

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Electrónica,
Robótica y Automática

Sistema automático de inserción de agujas de
impulsión para cadena de producción de Lab-on-Chip

Autora: Eva Aguilera Mazuela

Tutor: José Manuel Quero Reboul

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

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Sistema automático de inserción de agujas de impulsión para cadena de producción de Lab-on- Chip

Autora:

Eva Aguilera Mazuela

Tutor:

José Manuel Quero Reboul

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Sistema automático de inserción de agujas de impulsión para cadena de producción de
Lab-on-Chip

Autor: Eva Aguilera Mazuela

Tutor: José Manuel Quero Reboul

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

Resumen

Se desea realizar una cadena de producción en la que se obtiene un Lab-on-Chip compuesto por una microfluídica de metacrilato unida a un PCB, insertado todo ello en una caja. En dicha microfluídica se deben introducir tres agujas de impulsión con sus respectivos émbolos, además del reactivo necesario.

El objetivo de este trabajo es diseñar, fabricar y poner en funcionamiento el sistema necesario para automatizar el proceso de dicha cadena en el que las agujas se introducen en la microfluídica, asumiendo que en las agujas ya se ha insertado el correspondiente émbolo.

En este documento se explica el diseño mecánico, electrónico y del programa de control realizado, así como las pruebas que se han llevado a cabo sobre el sistema obtenido.

Abstract

It is desired to realize a production line in which a Lab-on-Chip is obtained, consisting of a methacrylate microfluidic attached to a PCB, all inserted in a box. In this microfluidic, three impulse needles with their respective plungers must be inserted, as well as the necessary reagent.

The objective of this work is to design, manufacture and put into operation the system necessary to automate the process of such a production line in which the needles are introduced into the microfluidic, assuming that in the needles the corresponding plunger has already been inserted.

This document explains the mechanical, electronic and control program design, as well as the tests that have been carried out on the system obtained.

| | |
|---|-------------|
| Resumen | ix |
| Abstract | xi |
| Índice | xiii |
| Índice de Tablas | xv |
| Índice de Figuras | xvii |
| 1 Introducción al problema | 1 |
| 2 Descripción de la solución | 3 |
| 3 Implementación de la solución | 7 |
| 3.1 <i>Diseño mecánico</i> | 7 |
| 3.1.1 Máquina suministradora de microfluídica | 7 |
| 3.1.2 Máquina suministradora de agujas | 8 |
| 3.1.3 Máquina distribuidora del conjunto | 10 |
| 3.2 <i>Diseño electrónico y cableado</i> | 11 |
| 3.3 <i>Diseño del programa de control</i> | 15 |
| 3.4 <i>Presupuesto</i> | 19 |
| 4 Pruebas realizadas | 21 |
| 5 Conclusiones y trabajos futuros | 23 |
| Anexo A: Manual de usuario | 25 |
| Referencias | 27 |

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Coste de los elementos que conforman el sistema obtenido

19

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-1. Diagrama de flujo del proceso de fabricación, donde se muestran en azul las piezas, en rojo los procesos y en amarillo el número del proceso. | 2 |
| Figura 2-1. Imagen de los materiales utilizados en el proceso: microfluídica, aguja doble y émbolo. | 3 |
| Figura 2-2. Imagen del resultado final del proceso, en el que las agujas quedan introducidas en la microfluídica. | 3 |
| Figura 2-3. Diagrama de flujo del proceso de introducción de las agujas en la microfluídica. | 5 |
| Figura 3-1. Diseño 3D de la pieza "Base1_EmpujaMF" en Autodesk. | 7 |
| Figura 3-2. Diseño 3D de la pieza "Base2_EmpujaMF" en Autodesk. | 7 |
| Figura 3-3. Diseño 3D de la pieza "EmpujaMF" en Autodesk. | 8 |
| Figura 3-4. Diseño 3D de la pieza "Union_eje_MF" en Autodesk. | 8 |
| Figura 3-5. Diseño 3D de la pieza "Base_cogida_agujas" en Autodesk. | 9 |
| Figura 3-6. Diseño 3D de la pieza "Cogida_doble_3agujas" en Autodesk. | 9 |
| Figura 3-7. Diseño 3D de la pieza "Union_eje_cogida_agujas" en Autodesk. | 9 |
| Figura 3-8. Diseño 3D de la pieza "Rampa" en Autodesk. | 10 |
| Figura 3-9. Diseño 3D de la pieza "Eje" en Autodesk. | 10 |
| Figura 3-10. Diseño 3D de la pieza "Apoyo_rampa" en Autodesk. | 10 |
| Figura 3-11. Diseño en Autodesk de la disposición de la máquina suministradora de microfluídica, la máquina suministradora de agujas y la máquina distribuidora del conjunto. También se incluyen en la imagen una microfluídica y tres agujas dobles. | 11 |
| Figura 3-12. Imagen del motor paso a paso con eje roscado. | 11 |
| Figura 3-13. Imagen del interruptor. | 12 |
| Figura 3-14. Imagen del actuador electromagnético lineal. | 12 |
| Figura 3-15. Imagen del transistor MOSFET. | 12 |
| Figura 3-16. Imagen de la resistencia de 1k Ω . | 13 |
| Figura 3-17. Imagen de la placa Arduino Mega. | 13 |
| Figura 3-18. Imagen de la placa de circuito impreso. | 13 |
| Figura 3-19. Imagen de la pantalla. | 14 |
| Figura 3-20. Esquema de las conexiones eléctricas. | 14 |
| Figura 3-21. Diagrama de flujo del programa de control. | 18 |
| Figura 3-22. Disposición de los elementos mecánicos y electrónicos, así como del cableado. | 19 |

