctrica en mecánica. Mientras que un motor convencional gira libremente al aplicarle una tensión, el motor paso a paso gira un determinado ángulo de forma incremental (transforma impulsos eléctricos en movimientos de giro controlados), lo que le permite realizar desplazamientos angulares fijos muy precisos (pueden variar desde  $1.80^\circ$  hasta unos  $90^\circ$ ). Además, variando la frecuencia con la que se aplican los pulsos, también se varía la velocidad con que se mueve el motor, lo que permite realizar un control de velocidad. Por último si se invierte la secuencia de los pulsos de alimentación aplicados a las bobinas, se realiza una inversión en el sentido de giro del motor.

Los motores paso a paso están constituidos esencialmente por dos partes:

- Estator: parte fija construida a base de cavidades en las que van depositadas las bobinas.
- Rotor: parte móvil construida mediante un imán permanente.

Este conjunto va montado sobre un eje soportado por dos cojinetes que le permiten girar libremente.

La precisión y repetitividad que presentan esta clase de motores lo habilitan para trabajar en sistemas abiertos sin realimentación. Además estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición (si una o más de sus bobinas está energizada) o bien totalmente libres (si no circula corriente por ninguna de sus bobinas).

En resumen el motor paso a paso presenta una serie de ventajas entre las que destacar el control de la posición, la velocidad y el sentido, dando una alta precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.

En cuanto a sus desventajas presentan una velocidad angular limitada. Dicha limitación surge al realizar un paso, ya que el motor requiere un tiempo para alcanzar la posición de equilibrio. Si dicho tiempo no se respeta el motor puede no encontrar nunca esa posición de equilibrio y perderíamos el control sobre él.

Hay dos tipos básicos de motor paso a paso:

- Unipolares:

Los motores paso a paso unipolares se componen de 4 bobinas.

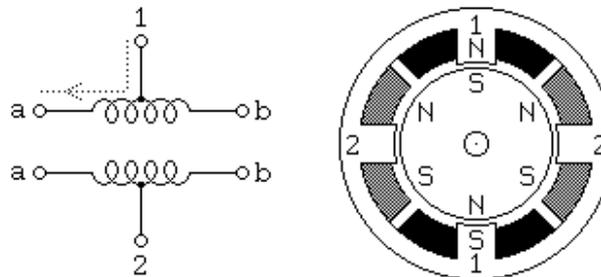


Figura 2.7. Motor paso a paso unipolar.

Se denominan así debido a que la corriente que circula por sus bobinas lo hace en un mismo sentido, a diferencia de los bipolares. Se componen de 6 cables externos, dos para cada bobina, y otro para cada par de éstas, aunque también se pueden ver con 5 cables, compartiendo el de alimentación para los 2 pares de bobinas.

- Bipolares

Se componen de 2 bobinas.

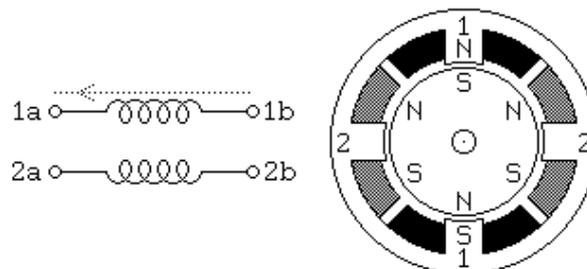


Figura 2.8. Motor paso a paso bipolar.

Para que el motor funcione, la corriente que circula por las bobinas cambia de sentido en función de la tensión, de ahí el nombre de bipolar, debido a que en los extremos de una misma bobina se pueden tener distintas polaridades.

Otra de las características que los diferencian de los unipolares son que estos llevan cuatro conexiones externas, dos para cada bobina. A diferencia de los unipolares que son más sencillos de utilizar, en los bipolares su dificultad reside en el control de la alimentación y el cambio de polaridad.

En este proyecto se utilizan motores paso a paso bipolares. Como no se dispone de la ficha técnica del motor (datasheet), es necesario medir la resistencia entre los pines del motor para identificar las bobinas.



Figura 2.9. Motores paso a paso utilizados.

Este tipo de motor lleva dos bobinados independientes. Para controlar este motor se necesita invertir la polaridad de cada una de las bobinas en la secuencia adecuada. Cada inversión en la polaridad provoca el movimiento del eje, avanzando este un paso. La dirección de giro se corresponde con la dirección de la secuencia de pasos.

Tabla 2.1. Secuencia de funcionamiento de los motores paso a paso

| Paso | 1a  | 1b  | 2a  | 2b  |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 1    | Vcc | Gnd | Vcc | Gnd |
| 2    | Vcc | Gnd | Gnd | Vcc |
| 3    | Gnd | Vcc | Gnd | Vcc |
| 4    | Gnd | Vcc | Vcc | Gnd |

### 2.2.1.5. Circuito combinacional

El sistema debe permitir controlar de forma manual la posición de los motores paso a paso, dado que la posición inicial de los motores puede variar de la posición deseada. Por tanto para su calibración en el montaje puede ser necesario moverlos y también ante posibles fallos. Como para este proyecto no se dispone de ningún sensor que indique en qué posición se encuentra el motor (por ejemplo en uno de sus límites superior e inferior), el microcontrolador no se puede encargar de calibrar de manera automática dicha posición, y debe hacerse de forma manual. Para ello, se ha optado por usar un sencillo circuito combinacional que consta de una puerta OR. Como puede observarse en la Figura 2.3 las entradas de la puerta OR están conectadas tanto a varias salidas del microcontrolador (E\_1, E\_2, E\_3), como a pulsadores (P\_1, P\_2, P\_3), que por defecto están desactivado ("0" lógico). Las salidas de la puerta OR están conectadas con los pines de habilitación correspondientes de los puentes en H.

Con este montaje se consigue controlar la habilitación de los motores de forma manual, pulsando el botón correspondiente o bien, mediante el microcontrolador.

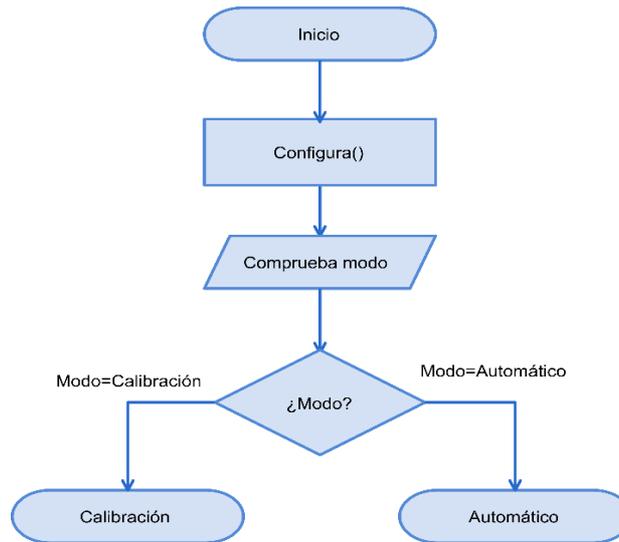
### 2.2.2. Software

En el apartado de software se realiza un programa en lenguaje de programación C que controla el funcionamiento de los motores paso a paso.

El firmware de control debe ser capaz de gestionar eficazmente el funcionamiento del sistema. Tiene que controlar de forma autónoma el funcionamiento de los motores paso a paso (activación, desactivación y sentido de giro), y además, permitir controlar de forma manual los motores, para así poder colocarlos en la posición deseada. A continuación se explica el firmware de control de los motores.

#### a) Diagramas de flujo

En los siguientes diagramas de flujo se detalla el funcionamiento del sistema.



**Figura 2.10. Diagrama de flujo al inicio del sistema.**

Al iniciar el sistema por primera vez, es decir, cuando se conecta la alimentación, se configura el microcontrolador: puertos entrada/salida, interrupciones, temporizadores, etc. Una vez configurado, se comprueba el modo de funcionamiento en el que se encuentra el sistema, esto se realiza con la lectura de un pin de entrada del microcontrolador (“modo” ver Figura 2.3).

**Tabla 2.2. Modos de funcionamiento.**

| <b>Pin modo</b> | <b>Modo de funcionamiento del sistema</b> |
|-----------------|---|
| 0 (GND)         | Modo de calibración                       |
| 1 (VCC)         | Modo automático                           |

En la Tabla 2.2 se muestran los posibles estados en los que se puede encontrar el sistema en función del pin de modo.

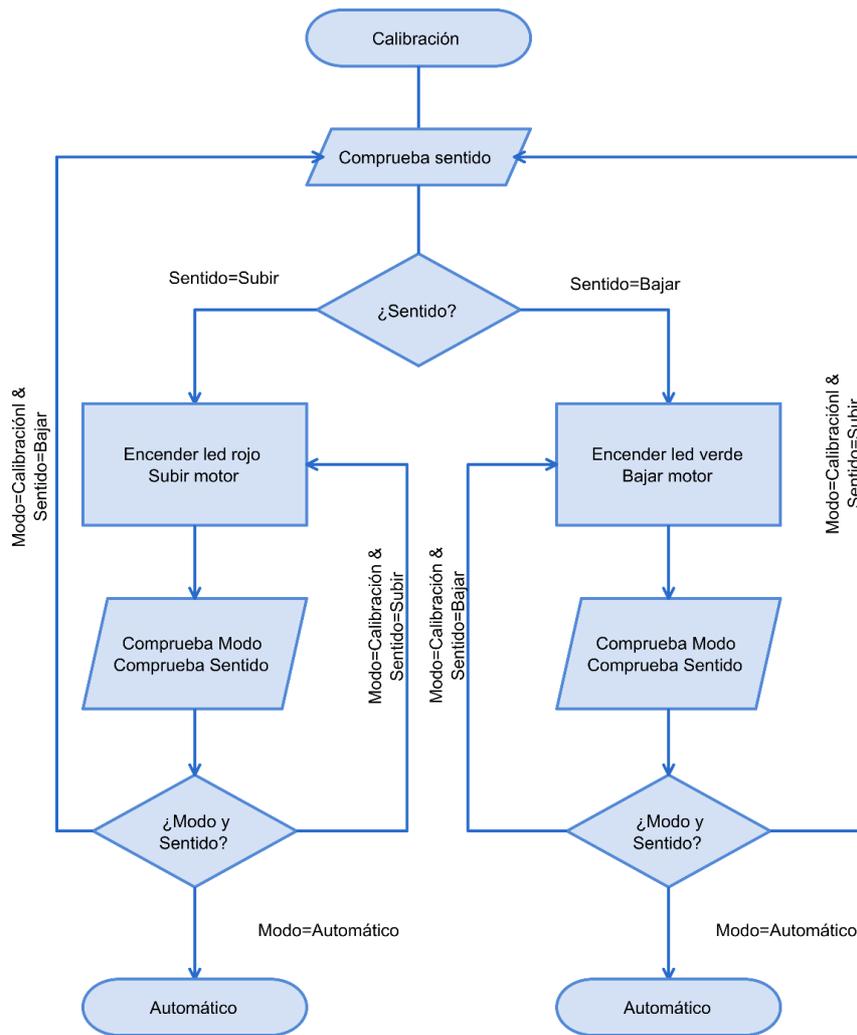


Figura 2.11. Diagrama de flujo modo de calibración.

El sistema permanece en modo calibración mientras el pin de modo esté a nivel bajo. Este modo se utiliza para controlar de forma manual la posición de los motores y así poder colocarlos en la posición deseada. En este modo se comprueba el sentido de giro de los motores para discernir si se pretende subir o bajar los motores. Esto se realiza con la lectura de otro pin de entrada del microcontrolador. Una vez comprobado el sentido de giro, el microcontrolador se encarga de controlar a los puentes en H de los motores paso a paso, para ejecutar la secuencia de funcionamiento correspondiente, dependiendo del sentido. Para controlar los drivers es necesario activar los pines de habilitación correspondientes, en este modo la activación de dichos pines se lleva a cabo mediante los pulsadores y la lógica combinacional. El microcontrolador no activa la habilitación de los pines en H solamente genera la secuencia necesaria para mover los motores. Para activar la habilitación correspondiente,

hace falta pulsar de forma manual el pulsador correspondiente al motor que se desee mover (pulsadores P\_1, P\_2, P\_3 ver Figura 2.3).

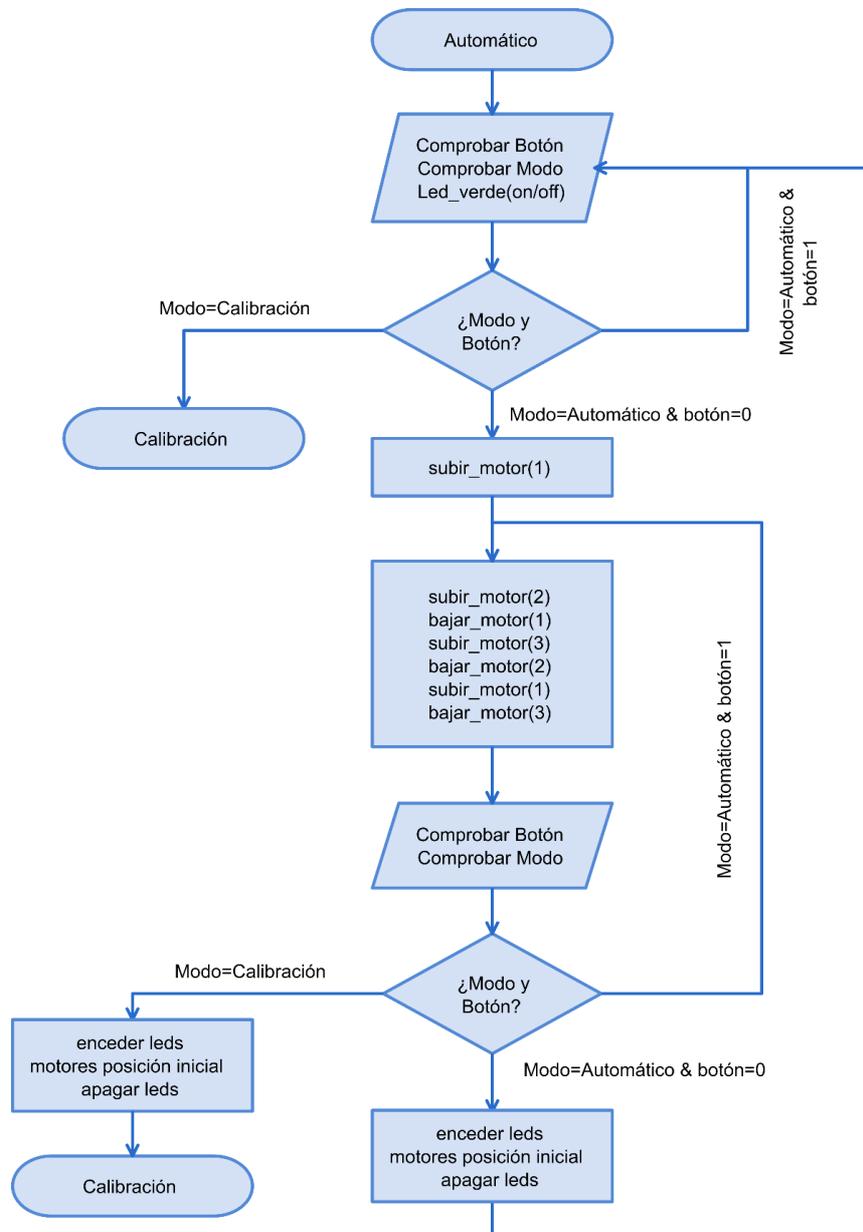


Figura 2.12. Diagrama de flujo modo automático.

En modo automático, al igual que ocurre en modo de calibración, el sistema permanece en él mientras el pin de modo esté a nivel alto. Este modo se utiliza para llevar a cabo el funcionamiento normal de la bomba. El microcontrolador es el encargado de activar y desactivar los puentes en H, además de generar las secuencias de funcionamiento de los motores en el orden indicado. Para iniciar el funcionamiento, se debe pulsar el botón de inicio/paro, y comienza a funcionar cuando se suelta. Para parar el sistema se debe pulsar de nuevo

dicho botón o poner el pin de modo a nivel bajo. Antes de parar o cambiar de modo los motores vuelven a la posición por defecto (posición que tenían al comienzo).

Por último, el sistema dispone también de dos leds utilizados para detectar posibles errores y comprobar en el modo que se encuentra el sistema. El microcontrolador es el encargado de encenderlos o apagarlos. A continuación, en la siguiente tabla se describe el funcionamiento de los mismos

**Tabla 2.3. Funcionamiento de los leds.**

| <b>Modo de funcionamiento</b>                  | <b>Led rojo</b> | <b>Led verde</b> |
|--|-----------------|------------------|
| modo calibración (subir)                       | Encendido       | Apagado          |
| modo calibración (bajar)                       | Apagado         | Encendido        |
| modo automático (espera pulsar inicio)         | Apagado         | Intermitente     |
| modo automático (sistema funcionando)          | Apagado         | Apagado          |
| modo automático (cambio de modo o pulsar paro) | Encendido       | Encendido        |

También se dispone de un reset, necesario en todo sistema con microcontrolador, ya que el sistema puede entrar en un estado desconocido y operar incorrectamente. La aplicación de un reset a la entrada del microcontrolador, lleva a éste a un estado conocido y, por lo tanto, podrá operar según los algoritmos de programación.

#### b) Firmware de control

El firmware consta de dos archivos principales, main.c y m430.c (ver anexos) más los archivos necesarios para la configuración del compilador, linker y debugger. El programa consta principalmente de una máquina de estados y una serie de funciones e interrupciones necesarias para el funcionamiento del sistema.

A continuación se analizan brevemente los dos archivos principales.

- main.c

La rutina principal del programa se encarga de decidir qué hacer en cada momento dependiendo del estado en el que se encuentre.

- m430.c

En este archivo se encuentran las funciones de control y definición de constantes y variables usadas.

Las funciones más importantes del programa son:

- Configura() : Esta función se encarga de realizar la configuración inicial del microcontrolador. Por ejemplo, se configuran los puertos de entrada/salida, las diferentes variables del sistema así como las interrupciones usadas.
- subir\_motor() : Esta función se encarga de generar la secuencia de salida necesaria para que los motores giren en sentido ascendente, además de controlar el número de pasos y la activación de los motores.
- bajar\_motor() : Esta función realiza la misma tarea que la función anterior salvo por el sentido de giro de los motores, que es el contrario.

## Capítulo 3. Fabricación

Una vez explicado el diseño del sistema se procede a describir su proceso de fabricación.

En este capítulo se describen los diversos procesos de fabricación que se han realizado para poder llevar a cabo el diseño de la bomba. Primero se describen los procesos de fabricación de la parte electrónica, después se describen los procesos de fabricación de la parte microfluídica, y por último se describe el montaje del sistema completo.

### 3.1. Fabricación electrónica

En ésta sección se explica con detalle el proceso llevado a cabo para realizar la solución propuesta, pasando por las fases de diseño del esquemático, rutado del circuito impreso, fabricación del circuito impreso y montaje de los componentes.

#### 3.1.1. Esquemático

Para la realización de este apartado se hace uso del software CadSoft EAGLE PCB. A continuación se describe cómo se realiza el esquemático y cómo finalmente queda todo conectado:

##### a) Circuito de alimentación

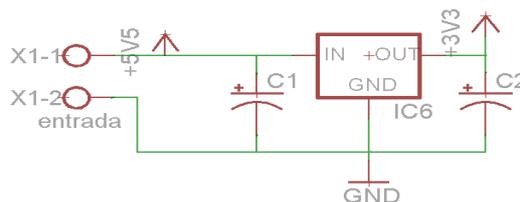


Figura 3.1. Esquemático del bloque de alimentación del PCB.

Como se comentó en el apartado de diseño se emplea un regulador de tensión para obtener las tensiones de 5.5 y 3.3 V que se usan en el circuito. Los condensadores C1 y C2 a la entrada y salida del regulador (condensador electrolítico de 10  $\mu$ F), son necesarios para un buen filtrado de la tensión.

b) Microcontrolador

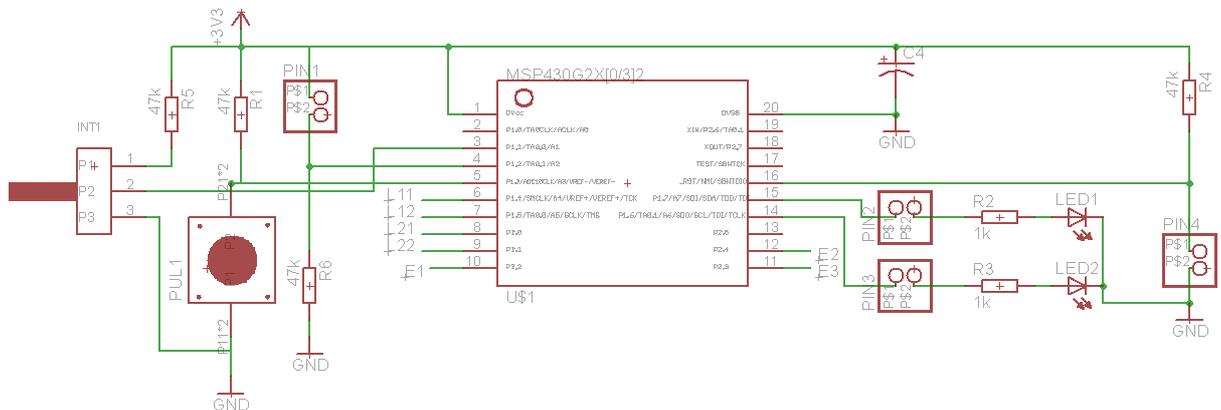


Figura 3.2. Esquemático del bloque del microcontrolador.

En el esquemático se observan las conexiones realizadas en el microcontrolador. El microcontrolador está alimentado a 3.3V. Entre su pin de alimentación (VCC pin 1) y pin de tierra (GND pin 20) se coloca un condensador para estabilizar la tensión de entrada. Los pines de entrada del microcontrolador son los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Configuración pines de entrada del microcontrolador.

| Nombre pin en MSP430 | Número pin en MSP430 |
|----------------------|----------------------|
| P.1.1                | 3                    |
| P1.2                 | 4                    |
| P1.3                 | 5                    |
| RST                  | 16                   |

Al pin 3 se conecta un interruptor que se encarga de seleccionar el sentido de giro de los motores.

El pin 4 se conecta a tierra (GND) mediante una resistencia de pull-down, y a alimentación mediante un jumper. Este pin será el encargado de seleccionar el modo de funcionamiento.

El pin 5 se conecta a un pulsador que es el encargado de iniciar y parar el sistema.

Finalmente, el pin 16 es el reset del microcontrolador, conectado a alimentación mediante una resistencia, y a tierra mediante un jumper.

A continuación se muestran los pines de salida.