1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

Se desea implementar un sistema que permita automatizar uno de los procesos de montaje de una cadena de producción en la que se obtiene como resultado un Lab-on-Chip (LoC), compuesto por una microfluídica de metacrilato, unida a un PCB, a la que se le han introducido tres agujas de impulsión y un reactivo.

Un LoC es un dispositivo fabricado de manera tal que en un área de pocos centímetros cuadrados se tienen las funciones de un laboratorio en un solo chip. Está compuesto por un conjunto de nanodispositivos que trabajan de forma conjunta y coordinada para llevar a cabo su cometido [1]. En este caso concreto, el LoC que se desea fabricar es un sistema con reactivos prealmacenados, que consta de un circuito microfluídico de metacrilato y una placa de circuito impreso (PCB). El dispositivo se encarga de almacenar el reactivo, liberar la cantidad correcta de líquidos y mezclar los líquidos [2]. Por ello, tienen un papel muy importante las agujas que en él se introducen, ya que estas son las encargadas de impulsar el reactivo hacia los canales de la microfluídica.

A continuación se explican los pasos a seguir en el proceso de fabricación de LoCs anteriormente citado. El diagrama de flujo que componen estos pasos se muestra en la Figura 1-1..

- Paso 1. En primer lugar, se adhiere la lámina adhesiva en la cara posterior del metacrilato con la microfluídica, de dimensiones 68x68mm.
- Paso 2. A la vez que se realiza el paso 1, se inserta un émbolo en cada una de las patas de la aguja doble.
- Paso 3. Tras obtener el resultado de los pasos 1 y 2, se introduce una aguja con sus émbolos en la microfluídica. Este paso se repite para las tres agujas antes de pasar al paso 4.
- Paso 4. A continuación, se pipetea el reactivo en el orificio de la microfluídica destinado para ello y se avanza hasta el paso 5.
- Paso 5. Se sella el orificio en el que se ha pipeteado el reactivo mediante la adhesión de una lámina adhesiva por la cara frontal de la microfluídica. Una vez realizado este paso, se vuelve al paso 4, hasta pipetear reactivo en los tres orificios, tras lo cual se avanza al paso 6.
- Paso 6. Se posiciona la placa PCB en la cara posterior del metacrilato con la microfluídica.
- Paso 7. Se insertan los remaches en los orificios del metacrilato y se aprietan para fijar la unión de la microfluídica con la PCB.
- Paso 8. Se inserta el producto en una caja para que quede fijo y no se mueva.
- Paso 9. Se envasa la caja al vacío.
- Paso 10. Se adhieren las etiquetas correspondientes a la caja.