**Tabla 3.2. Configuración pines de salida del microcontrolador.**

| Nombre pin en MSP430 | Número pin en MSP430 |
|----------------------|----------------------|
| P1.4                 | 6                    |
| P1.5                 | 7                    |
| P2.0                 | 8                    |
| P2.1                 | 9                    |
| P2.2                 | 10                   |
| P2.3                 | 11                   |
| P2.4                 | 12                   |
| P1.6                 | 14                   |
| P1.7                 | 15                   |

Los pines 6, 7, 8 y 9 (L11, L12, L21 y L22 respectivamente) se conectan con las entradas de los puentes en H y son los encargados de generar las secuencias de funcionamiento de los motores paso a paso.

Los pines 10, 11 y 12 (E1, E3 y E2 respectivamente) se conectan con las entradas de la puerta OR y son los encargados de activar o desactivar los pines de habilitación de los puentes en H.

Finalmente en los pines 14 y 15, se conectan dos leds que se usan para comprobar en qué estado se encuentra el sistema y detectar posibles fallos.

Las resistencias R1, R4, R5 y R6 tienen el valor de 47 kΩ y se usan como resistencias de pull up/down, mientras que las resistencias R2 y R3 tienen el valor de 1 kΩ y se usan para conectar los leds.

c) Circuito control de modo

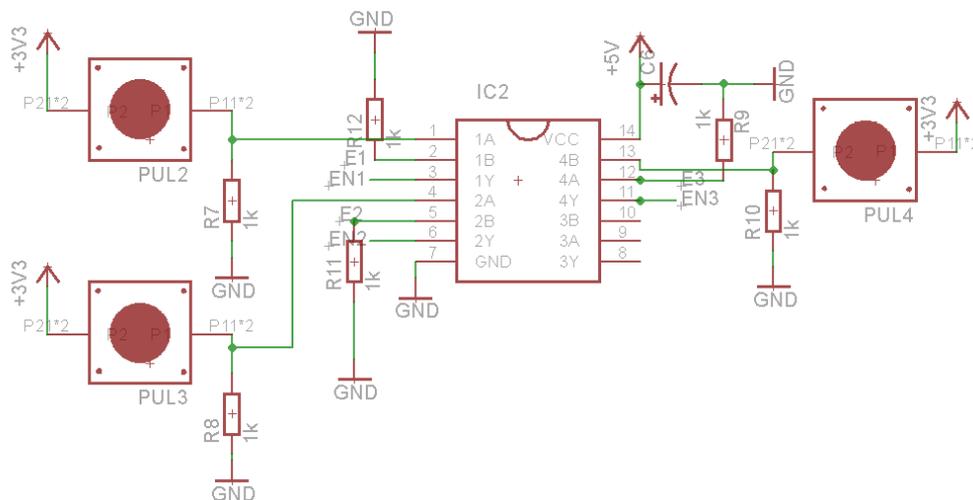


Figura 3.3. Esquemático del circuito de control de modo.

Este circuito se emplea para poder activar de forma manual los motores paso a paso y calibrar su altura, ya que las salidas de la puerta OR (pines 3, 6 y 11) están conectadas con los pines de habilitación de los diferentes puentes en H. Las entradas de la puerta OR están conectadas a las señales de activación procedentes del microcontrolador (E1, E2 y E3), y a tres pulsadores, por lo tanto para activar la salida de la puerta OR se debe pulsar alguno de los pulsadores, si está en modo de calibración, o se encarga el microcontrolador, si está en modo automático.

La puerta OR está alimentada a 5.5V, se emplea también un condensador de 100 nF conectado entre los pines de alimentación (VCC) y tierra (GND), mientras que, las resistencias R7, R8, R9, R10, R11 y R12 tienen el valor de 47kΩ y se emplean como resistencias de pull-down.

d) Circuito controlador del motor

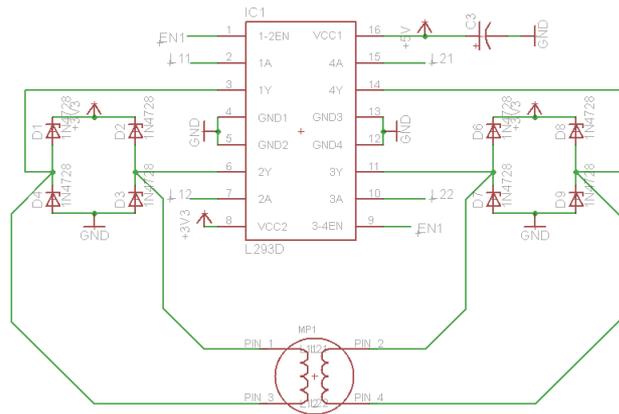


Figura 3.4. Esquemático del circuito controlador del motor.

Por último se utiliza un montaje como el que se muestra en la *Figura 3.4* por cada motor. El montaje consta de un puente en H, cuyas entradas están conectadas a las salidas del microcontrolador, que se encargan de generar la secuencia de funcionamiento (L11, L12, L21, L22). Los dos pines de habilitación (pines 1 y 9) de los que dispone el puente en H están conectados entre sí, y a su vez, a la salida de la puerta OR correspondiente, que será la encargada de activar el motor. Finalmente, las salidas del puente en H se conectan a cada una de las bobinas del motor paso a paso.

El puente en H dispone de dos alimentaciones, una de 5.5V que se utiliza para alimentar al motor paso a paso y la alimentación de la lógica (3.3V). También se utilizan ocho diodos, cuatro por cada bobina del motor paso a paso, para protegerlo contra posibles picos de corriente inversa.

### 3.1.2. Layout

Una vez conectados todos los componentes en el esquemático se comienza con el rutado de las pistas.

Primero se lleva a cabo un placement que optimice el rutado, es decir, se deben organizar los componentes de manera que las pistas que se ruten después sean lo más cortas posibles, se generen el menor número de vías y que el PCB quede lo más compacto posible. Para este PCB solo se utilizan dos capas que son “Top” y “Bottom” para la instalación de componentes y pistas. Como detalle, es importante indicar que todos los componentes van sobre la cara superior del PCB.

Por último, y antes de empezar el rutado, se deben crear las reglas de diseño que se deben cumplir. Se deben ajustar parámetros como el ancho de las pistas, distancia entre componentes, tamaño de las vías, taladros, etc. A continuación se enumeran los puntos más importantes sobre el diseño de esta placa:

- Se mantendrá un ancho de pista constante de 0.8mm. Habitualmente se dejan pistas más anchas para las corrientes de alimentación, pero en estos casos en los que se se trata siempre con muy pocos miliamperios, no es necesario.
- La separación entre pistas (llamado habitualmente por su nombre inglés clearance) será de 0.6mm.
- Se realizará un plano (polygon) en la cara inferior (bottom) que cubra toda la cara de las pistas. Esta medida acelera mucho el tiempo de atacado de la placa y así evita el mantenimiento de la placa mucho tiempo en el ácido. También es conveniente hacerlo para reducir la resistencia entre todos los puntos que están conectados a la tierra del circuito.
- Los componentes discretos tendrán pines (pads) redondos de un diámetro desde 0.6 mm hasta 1.1 mm. Las vías tendrán un diámetro de 0.6 mm.
- Para los componentes integrados (en general en encapsulado DIP) se utilizan zócalos con pads de 0.8 mm de diámetro.

También se debe dejar espacio suficiente para colocar cuatro taladros que servirán para llevar a cabo el montaje completo de la bomba.

El rutado de las pistas principales se realiza de forma manual. Después se utiliza la herramienta de rutado automático de la que dispone Eagle. Esta herramienta da la posibilidad de elegir entre varios diseños, y por tanto se escoge aquel que genera el menor número de vías y el rutado de pistas menos complejos.

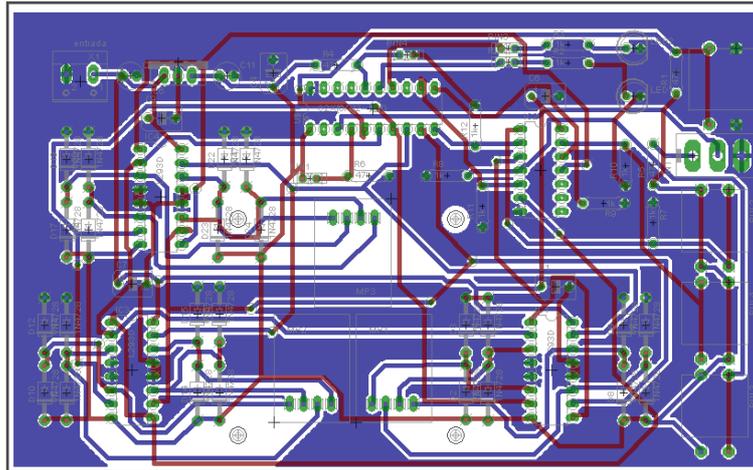


Figura 3.5. Rutado completo de la placa PCB.

Las pistas de color rojo son las que se encuentran en la cara superior de PCB y las azules las que están en la cara inferior.

### 3.1.3. Construcción PCB

Una vez finalizado el proceso de rutado, se deben generar las máscaras necesarias para la fabricación del PCB.

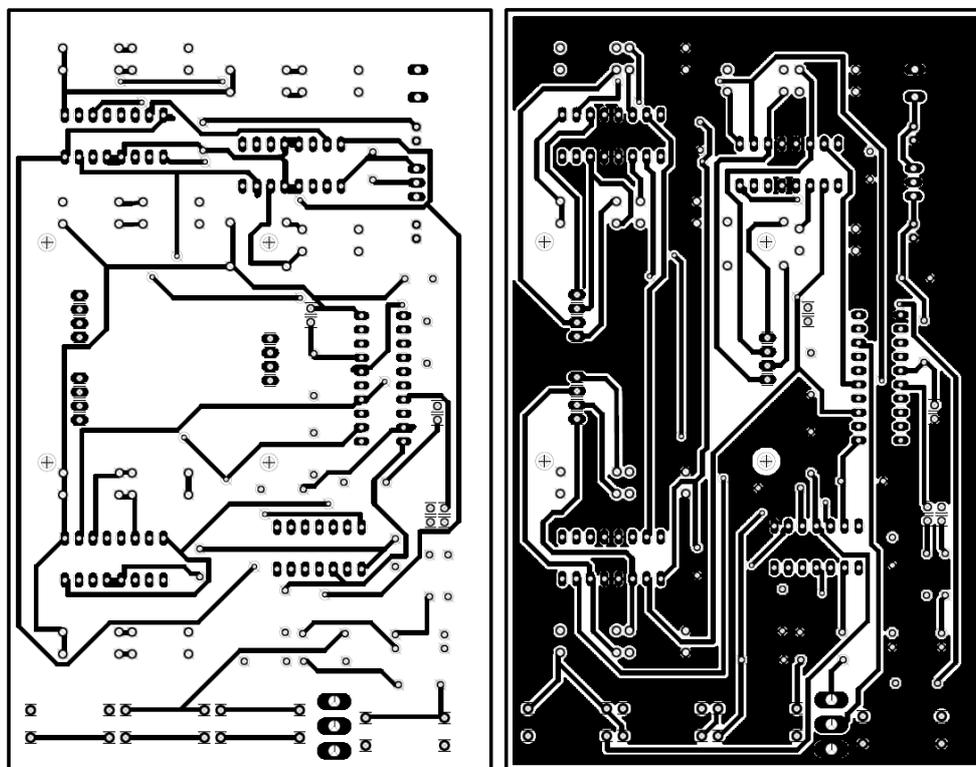


Figura 3.6. Máscaras cara superior e inferior.