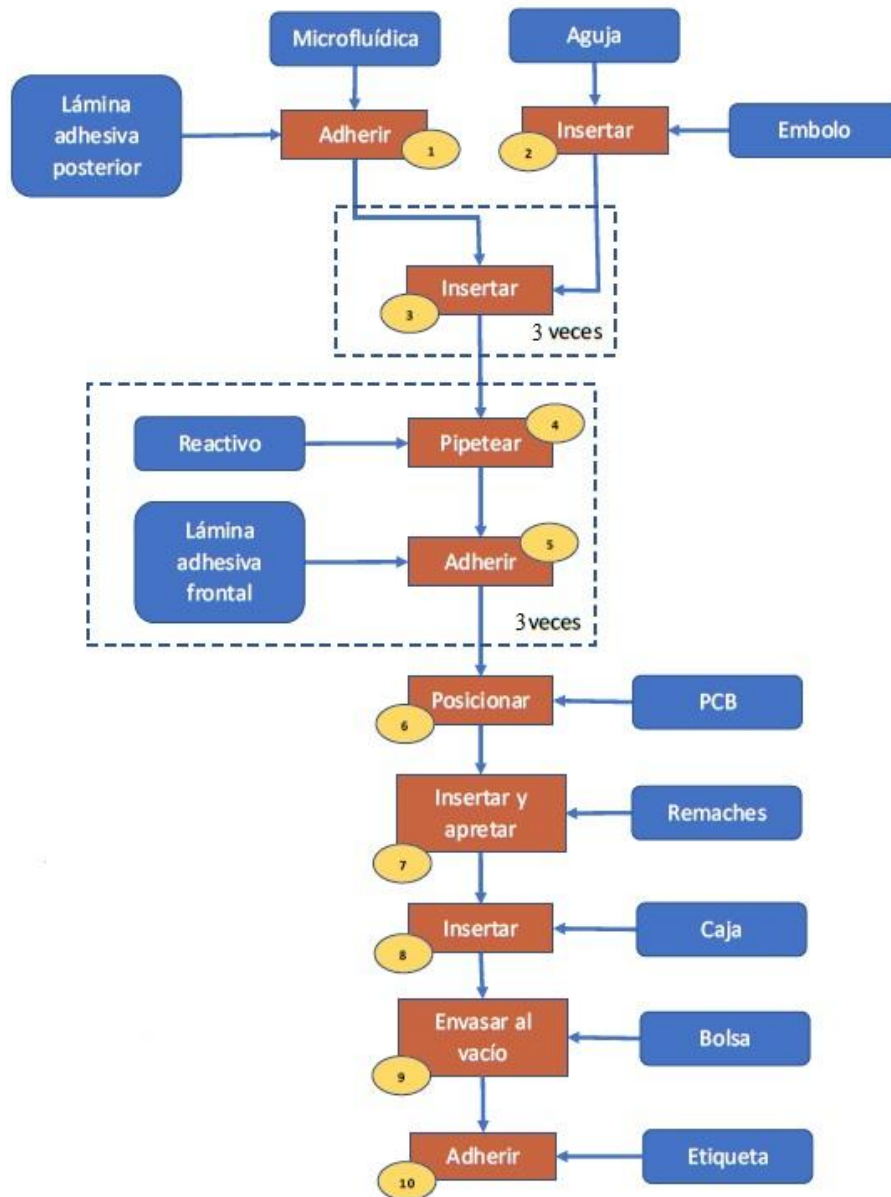


Figura 1-1. Diagrama de flujo del proceso de fabricación, donde se muestran en azul las piezas, en rojo los procesos y en amarillo el número del proceso.

Automatizar esta cadena de producción permite obtener un mayor número de Lab-on-Chips en un menor tiempo. Para empezar, se ha decidido diseñar un sistema que automatice el proceso correspondiente al paso 3 del diagrama de flujo, es decir, el proceso mediante el cual se insertan las agujas, previamente unidas a sus respectivos émbolos, en la microfluídica con la lámina adhesiva ya adherida en su cara posterior. Se ha seleccionado esta etapa al ser crítica por las dificultades que aparecen en la introducción de las agujas en la microfluídica, tales como, la complejidad de conseguir una alineación perfecta entre las agujas y los orificios en los que se deben insertar o la elevada fuerza necesaria para conseguir que los émbolos colocados en los extremos de las agujas se introduzcan en dichos orificios.

2 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Como se ha dicho anteriormente, se desea diseñar un sistema que permita automatizar el proceso de la cadena de montaje mediante el cual se introducen tres agujas dobles, con sus respectivos émbolos, en una microfluídica de metacrilato. A partir de los elementos de la Figura 2-1 se desea obtener el resultado mostrado en la Figura 2-2.

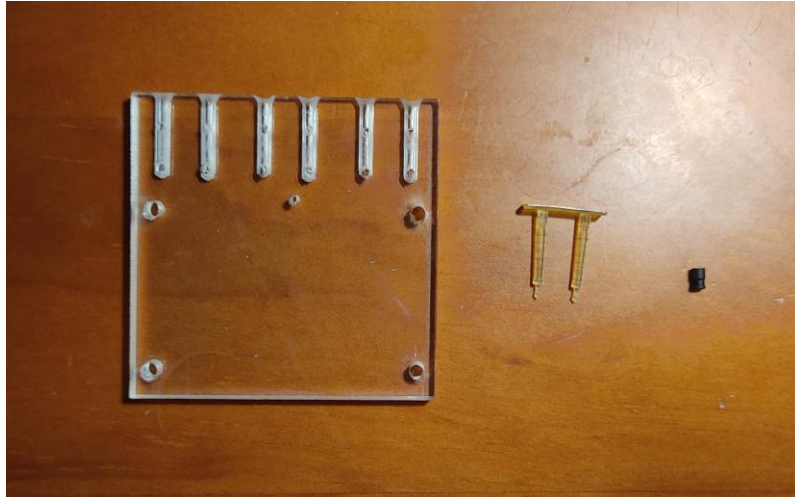


Figura 2-1. Imagen de los materiales utilizados en el proceso: microfluídica, aguja doble y émbolo.

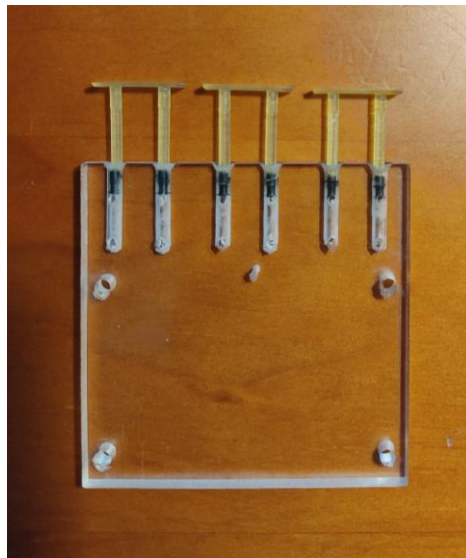


Figura 2-2. Imagen del resultado final del proceso, en el que las agujas quedan introducidas en la microfluídica.

Para poder realizar el proceso deseado, será necesario elaborar un sistema que permita:

- obtener las agujas y la microfluídica de las etapas anteriores,
- introducir las agujas en la microfluídica y
- enviar la microfluídica con las agujas ya insertadas a la etapa siguiente de la cadena de producción.

El flujo de trabajo que debe realizar dicho sistema se muestra en la Figura 2-3. A continuación se detallan los pasos que lo componen:

- Paso 0. Las microfluídicas se encuentran apiladas en una columna de alimentación y caen por gravedad. De igual forma, hay tres columnas de alimentación para las agujas. Estas cuatro columnas deben permitir que las piezas caigan en la posición adecuada para poder operar con ellas. Además, en el caso de las agujas, la separación entre columnas debe ser la misma que la separación de los agujeros de la microfluídica en los que se van a introducir.
- Paso 1. Se recoge la microfluídica que se encuentra en la posición más baja de la columna de alimentación.
- Paso 2. Se empuja la microfluídica recogida hasta colocarla en una plataforma fuera de dicha columna, impidiendo que caigan más microfluídicas de la columna de alimentación. La pieza que desplaza la microfluídica se mantiene en la posición más extendida hasta que se introducen las agujas (paso 4), ya que debe servir también de sujeción para ese momento.
- Paso 3. Se recoge, al mismo tiempo, la aguja que se encuentra en la posición más baja de cada una de las tres columnas de alimentación. Al recogerlas se debe mantener la distancia entre agujas que tienen las columnas.
- Paso 4. Se empujan las agujas recogidas hasta introducirlas en la microfluídica. La pieza que las recoge debe de hacer de tope para que las agujas se introduzcan la distancia requerida. La pieza que desplaza las agujas se mantiene en la posición más extendida hasta que el conjunto formado por la unión de la microfluídica y las tres agujas sea retirado.
- Paso 5. La pieza que ha desplazado la microfluídica y que la sujeta mientras se introducen las agujas se retira, para dejar libre al conjunto de microfluídica con agujas.
- Paso 6. La plataforma sobre la que se encuentra la microfluídica con las tres agujas gira, elevando así el extremo en el que se encuentra el conjunto. Con este movimiento se consiguen sacar las agujas del hueco sobre el que descansan y que el conjunto deslice hacia el extremo opuesto de dicha plataforma por gravedad, cayendo fuera de ella. Cuando el conjunto sale de la plataforma, esta vuelve a su posición inicial en horizontal.