Estas máscaras se imprimen sobre papel vegetal. Una vez impresas se recortan dejando un borde de aproximadamente 2 cm a su alrededor. También se recorta un trozo de PCB de doble cara del mismo tamaño que las máscaras. Después se alinea la máscara superior e inferior fijándolas con un fiso, se introduce el PCB (después de retirarle la pegatina azul de protección) entre ambas y se introduce en la insoladora durante dos minutos y medio.

Después de este proceso hay que revelar la placa, para lo cual se sumerge en una cubeta donde se ha vertido líquido revelador. El revelador eliminará la fotorresina expuesta a los rayos ultravioletas de la insoladora, para que en la parte insolada no haya cobre (placas fotosensibles positivas).

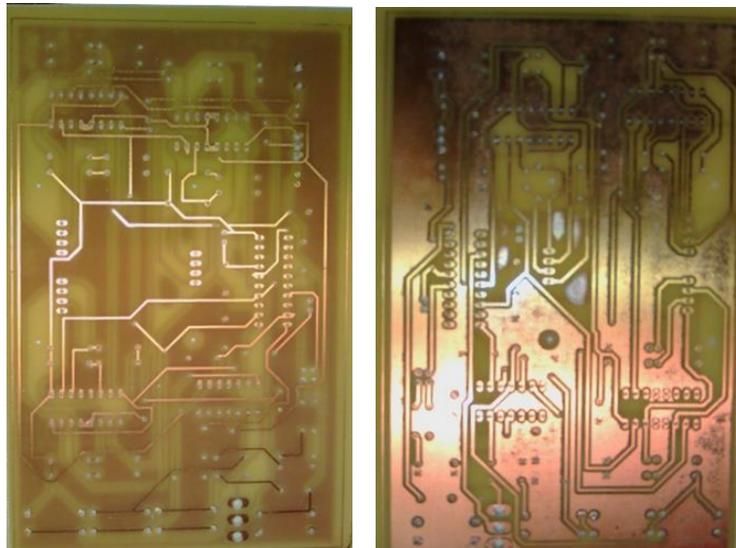
Una vez revelada, se prepara la solución de ataque al cobre. El cobre está expuesto donde se ha eliminado la resina. La solución tendrá:

- 1 parte de solución de agua fuerte (ácido clorhídrico diluido).
- 1 parte de agua oxigenada (peróxido de hidrógeno).
- 2 partes de agua.

Cada parte se toma como 25 mililitros.

La solución se vierte en una cubeta y se introduce la placa. Se observa cómo se va eliminando el cobre poco a poco. A medida que la solución se va volviendo azul por la disolución efervescente del cobre. Cuando todo el cobre esté eliminado habrá terminado el ataque.

Se limpia la placa con agua y el resultado que se obtiene es el siguiente:



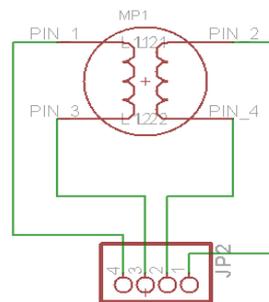
**Figura 3.7. Máscaras cara superior e inferior.**

Con el PCB ya construido y tras comprobar que no tiene ningún error de fabricación ni ninguna pista cortocircuitada, se da comienzo la fase de montaje.

### 3.1.4. Conectores de los motores paso a paso

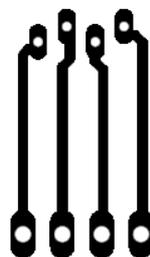
Antes de comenzar con el montaje de la placa PCB, es necesario realizar un conector para los motores paso a paso. De esta forma si el motor falla es fácilmente reemplazable. Dicho conector, a su vez servirá para colocar los motores en posición vertical, También es necesario fabricar una pieza que será la encargada de ejercer presión sobre las membranas de la bomba.

Para fabricar el conector se siguen los pasos anteriormente comentados. Lo primero es realizar un esquemático, que en este caso solo contendrá un motor y una tira de 4 pines.



**Figura 3.8. Esquemático para el conector del motor.**

Tras realizar un sencillo rutado de las pistas se obtiene la máscara que se utilizará en su fabricación.



**Figura 3.9. Máscara para el conector del motor.**

Además se usa un PCB flexible, debido a que los pines del motor paso a paso son demasiado pequeños y no consiguen atravesar el PCB rígido.

El motor está apoyado sobre dos pequeñas placas PCBs. La inferior de aproximadamente 1 x 1.5 cm, y la superior de aproximadamente 1 x 1 cm.

La pieza que ejerce presión sobre las membranas de las cámaras se fabrica con una impresora 3D (ver anexos), intentando que tenga las dimensiones más reducidas posible para que no interfieran entre sí a la hora de colocarlos en la placa y que además se ajuste a las dimensiones del motor.

En el extremo de la pieza que está en contacto con la membrana de la cámara se coloca un plunger de una jeringa de 0.5 ml, que coincide con las dimensiones del diámetro de la cámara. Inicialmente el extremo de la pieza se fabricó en 3D, pero en los resultados experimentales destruyó algunas membranas y por este motivo se optó por usar este elemento. Una vez montado el conector se obtiene el siguiente resultado.



**Figura 3.10. Resultado final del conector.**

### 3.1.5. Resultado final de la parte electrónica

Con todos los componentes disponibles y el PCB fabricado se comienza la fase de montaje.

El primer paso es soldar los componentes y el orden seguido a la hora de soldar los componentes es el siguiente. Primero se sueldan las vías. A continuación, todas las resistencias, condensadores, pulsadores, jumpers, zócalos y leds comenzando por los componentes de menor altura hasta llegar a los componentes de mayor altura. Después se colocan los circuitos integrados, motores paso a paso y jumpers en su lugar correspondiente.

Siguiendo estos pasos se termina con el montaje de todos los componentes. Se obtiene el siguiente resultado:

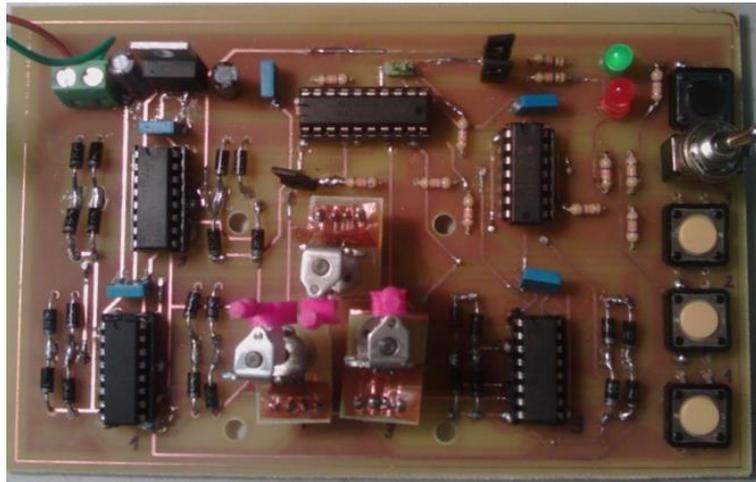


Figura 3.11. Placa PCB terminada.

Se muestra una aclaración de donde están finalmente situados cada uno de los puntos importantes de la placa PCB:

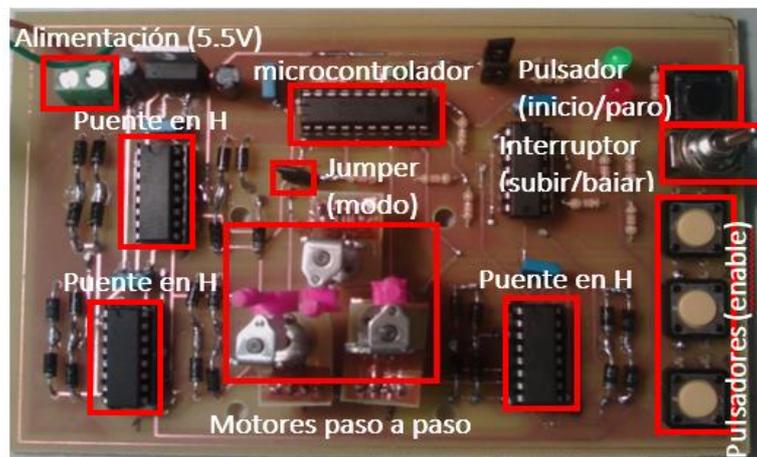


Figura 3.12. Componentes principales de la placa PCB.

## 3.2. Fabricación microfluídica

En este apartado se describen todos los pasos necesarios para llevar a cabo la fabricación de la estructura de PDMS con el diseño de la bomba.

Lo primero que se realiza es la fabricación de la máscara con la estructura de la bomba. Después se describe el proceso de fabricación del molde en SU-8 necesario para fabricar la estructura de PDMS. Y por último, el proceso de fabricación de la estructura de la bomba en PDMS.

Todos los procesos de fabricación se llevan a cabo en la sala blanca de la universidad donde existe un ambiente controlado con baja concentración de contaminantes.

### 3.2.1. Fabricación máscara

En este apartado se detalla el proceso utilizado para fabricar la máscara que conformará la estructura principal en SU-8 de las cámaras y microcanales de la bomba peristáltica, a través del Photoplotter.

Para fabricar la máscara, primero hay que diseñar las cámaras, microcanales y puertos de entrada y salida con las dimensiones deseadas, mediante L-Edit. Este software se utiliza para diseñar layouts de circuitos integrados y es útil también para el diseño de máscaras en microsistemas.

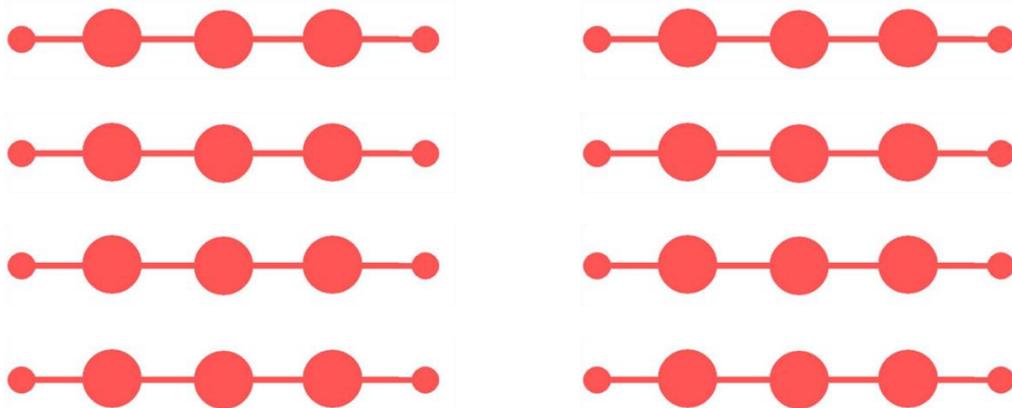


Figura 3.13. Diseño de la máscara mediante el software L-Edit.

Como el SU-8 es una resina negativa se elimina toda aquella área donde no le incide la luz. De manera que si se pretende fabricar un molde de SU-8 con la estructura negativa a la que se requiere deberá realizarse una máscara negativa. Es decir, la parte dibujada (color rojo en la Figura 3.13) será en realidad la parte transparente de la máscara, mientras que la parte no dibujada (fondo blanco) deberá corresponder con el área negra de la máscara. Por lo tanto, en la fase de impresión se le debe dar la orden de transferir al fotolito la imagen inversa al dibujo realizado en el L-Edit. Se imprime por tanto el negativo del dibujo.

Tras diseñar la máscara se deben realizar unos pasos intermedios para obtener el formato de archivo necesario para que el Photoplotter, encargado de revelar y fabricar la máscara trabaje adecuadamente.