Este proceso se repite tantas veces como conjuntos de microfluídica con agujas se deseen obtener.

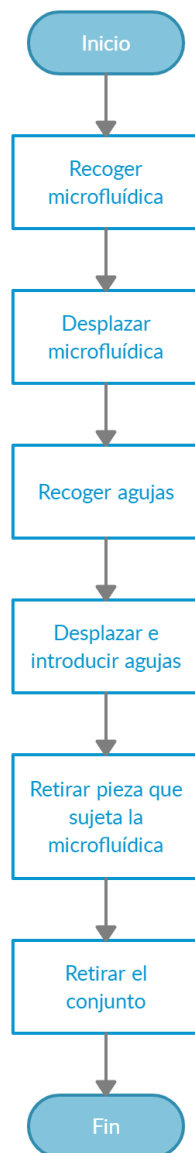


Figura 2-3. Diagrama de flujo del proceso de introducción de las agujas en la microfluídica.

3 IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Para poder implementar la solución descrita en el apartado anterior se ha realizado un diseño mecánico, un diseño electrónico y un diseño del programa de control.

3.1 Diseño mecánico

La parte mecánica de la solución se ha dividido en tres máquinas: la suministradora de la microfluídica, la suministradora de las agujas y la distribuidora del conjunto. Todas ellas van atornilladas a una base común de madera.

El diseño de las piezas que componen cada una de las máquinas se ha realizado en Autodesk y se han impreso con una impresora 3D en PLA, excepto la pieza "Cogida_doble_3agujas" que se ha impreso en resina.

3.1.1 Máquina suministradora de microfluídica

Esta máquina está compuesta por las siguientes piezas:

- "Base1_EmpujaMF". Pieza unida a la base común, a la pieza "Base2_EmpujaMF" y al motor paso a paso, por la que se desliza la microfluídica.

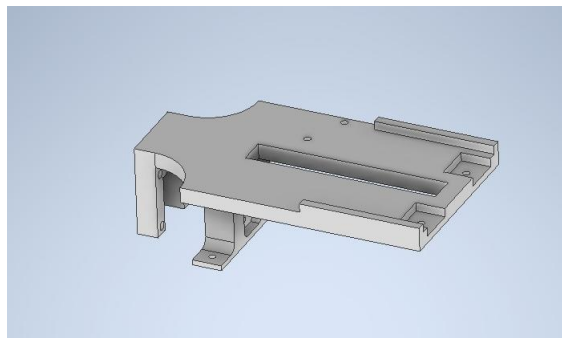


Figura 3-1. Diseño 3D de la pieza "Base1_EmpujaMF" en Autodesk.

- "Base2_EmpujaMF". Pieza unida a la base común y a la pieza "Base1_EmpujaMF", por la que se desliza la microfluídica. También contiene la columna en la que se apilan las microfluídicas permitiendo así su alimentación por gravedad. Esta pieza y la "Base1_EmpujaMF" no se han diseñado como una única pieza porque debido a su tamaño no era posible realizar su impresión en la impresora 3D.

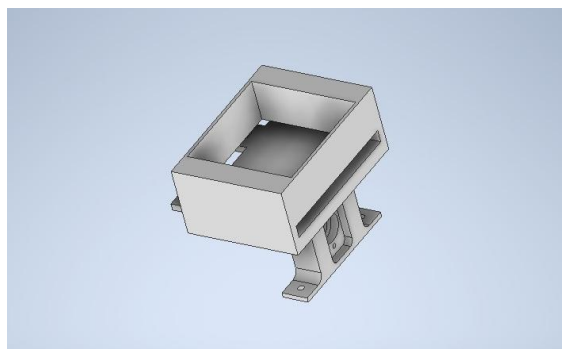


Figura 3-2. Diseño 3D de la pieza "Base2_EmpujaMF" en Autodesk.

- "EmpujaMF". Pieza en forma de U que impide que caigan microfluídicas de la columna mientras está extendida, y que permite que caiga una cuando retrocede. Una vez que cae una microfluídica, esta pieza la empuja hasta colocarla sobre la máquina distribuidora del conjunto y la sujeta mientras se le introducen las agujas.

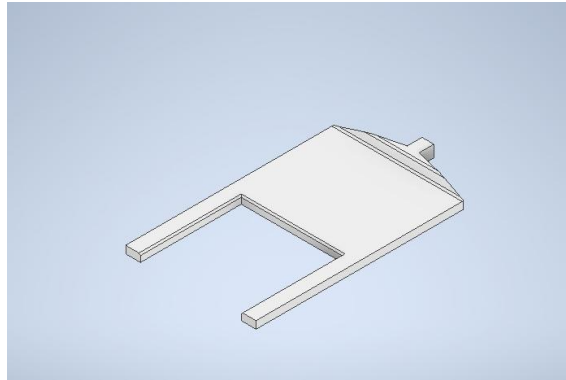


Figura 3-3. Diseño 3D de la pieza "EmpujaMF" en Autodesk.

- "Union_eje_MF". Pieza que une la pieza "EmpujaMF" con el eje del motor paso a paso, permitiendo así el movimiento lineal de dicha pieza.

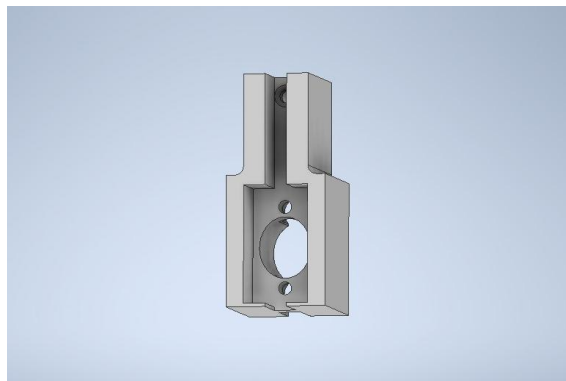


Figura 3-4. Diseño 3D de la pieza "Union_eje_MF" en Autodesk.

3.1.2 Máquina suministradora de agujas

Esta máquina está compuesta por las siguientes piezas:

- "Base_cogida_agujas". Pieza unida a la base común y al motor paso a paso, por la que se desliza la pieza "Cogida_doble_3agujas" con las agujas. También contiene las tres columnas en las que se apilan las agujas permitiendo así su alimentación por gravedad.

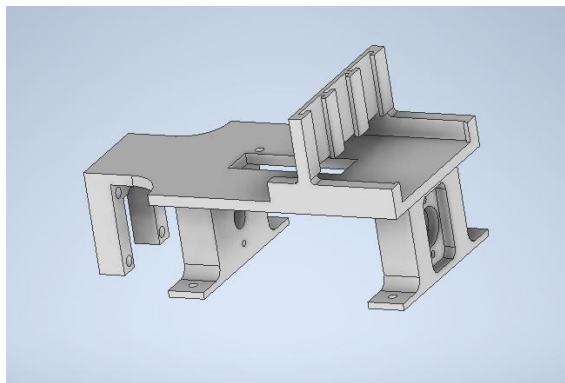


Figura 3-5. Diseño 3D de la pieza "Base_cogida_agujas" en Autodesk.

- "Cogida_doble_3agujas". Pieza que impide que caigan agujas de las columnas mientras está extendida, y que permite que caigan una de cada columna, en un hueco diseñado para ello, cuando retrocede. Una vez que caen las tres agujas en el hueco, esta pieza las empuja hasta introducirlas en la microfluídica. El hueco que contiene a las agujas las sujeta por abajo hasta el punto en el que deben ser introducidas las agujas, sirviendo así de tope cuando la pieza las empuja para insertarlas en la microfluídica.

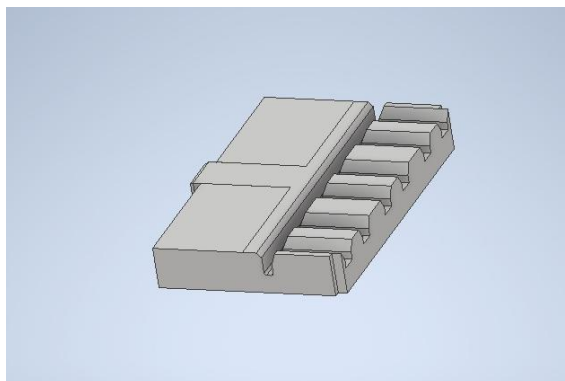


Figura 3-6. Diseño 3D de la pieza "Cogida_doble_3agujas" en Autodesk.