El software L-Edit exporta el archivo en formato GDS y esta extensión se convertirá a .GERBER mediante el software Linkcad. Esta nueva extensión es convertida a FPF mediante el software Convert Gerber into FPF.

Una vez configurado el Photoplotter y antes de continuar, se apagan todas las luces, incluido el monitor del ordenador, y se enciende una luz verde especial que no afectará al fotolito donde se graba la máscara.

Se recorta un trozo cuadrado de fotolito de aproximadamente 10 centímetros de lado, que es la dimensión de la máscara, y se pega al torno del Photoplotter usando cinta adhesiva, con la cara oscura del fotolito hacia fuera.

Tras cubrir el torno del Photoplotter con su tapa protectora que evita el deterioro del fotolito debido a la luz externa, se enciende el monitor del PC y se ejecuta la orden que da comienzo al proceso de revelado de la máscara.

Una vez finalizado el Photoplotter (proceso que dura aproximadamente 40 minutos para la resolución seleccionada) y con la luz blanca apagada, se saca el fotolito del Photoplotter y se introduce en una bandeja que contiene revelador concentrado Kodak RA-2000. Se mantiene sumergido durante un minuto. Después de este periodo de tiempo, se introduce el fotolito en otra bandeja que contiene agua durante otro minuto. Finalmente, se introduce durante cinco minutos en otra bandeja que contiene fijador Kodak RA-3000. Tras este proceso se obtiene el fotolito con la máscara diseñada. Solo queda limpiarla, enjuagarla en agua y dejarla secar.

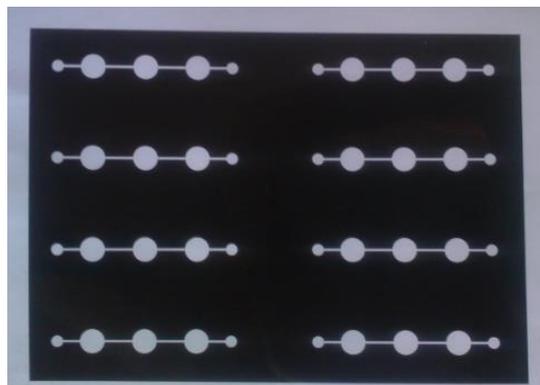


Figura 3.14. Resultado de fabricación de la máscara.

### 3.2.2. Fabricación molde

A continuación se describen los pasos realizados para la fabricación del molde en SU-8. En primer lugar se corta la placa de PCB, que se va a utilizar como sustrato para el molde en SU-8. El siguiente paso es limar los bordes de la placa para evitar irregularidades que puedan haber aparecido con la sierra, quitar la pegatina protectora y limpiar la placa con acetona.

Una vez lista la placa PCB se procede a la fabricación del molde en SU-8. En primer lugar se crea una capa semilla de SU-8 que servirá de soporte para el resto del molde aumentando la adherencia entre el SU-8 estructural y el FR4. Para ello se configura el spin coater a 2500 rpm y se deposita SU-8 2050. Tras este paso se realiza un softbake de 5 minutos a 65 °C y 15 minutos a 95 °C usando el hotplate. A continuación, se deja enfriar y usando la insoladora, se expone a luz ultravioleta en 10 repeticiones de 30 segundos dejando 10 segundos de descanso entre repeticiones. Este paso es necesario para mantener la capa semilla. Cuando el SU-8 se expone a la luz ultravioleta se mantiene tras el revelado, es decir el SU-8 se polimeriza gracias a la luz ultravioleta. Tras este paso se realiza un post-exposure bake (PEB) de 2 minutos a 65 °C y 3 minutos a 95 °C, y después se deja enfriar.

Una vez acabada la capa semilla se realizan dos capas más. Estas capas darán lugar a los microcanales, cámaras y puertos. Se repite dos veces el mismo flujo de procesos usado para realizar la capa semilla, es decir, deposición, softbake y PEB. Esta vez se configura el spin coater a 700 rpm, que equivale a 150 µm, y se deposita SU-8 2050. El primer softbake que se realiza es de 5 minutos a 65 °C y 15 minutos a 95 °C, y el segundo, de 5 minutos a 65 °C y 60 minutos a 95 °C. Lo siguiente es dejar enfriar la placa para más tarde exponerla en la insoladora, usando la máscara fabricada anteriormente. Esta vez la exposición es de 20 segundos, durante 8 veces, dejando descansos de 10 segundos. A continuación, es necesario realizar un PEB de 5 minutos a 65°C y 7 minutos a 95°C. Después, se deja enfriar de nuevo y se sumerge en revelador MRV600 durante aproximadamente 6 minutos para eliminar el SU-8 que no ha sido expuesto a la luz ultravioleta. Tras este período de tiempo, se enjuaga con Isopropanol (IPA) y se deja secar.

Tabla 3.3. Protocolo de fabricación del molde.

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Preparación PCB              | Cortar placa                                    |
|                              | Limar bordes                                    |
|                              | Limpiar con acetona                             |
| Capa semilla                 | Deposición: SU-8 2050 2500 rpm                  |
|                              | Softbake: 5 min a 65°C y 15 min a 95°C          |
|                              | Dejar enfriar                                   |
|                              | Insolar: 10 veces 30s con descansos de 10s      |
|                              | Post-exposure bake: 2 min a 65°C y 3 min a 95°C |
|                              | Dejar enfriar                                   |
| Capas microcanales y cámaras | Deposición: SU-8 2050 700 rpm                   |
|                              | Softbake: 5 min a 65°C y 15 min a 95°C          |
|                              | Dejar enfriar                                   |
|                              | Deposición: SU-8 2050 700 rpm                   |
|                              | Softbake: 5 min a 65°C y 15 min a 95°C          |
|                              | Dejar enfriar                                   |
|                              | Insolar: 8 veces 20s con descansos de 10s       |
|                              | Post-exposure bake: 5 min a 65°C y 7 min a 95°C |
|                              | Dejar enfriar                                   |
| Revelado                     | Revelar: MRV 600 6 min                          |
|                              | Limpiar con IPA                                 |
|                              | Secar   |

### 3.2.3. Fabricación PDMS

Una vez fabricado el molde de SU-8 se comienza con la fabricación del PDMS.

El primer paso es preparar las dos mezcla de PDMS a partir de los sus dos elementos necesarios. Por tanto se mezcla el prepolímero con el agente curante. La proporción de la mezcla hará que se cure más o menos rápidamente según interese. La primera se mezcla en una proporción 1:10 y la segunda en proporción 1:20, es decir, la primera mezcla contiene 30 gramos de polímero y 3 gramos de agente curante y la segunda contiene 4 gramos de polímero y 0.4 gramos de agente curante. Estas cantidades se fijan a partir de las dimensiones del molde que se ha fabricado previamente. Para medir las cantidades necesarias de material se utiliza una balanza de precisión.

Una vez realizadas ambas mezclas sobre unas navecillas, se remueven con una varilla durante unos minutos para intentar que la mezcla sea lo más homogénea posible. Después hay que eliminar las burbujas que pueda contener el material. Para ello se introducen las mezclas en un recipiente hermético conectado a una bomba de vacío durante unos 45 minutos aproximadamente.

Una vez eliminadas las burbujas se vierte la mezcla con proporción 1:10 sobre el molde, que se recubre completamente con papel de aluminio para evitar que el PDMS se derrame. Tras verterlo, con una aguja limpia se pinchan todas las burbujas que puedan aparecer, y la mezcla con proporción 1:20 se deposita sobre una placa de vidrio que está colocada en el Spin Coater. Se programa el Spin Coater a 700 rpm durante 60 segundos, que equivale a un espesor aproximado de 150  $\mu\text{m}$ . Una vez depositado el PDMS, se pinchan con una aguja limpia las burbujas que puedan aparecer para evitar irregularidades en la superficie del PDMS.

Después se introducen ambas mezclas en el horno a 65°C. Transcurridos 45 minutos se saca del horno la mezcla con proporción 1:10 y se desmolda. Una vez que se ha desmoldado el PDMS se atraviesan mediante un punzón circular todos los puertos del dispositivo, para poder tener acceso después a las cámaras y microcanales.

El siguiente paso consiste en la unión entre el dispositivo desmoldado y el PDMS depositado sobre la placa de vidrio, para ello, se saca del horno la placa de vidrio y sobre ella se coloca el dispositivo de PDMS, con los microcanales y

cámaras hacia abajo. Después se deja curar todo junto en el horno durante otros 45 minutos.

**Tabla 3.4. Protocolo de fabricación del PDMS.**

|                  |  |
|------------------|--|
| Fabricación PDMS | Preparar la mezcla 1:10 (30 g y 3 g).  |
|                  | Preparar la mezcla 1:20 (4 g y 0.4 g).   |
|                  | Dejar en el desecador durante 45 min aprox. en vacío.                                  |
|                  | Verter la mezcla 1:10 sobre el molde.  |
|                  | Depositar el PDMS 1:20 sobre el vidrio (Spin Coater a 700 rpm).                        |
|                  | Meter en el horno a 65°C.  |
|                  | Después de 45 min desmoldar.   |
|                  | Abrir los puertos de entrada y salida.   |
|                  | Sacar del horno la deposición de PDMS y depositar sobre éste la estructura desmoldada. |
|                  | Dejar curar junto otros 45 min dentro del horno.                                       |

### 3.3. Montaje completo

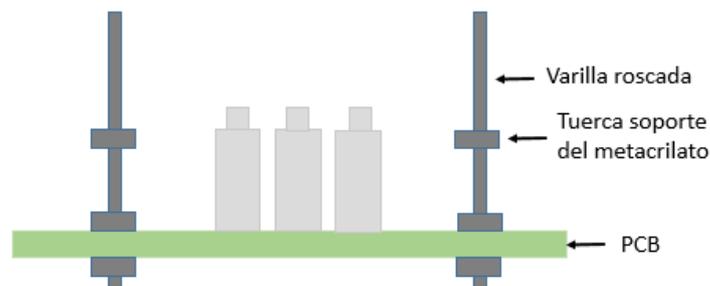
Una vez fabricada la placa de PCB y la estructura con las cámaras, puertos y microcanales en PDMS, se comienza con el montaje del sistema completo.

Para realizar dicho montaje es necesario fabricar dos placas más. Esta vez el material que se utiliza es metacrilato. Una de las placas se utiliza como base para apoyar la estructura de PDMS, y la otra, se coloca encima del PDMS y sirve para mantenerlo unido a la base, para que los motores puedan presionar las cámaras.

También son necesarias 4 varillas roscadas de 3 mm de diámetro y 8 centímetros de longitud aproximadamente, y 16 tuercas. Todo esto se emplea

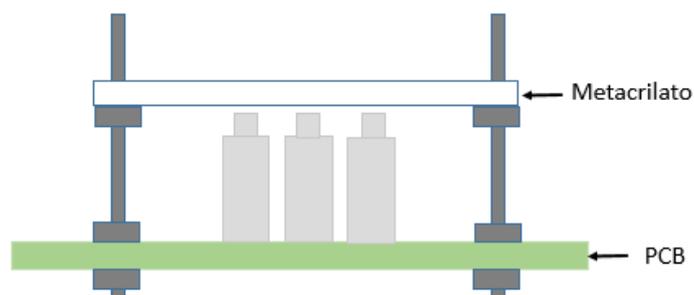
para unir la placa PCB con la estructura PDMS (parte electrónica y microfluídica).