- "Union_eje_cogida_agujas". Pieza que une la pieza "Cogida_doble_3agujas" con el eje del motor, permitiendo así el movimiento lineal de dicha pieza. Además esta pieza impide que la pieza "Cogida_doble_3agujas" se levante al final del recorrido.

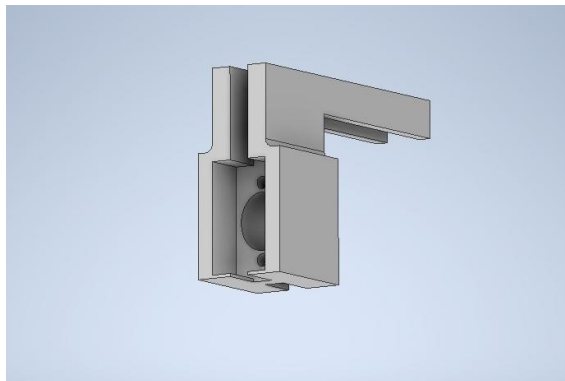


Figura 3-7. Diseño 3D de la pieza "Union_eje_cogida_agujas" en Autodesk.

3.1.3 Máquina distribuidora del conjunto

Esta máquina está compuesta por las siguientes piezas:

- "Rampa". Pieza que gira sobre la pieza "Eje" colocada en uno de sus extremos, para levantar el extremo opuesto, en el que se apoya la microfluídica, y permitir así que se desplace el conjunto por gravedad, hasta llegar a la siguiente etapa. Esta elevación permite también que las agujas puedan salir de la pieza "Cogida_doble_3agujas" de la máquina suministradora de agujas. Para poder levantar esta pieza es necesario colocar un contrapeso en el extremo más cercano a su unión con el eje.

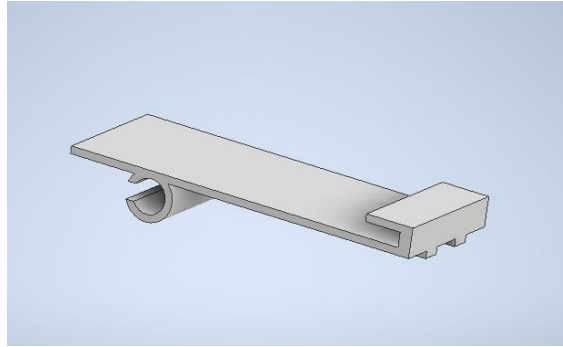


Figura 3-8. Diseño 3D de la pieza "Rampa" en Autodesk.

- "Eje". Pieza unida a la base común que constituye el eje sobre el que gira la pieza "Rampa". Además, esta pieza sirve de sujeción al electroimán encargado del movimiento de la pieza "Rampa".

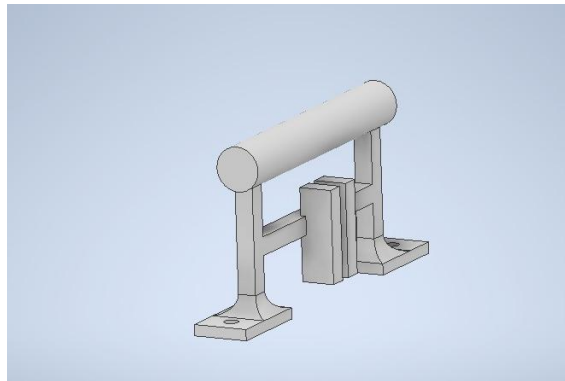


Figura 3-9. Diseño 3D de la pieza "Eje" en Autodesk.

- "Apoyo_rampa". Pieza unida a la base común que sirve de apoyo a la pieza "Rampa".

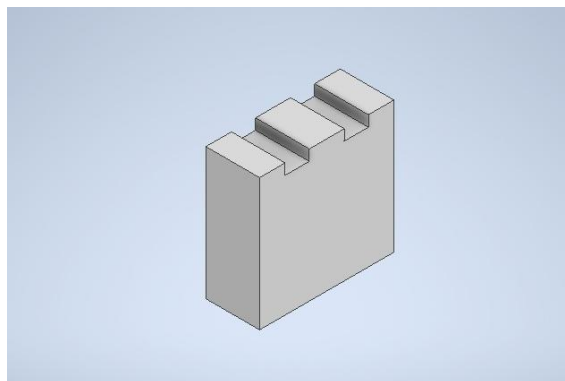


Figura 3-10. Diseño 3D de la pieza "Apoyo_rampa" en Autodesk.