El primer paso del montaje es colocar las 4 varillas roscadas en la placa PCB con 8 tuercas (2 arriba y 2 debajo de la placa PCB), y 4 tuercas más, que servirán como soporte a la placa inferior de metacrilato.



**Figura 3.15. Sección transversal del montaje completo: Colocación de las varillas roscadas.**

El siguiente paso es colocar la placa de metacrilato que sirve como soporte al circuito microfluídico. Para fabricar esta placa se recorta un cuadrado de metacrilato de 5 x 5 cm aproximadamente, y utilizando una de las máscaras usadas para fabricar el PCB (ver Figura 3.6), se marca en la placa de metacrilato los cuatro taladros correspondientes a las cuatro varillas roscadas. Se realizan los taladros usando una broca del 3/5, y después se coloca la placa de metacrilato sin que toque con los motores paso a paso. Para ello se ajustan las tuercas que sirven de soporte.

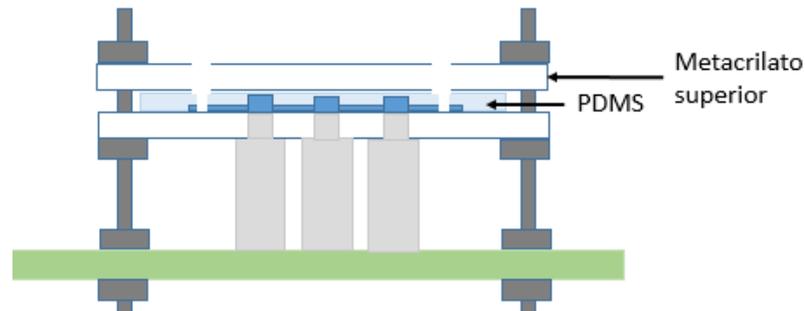


**Figura 3.16. Sección transversal del montaje completo: Colocación placa inferior de metacrilato.**

Con la placa de metacrilato colocada, se marcan los taladros correspondientes con los motores paso a paso

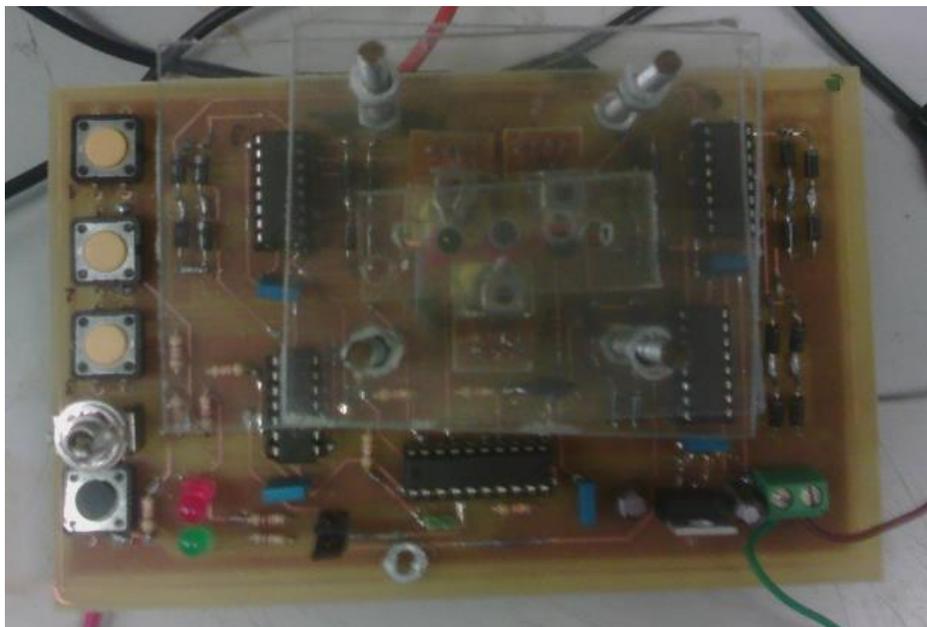
Tras realizar dichos taladros, se coloca la placa de metacrilato y la estructura de PDMS, haciendo coincidir las cámaras con los taladros correspondientes a

los motores. Después se coloca la placa de metacrilato superior, dicha placa tiene las mismas dimensiones que la placa inferior y también se le realizan los cuatro taladros correspondientes a las varillas roscadas.

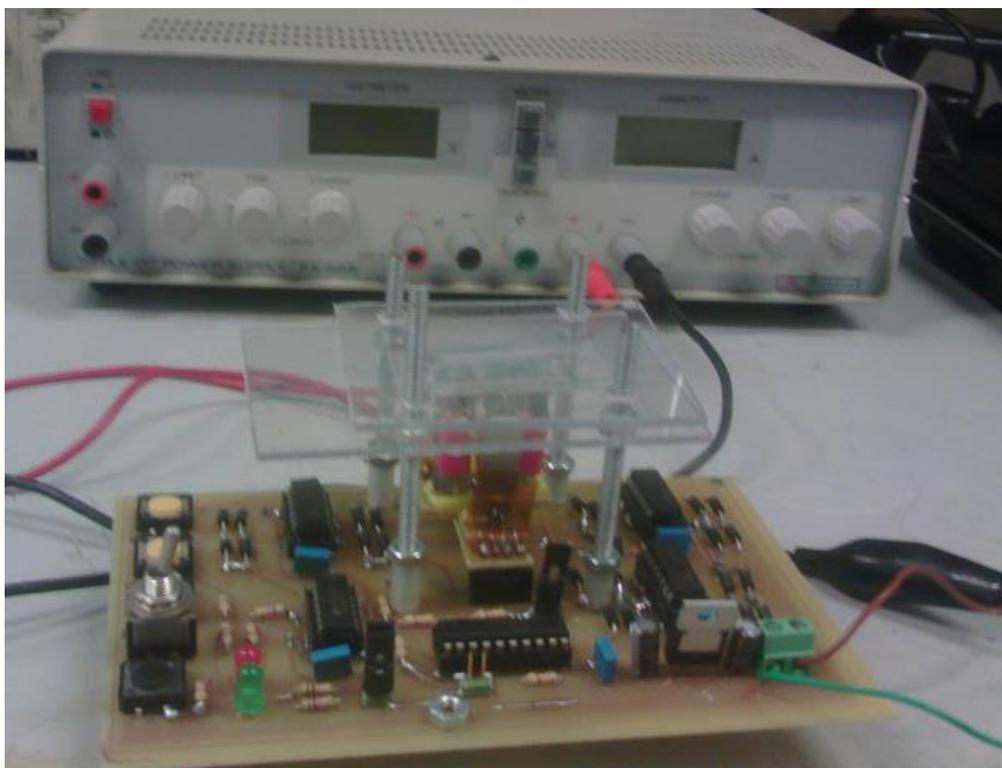


**Figura 3.17. Sección transversal del montaje completo: Resultado final.**

Una vez colocada, se marca la posición de los puertos de entrada y salida, y se taladran usando la misma broca. Después se vuelve a poner en su lugar y se colocan las últimas cuatro tuercas que sirven para mantener el sistema unido. El resultado final se muestra a continuación:



**Figura 3.18. Montaje completo. Vista superior.**



**Figura 3.19. Montaje completo. Vista frontal.**

## Capítulo 4. Pruebas de funcionamiento

En el presente capítulo se va a realizar una descripción de las pruebas realizadas a la bomba peristáltica. En el primer apartado se enumeran los equipos y materiales necesarios para realizar las pruebas, así como el procedimiento necesario para realizarlas. En el segundo apartado se muestran y analizan los resultados obtenidos.

### 4.1. Montaje experimental y procedimiento

Para realizar las pruebas es necesario utilizar equipos y materiales de trabajo tales como;

- Una fuente de alimentación, necesaria para generar la tensión de 5.5 V.
- Dos cables banana cocodrilo, necesarios para conectar la alimentación procedente de la fuente en la placa.
- Tinta, es el líquido utilizado para bombear desde el puerto de entrada hasta el de salida.
- Una pipeta, usada para trabajar con las pequeñas cantidades de líquido.
- Una cámara de video para poder grabar los resultados.

Una vez enunciados los equipos y materiales necesarios se describe el procedimiento seguido para realizar las pruebas sobre el sistema.

El primer test que se realiza es la verificación del movimiento de la tinta debido al funcionamiento de la bomba peristáltica. Para ello se debe realizar el montaje del sistema. A continuación se enumeran los pasos a seguir:

1. Alimentación de la placa (5.5 V).

2. Ajustar la posición de los motores paso a paso, para ajustarlos el jumper de modo (ver Figura 3.12) debe estar quitado, así el sistema entra en modo de calibración. Esto se puede comprobar observando los leds, ya que uno de ellos se debe encontrar encendido. Dependiendo del estado en el que se encuentre el interruptor encargado del sentido de giro (subir/bajar ver Figura 3.12). La posición de los motores se ajusta para que los tres queden alineados a la misma altura, que es el borde superior de la placa inferior de metacrilato. Por lo tanto los tres motores se colocan al nivel del borde superior sin atravesarlo, ya que en ese caso presionarían las membranas de las cámaras.



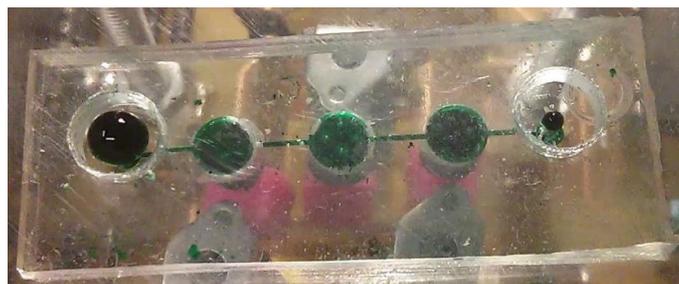
**Figura 4.1. Alineación motores paso a paso.**

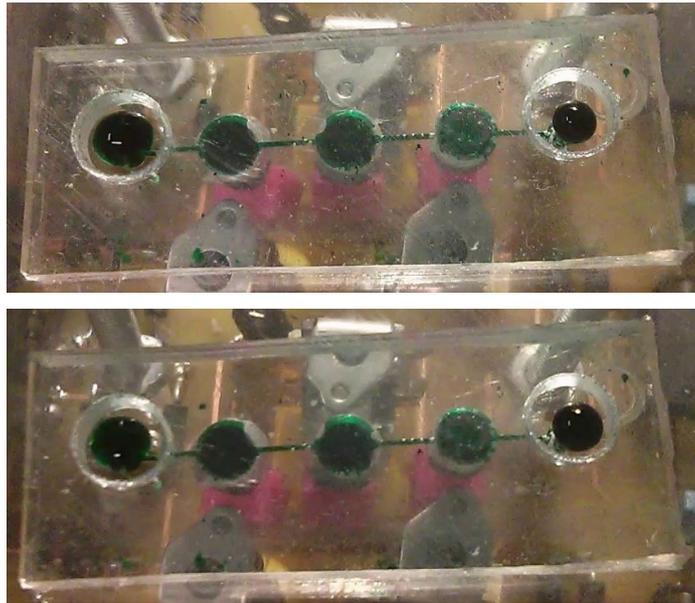
En la Figura 4.1 se observa un ejemplo de la posición de los motores paso a paso. Los motores uno y dos se encuentran en su posición correcta, mientras que el motor tres es necesario ajustarlo para que no sobrepase el metacrilato. Para ajustar los motores es necesario pulsar el botón de enable correspondiente al motor que se desee mover, y ajustar el sentido, en función de la posición en la que se encuentre cada motor, utilizando el interruptor encargado de ello.

3. Colocar la estructura de PDMS haciendo coincidir las cámaras con los agujeros del metacrilato inferior.
4. Cebear la bomba, es decir llenar por completo toda la estructura para eliminar el aire que se encuentra en el interior, dejando una gota de tinta en el puerto de entrada.

5. Colocar la placa de metacrilato superior y volver a colocar el jumper de modo en su posición. Una vez colocado el led verde se debe encontrar parpadeando.
6. Colocar la cámara para poder grabar el sistema en movimiento y pulsar el botón de inicio.

A continuación se muestran una serie de imágenes en las cuales se puede observar como el fluido, en este caso tinta verde, se consigue desplazar poco a poco desde el puerto de entrada al puerto de salida.





**Figura 4.2. Comprobación de funcionamiento.**

## 4.2. Caracterización

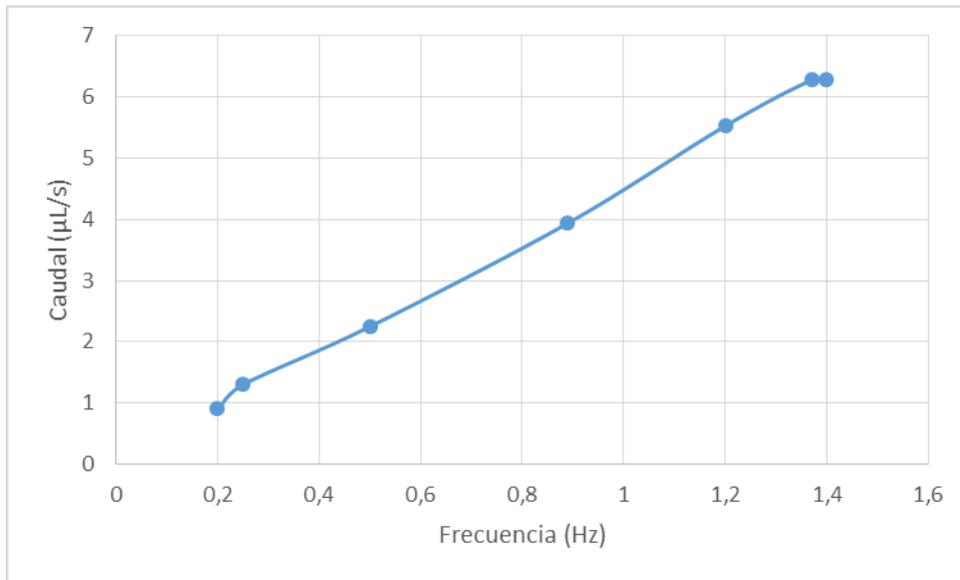
### 4.2.1. Introducción

Una vez verificado el correcto funcionamiento de la bomba se procede a su caracterización, para ello se analizan y estudian los parámetros referentes a la bomba peristáltica que se consideran de mayor influencia. Es necesario tener siempre presente las dos variables a controlar: frecuencia y caudal.

Para este análisis se varían los distintos parámetros de configuración del microcontrolador, es decir, el número de ciclos de espera entre paso y paso, con el objetivo de hallar la frecuencia óptima de funcionamiento, y el número de pasos que cada motor debe avanzar o retroceder, con el fin de presionar adecuadamente las membranas para conseguir desplazar el fluido.

Para un completo estudio es necesario grabar las pruebas realizadas para posteriormente analizar los videos con el fin de hallar el caudal y frecuencia de funcionamiento.

### 4.2.2. Curva de funcionamiento



**Figura 4.3. Caudal de la microbomba frente a la frecuencia.**

La Figura 4.3 muestra el caudal medido de la microbomba frente a la frecuencia. Se observa que el caudal aumenta a medida que aumenta la frecuencia. La frecuencia máxima alcanzada es de aproximadamente 1.4 Hz.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del análisis de los videos grabados al realizar las pruebas. En ella se observan los valores de configuración del microcontrolador. El sistema funciona para valores de la variable ciclos entre 1500 y 2500, ya que se realizaron pruebas con valores inferiores y superiores. Para los valores superiores a 25000 el sistema no funcionó debido a que los motores paso a paso se movían demasiado despacio, mientras que, para los valores inferiores a 1500, los motores paso a paso no funcionan debido a que entre paso y paso no transcurre el tiempo necesario para alcanzar la posición de equilibrio.

**Tabla 4.1. Caracterización del sistema.**

| ciclos<br>(microcontrolador) | Tiempo/frecuencia<br>(video) | Caudal   |
|------------------------------|------------------------------|----------|
| 25000                        | 5s / 0.2 Hz                  | 0.9 µl/s |
| 15000                        | 3.3s / 0.3 Hz                | 1.3 µl/s |

|      |                 |                |
|------|-----------------|----------------|
| 5000 | 2s / 0.5 Hz     | 2.25 $\mu$ l/s |
| 3500 | 1.1s / 0.9 Hz   | 3.94 $\mu$ l/s |
| 2500 | 0.8s / 1.25 Hz  | 5.53 $\mu$ l/s |
| 2000 | 0.725s / 1.4 Hz | 6.23 $\mu$ l/s |
| 1500 | 0.725s / 1.4 Hz | 6.23 $\mu$ l/s |

## Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1. Conclusiones

En este proyecto se ha diseñado y fabricado una microbomba peristáltica accionada mecánicamente. La bomba ha sido realizada utilizando PDMS para fabricar la estructura que contiene las cámaras, puertos y microcanales, el accionamiento sobre las cámaras se consigue mediante motores paso a paso, para controlarlos, se diseña y fabrica una placa PCB. Todas las fases del trabajo han sido llevadas a cabo en las instalaciones de que dispone el Departamento de Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Tras realizar pruebas y estudiar los resultados se encontró que la tasa máxima de bombeo es de aproximadamente  $6\mu\text{L/s}$ , ésta tasa se obtiene a una frecuencia en torno a 1.4 Hz. El consumo de energía de la microbomba es de 150mA.

#### 5.1.1. Aplicaciones al sistema de tres motores

El sistema de tres motores puede ser utilizado también para impulsar muestras líquidas de forma discreta, y configurar de esa forma el movimiento de líquidos dentro de un Lab on chip.

#### 5.1.2. Aplicaciones

Algunas de las posibles aplicaciones para la bomba peristáltica con.

- La inyección subcutánea de insulina para el cuidado de la diabetes.

- Transportar agua desionizada y sangre entera para administrar solución salina fosfatada (PBS) en la vena de una rata, simulando así las inyecciones de insulina para la diabetes.

## 5.2. Trabajos futuros

Para finalizar el presente Proyecto se proponen una serie de estudios que continúan la línea de trabajo que se ha ido desarrollando en este documento. Dichos trabajos están orientados a complementar la información aquí propuesta y el análisis de futuras modificaciones.

Los desarrollos futuros que se proponen son:

- Reducir el tamaño del dispositivo, para ello se deben emplear otro tipo de componentes más pequeños o sustituirlos por componentes SMD, que además permiten usar ambas caras de la placa, así se consigue un diseño más compacto y mayor aprovechamiento del espacio.
- Diseñar un conector para los motores paso a paso que permita colocarlos alineados, sustituyendo el PCB flexible, ya que este provocó muchos problemas a la hora de soldar y realizar las pruebas.
- Otra posible mejora es sustituir los motores paso a paso por unos más pequeños, lo que reduciría el tamaño del dispositivo, esto conlleva a realizar otro diseño de la pieza encargada de ejercer presión sobre las membranas de las cámaras, la dificultad en este diseño dependerá del modelo de motor elegido.
- Incorporar sensores para conocer la posición de los motores paso a paso, lo que permitiría ajustar su posición de forma automática y con mayor precisión, además de prescindir del montaje necesario para controlar los motores de forma manual, esto también reduciría el tamaño del dispositivo.

## Bibliografía

- [1] A review of micropumps. D J Laser and J G Santiago.  
[http://microfluidics.stanford.edu/Publications/Micropumps\\_Cooling/Laser%20Review%20of%20Micropumps%20in%20JMM.pdf](http://microfluidics.stanford.edu/Publications/Micropumps_Cooling/Laser%20Review%20of%20Micropumps%20in%20JMM.pdf)
- [2] Fabrication of a peristaltic PDMS micropump. Ok Chan Jeonga, Sin Wook Park, Sang Sik Yang  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424705000579>
- [3] Fabrication of a peristaltic micro pump with novel cascaded actuators. Ok Chan Jeong and Satoshi Konishi.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/18/2/025022/meta>
- [4] The self-generated peristaltic motion of cascaded pneumatic actuators for micro pumps. Ok Chan Jeong and Satoshi Konishi.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/18/8/085017/meta>
- [5] Fabrication and drive test of pneumatic PDMS micro pump. Ok Chan Jeong and Satoshi Konishi.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424706005942>
- [6] Bidirectional pumping properties of a peristaltic piezoelectric micropump with simple design and chemical resistance. Dae-Sik Lee, Jong Soo Koa, Youn Tae Kima.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609004005796>
- [7] Novel actuation of an integrated peristaltic micropump. B. Husbanda, M. Bua, V. Apostolopoulosb, T. Melvina, A.G.R. Evansa.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167931704002345>

- [8] Investigation for the operation of an integrated peristaltic micropump. B Husband, M Bu, A G R Evans and T Melvin.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/14/9/011/meta>
- [9] A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon.  
<http://doc.utwente.nl/58971/1/Lintel88piezoelectric.pdf>
- [10] Peristaltic piezoelectric micropump system for biomedical applications. Ling-Sheng Jang , Wai-Hong Kan.  
<http://link.springer.com/article/10.1007/s10544-007-9075-1>
- [11] A Magnetically Driven PDMS Peristaltic Micropump. Pan T, Kai E, Stay M, Barocas V, Ziaie B.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1403757&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D1403757](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1403757&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1403757)
- [12] A self-priming, roller-free, miniature, peristaltic pump operable with a single, reciprocating actuator. Shkolnikov V, Ramunas J, Santiago JG.  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24672145>
- [13] L293B - Datasheet Catalog.  
[http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/L/2/9/3/L293B.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/2/9/3/L293B.shtml)
- [14] MSP430G2553 - Texas Instruments.  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>
- [15] Control de un motor paso a paso: PIC, USB y C#. <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/3547/577435.pdf?sequence=1>
- [16] Code Composer Studio™ v6.1 for MSP430™.  
<http://www.ti.com/lit/ug/slau157aj/slau157aj.pdf>

## Anexo I. Código fuente

En este anexo se adjuntan los códigos fuente de los principales ficheros utilizados para la ejecución del programa principal del dispositivo.

- **main.c**

```
#include <msp430g2553.h>
#include "m430.h"

void main(void)
{
    Configura();
}

// Rutina de Servicio de Interrupción para el Timer A0
#pragma vector=TIMER0_A0_VECTOR
__interrupt void Timer_A0 (void)
{
    // Máquina de estados:
    int final;
    switch (state_SOS)
    {

        case MODO: // Elige el modo de funcionamiento
            P1OUT &= ~led_rojo;
            P1OUT &= ~led_verde;
            final=0;
            if (!(P1IN & sel_modos)) //if sel_modos = 0
```

```

        state_SOS=MANUAL; //Modo manual calibración de los
motores
        else if (!(P1IN & boton)){
            __bic_SR_register_on_exit(LPM0_bits);
            state_SOS= INICIO;}
        else
            state_SOS=AUTO; //modo automático
break;

case MANUAL: //Elige entre subir o bajar el motor
    final = 2;
    __bic_SR_register_on_exit(LPM0_bits);
    if (!(P1IN & sel_updown)){
        state_SOS=MOTOR_DOWN;}
    else
        state_SOS=MOTOR_UP;
break;

case MOTOR_DOWN: // bajar el motor
    final= 2;
    P1OUT &= ~led_rojo;
    P1OUT |= led_verde;
    final = motor_down(man_pasos,motor_manual,final);

    if ((P1IN & sel_mod0))
        state_SOS=MODO;
    else if (!(P1IN & sel_updown))
        state_SOS=MOTOR_DOWN;
    else
        state_SOS=MANUAL;
break;

case MOTOR_UP: // Subir
    final=2;
    P1OUT |= led_rojo;
    P1OUT &= ~led_verde;
    final = motor_up(man_pasos,motor_manual,final);

    if ((P1IN & sel_mod0))
        state_SOS=MODO;
    else if (!(P1IN & sel_updown))
        state_SOS=MANUAL;
    else
        state_SOS=MOTOR_UP;
break;

case AUTO: // Modo automático
    // Espera a que se pulse el boton
    final=0;
    P1OUT |= led_verde;

    if (!(P1IN & boton)){
        __bic_SR_register_on_exit(LPM0_bits);
        state_SOS= INICIO;}
    else
        state_SOS=MODO;
break;

```

```

case INICIO: // Modo automático
    // Espera a que se pulse el boton

    P1OUT |= led_verde;
    final=0;
    if (!(P1IN & boton)){
        state_SOS=INICIO;}
    else{
        final=0;
        P1OUT &= ~led_rojo;
        P1OUT &= ~led_verde;
        final = motor_up(num_pasos,motor_1,final);

        if (final == 1){//else if (!(P1IN & boton)
|| final == 1){
            P1OUT |= led_rojo;
            P1OUT |= led_verde;

            final=motor_down(num_pasos,motor_1,final);
            state_SOS=MOD0;
        }
        else
            state_SOS=MOTOR_2;
    }
    break;

case MOTOR_1:

    final= subir_motor(num_pasos,motor_1,final);
    final= bajar_motor(num_pasos,motor_3,final);

    if (!(P1IN & sel_mod0)){
        P1OUT |= led_rojo;
        P1OUT |= led_verde;
        final =bajar_motor(num_pasos,motor_1,final);
        state_SOS=MANUAL;}
    else if (final == 1){//else if (!(P1IN & boton) || final
== 1){
        P1OUT |= led_rojo;
        P1OUT |= led_verde;
        final=bajar_motor(num_pasos,motor_1,final);
        state_SOS=MOD0;
    }
    else
        state_SOS =MOTOR_2;
    break;

case MOTOR_2:
    final=subir_motor(num_pasos,motor_2,final);
    final=bajar_motor(num_pasos,motor_1,final);
    if (!(P1IN & sel_mod0)){
        P1OUT |= led_rojo;
        P1OUT |= led_verde;
        final=bajar_motor(num_pasos,motor_2,final);
        state_SOS=MANUAL;}
    else if (final == 1){//else if (!(P1IN & boton) || final
== 1){
        P1OUT |= led_rojo;

```

```

        P1OUT |= led_verde;
        final=bajar_motor(num_pasos,motor_2,final);
        state_SOS=MODO;}
    else
        state_SOS =MOTOR_3;
break;

case MOTOR_3:
    final=subir_motor(num_pasos,motor_3,final);
    final=bajar_motor(num_pasos,motor_2,final);

    if (!(P1IN & sel_mod0)){
        P1OUT |= led_rojo;
        P1OUT |= led_verde;
        final=bajar_motor(num_pasos,motor_3,final);
        state_SOS=MANUAL;
    }
    else if (final == 1) { //else if (!(P1IN & boton) ||
final == 1) {
        P1OUT |= led_rojo;
        P1OUT |= led_verde;
        final=bajar_motor(num_pasos,motor_3,final);
        state_SOS=MODO;
    }
    else
        state_SOS =MOTOR_1;
break;
}
}
}

```

#### ▪ m430.c

```

/*
 * m430.c
 *
 * Created on: 21/5/2015
 * Author: Claudio
 */
#include <msp430g2553.h>
#include "m430.h"

int subir_motor(pasos,motor,fin)
{
    int p=0;
    int flag;
    flag=fin;
    // Todas las salidas del P1 y P2 a 0
    P1OUT &= ~salidas_p1;
    P2OUT &= ~salidas_p2;

    //Activa el enable del motor
    if (motor == 1)
        P2OUT |= enable_1;
    if (motor == 2)
        P2OUT |= enable_2;
}

```

```

if (motor ==3)
    P2OUT |= enable_3;
for(p=0; p != pasos; ){
    if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
        flag=1;
                                P1OUT |= led_rojo;
                                P1OUT |= led_verde;}

    //Paso 1 1010
/* P1OUT &= ~0x01; //P1.0 = 0
P1OUT |= 0x42; // P1.6 = 1 P1.5 = 0 P1.1 = 1 P1.0 = 0*/
P1OUT &= ~0x10;
P1OUT |= 0x20;
P2OUT |= 0x02;
p++;
_delay_cycles(ciclos);
//Paso 2 0110
if(p != pasos){
    /*P1OUT &= ~0x40; // P1.6 = 0
P1OUT |= 0x22; // P1.6 = 0 P1.5 = 1 P1.1 = 1 P1.0
= 0*/

    if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
        flag=1;
                                P1OUT |= led_rojo;
                                P1OUT |= led_verde;}

    P2OUT &= ~0x02;
    P2OUT |= 0x01;
    _delay_cycles(ciclos);
    p++;
}
//Paso 3 0101
if(p != pasos){
/* P1OUT &= ~0x02; //P1.1 = 0
P1OUT |= 0x21; // P1.6 = 0 P1.5 = 1 P1.1 = 0 P1.0
= 1*/

    if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
        flag=1;
                                P1OUT |= led_rojo;
                                P1OUT |= led_verde;}

    P1OUT &= ~0x20;
    P1OUT |= 0x10;
    _delay_cycles(ciclos);
    p++;
}
//Paso 4 1001
if(p != pasos){
/*P1OUT &= ~0x20; //P1.5 = 0
P1OUT |= 0x41; // P1.6 = 1 P1.5 = 0 P1.1 = 0 P1.0
= 1*/

    if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
        flag=1;
                                P1OUT |= led_rojo;
                                P1OUT |= led_verde;}

    P2OUT &= ~0x01;
    P2OUT |= 0x02;
    _delay_cycles(ciclos);
    p++;
}
}

```

```

    }
    P1OUT &= ~salidas_p1;
    P2OUT &= ~salidas_p2;
    return flag;
}
int bajar_motor(pasos,motor,fin)
{
    int flag;
    flag = fin;
    P2OUT &= ~salidas_p2;
    P1OUT &= ~salidas_p1;

    if (motor == 1)
        P2OUT |= enable_1;
    if (motor == 2)
        P2OUT |= enable_2;
    if (motor ==3)
        P2OUT |= enable_3;
    int p=0;

    for(p=0;p != pasos;)
    {
        if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
            P1OUT |= led_rojo;
            P1OUT |= led_verde;
            flag=1;}

        P1OUT &= ~0x20;
        P1OUT |= 0x10;
        P2OUT |= 0x02;
        p++;
        _delay_cycles(ciclos);
        if(p != pasos){
            if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
                flag=1;
                P1OUT |= led_rojo;
                P1OUT |= led_verde;}

            P2OUT &= ~0x02;
            P2OUT |= 0x01;
            _delay_cycles(ciclos);
            p++;
        }
        if(p != pasos){
            if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
                flag=1;
                P1OUT |= led_rojo;
                P1OUT |= led_verde;}

            P1OUT &= ~0x10;
            P1OUT |= 0x20;
            _delay_cycles(ciclos);
            p++;}
        if(p != pasos){
            if (!(P1IN & boton) && fin != 2){
                flag=1;
                P1OUT |= led_rojo;
                P1OUT |= led_verde;}
            P2OUT &= ~0x01;

```

```

        P2OUT |= 0x02;
        _delay_cycles(ciclos);
        p++;}
    }
    P1OUT &= ~salidas_p1;
    P2OUT &= ~salidas_p2;
    return flag;
}
void Configura()
{
    WDTCTL = WDTPW + WDTLHOLD;// Detiene el watchdog.
    /*----- SALIDAS -----*/
    P1DIR |= puerto_1;
    P2DIR |= salidas_p2;
    /*----- ENTRADAS -----*/
    P1DIR &= ~boton;           // boton como entrada
    P1DIR &= ~sel_modos;       // sel_modos como entrada
    P1DIR &= ~sel_updown;     // sel_updown como entrada
    //Habilita resistencias pull up/down
    P1REN = P1REN | boton;
    P1REN = P1REN | sel_modos;
    P1REN = P1REN | sel_updown;
    /*-----*/
    P1OUT = P1OUT | boton;     // Habilita a 1 la resistencia
pull up del P1.3 (push button)
    P1OUT = P1OUT & ~sel_modos; // Habilita la resistencia de
pull down de sel_modos
    P1OUT = P1OUT | sel_updown; // Habilita la resistencia de
pull up de sel_updown
    /*-----*/
    // Todas las salidas a 0
    P1OUT &= ~puerto_1;
    P2OUT &= ~salidas_p2;
    // Configuración del timer A
    TACTL = TASSEL_2 + MC_2 + ID_2;
    TACCTL0 = CCIE;
    state_SOS= MODO;

    // Habilitación de interrupción de timer
    _enable_interrupt();
    // Operador intrínseco del compilador. LPM0 (low Power Mode
0) with
    //interrupts enabled
    __bis_SR_register(LPM0 + GIE);
}

```

#### ▪ m430.h

```

/*
 * m430.h
 *
 * Created on: 21/5/2015
 * Author: Claudio
 */

#ifndef M430_H_

```

```

#define M430_H_

/*----- PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN -----
-----*/
/* t = tiempo subida/bajada de un motor
   t = ((ciclos*num_pasos)/ 1 MHz) s
   F = Frecuencia subida/bajada de un motor
   F = 1/t Hz */

#define ciclos 3500      // Ciclos de espera
#define num_pasos 60    // Número de pasos
#define man_pasos 16
/*-----
-----*/

/*----- DEFINICIÓN DE CONSTANTES -----
-----*/
#define sel_modos 0x04   // Modo de funcionamiento "0" manual "1"
                        // automático
#define sel_updown 0x02 // Modo de funcionamiento del motor
                        // (manual) "0" bajar "1" subir
#define boton 0x08      // Pulsador iniciar máquina de estados
                        // (modo automático)
#define salidas_p1 0x30 // Salidas puerto 1: 00110000
#define salidas_p2 0x1F // Salidas puerto 2: 00011111
#define puerto_1 0xF0   // Salidas puerto 1: 11110000
#define motor_manual 0
#define motor_1 1
#define motor_2 2
#define motor_3 3

// Enables puente en H
#define enable_1 0x10
#define enable_2 0x08
#define enable_3 0x04
//LEDs
#define led_rojo 0x80
#define led_verde 0x40
/*-----
-----*/

/*----- FUNCIONES -----
-----*/
int bajar_motor(int,int,int);
int subir_motor(int,int,int);
void Configura(void); // Configura el micro
/*-----
-----*/

/*-----MÁQUINA DE ESTADO -----
-----*/
enum estados {MODOS, MANUAL, INICIO, MOTOR_UP, MOTOR_DOWN, AUTO,
MOTOR_1, MOTOR_2, MOTOR_3} state_SOS;
/*-----
-----*/

#endif /* M430_H_ */

```

## Anexo II. Plano pieza 3D