La disposición de cada pieza de las máquinas, así como de unas máquinas respecto a otras se muestra en la Figura 3-11.

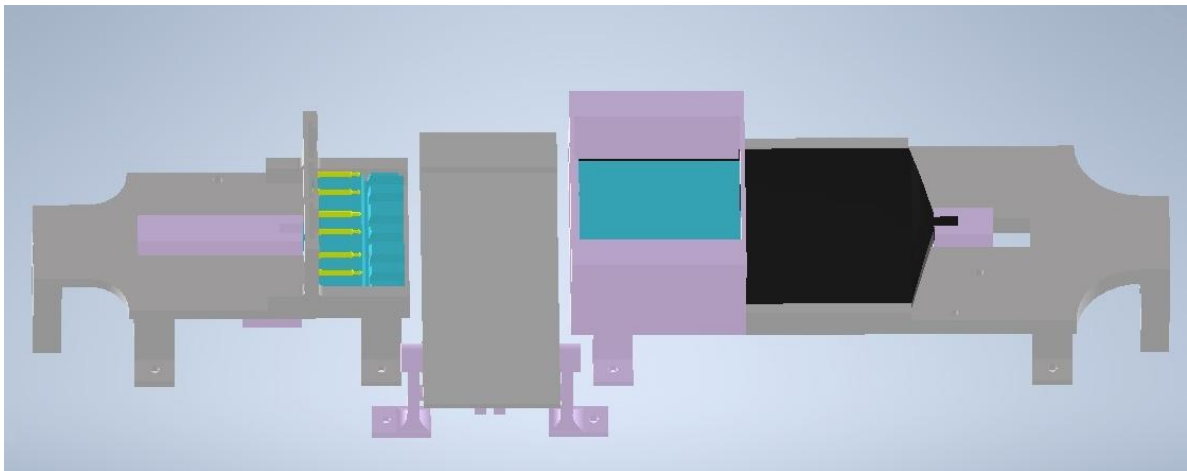


Figura 3-11. Diseño en Autodesk de la disposición de la máquina suministradora de microfluídica, la máquina suministradora de agujas y la máquina distribuidora del conjunto. También se incluyen en la imagen una microfluídica y tres agujas dobles.

3.2 Diseño electrónico y cableado

Respecto al diseño electrónico, los elementos empleados para conseguir los movimientos necesarios son los siguientes:

- Motor paso a paso con eje roscado (x2). Uno de estos motores se atornilla a la parte posterior de la pieza "Base1_EmpujaMF" y permite el desplazamiento lineal de la pieza "Union_eje_MF", permitiendo el avance y retroceso de la pieza "EmpujaMF" para recoger y desplazar la microfluídica. El otro se atornilla a la pieza "Base_cogida_agujas" y tiene la misma función, pero con la pieza "Union_eje_cogida_agujas" que permite el avance y retroceso de la pieza "Cogida_doble_3agujas" para recoger, desplazar e introducir las agujas.

El modelo empleado es el usado para impresoras 3D, y se utiliza este modelo con eje sin fin porque se desea ejercer fuerza y obtener una elevada precisión en la inserción de las agujas, ya que la posición final de estas influye muchísimo en el desplazamiento posterior de los líquidos.



Figura 3-12. Imagen del motor paso a paso con eje roscado.

- Interruptor (x2). Uno de ellos se atornilla sobre la pieza "Base1_EmpujaMF" y se emplea para detener la pieza "EmpujaMF" cuando llega a la posición necesaria para recoger una nueva microfluídica, y el otro se atornilla sobre la pieza "Base_cogida_agujas" y tiene la misma función pero con la pieza "Cogida_doble_3agujas", cuando esta llega a la posición de recogida de tres nuevas agujas.



Figura 3-13. Imagen del interruptor.

- Actuador electromagnético lineal. Está unido a la pieza "Eje" y cuando se extiende empuja la pieza "Rampa", haciendo que esta gire sobre el eje al que está unida. En cambio, cuando se retrae, permite que dicha pieza caiga y vuelva a su posición horizontal.



Figura 3-14. Imagen del actuador electromagnético lineal.

- Transistor MOSFET. Este elemento actúa como interruptor para el actuador electromagnético, permitiendo activarlo y desactivarlo para que este se encuentre extendido o retraído según sea necesario.



Figura 3-15. Imagen del transistor MOSFET.

- Resistencia de $1k\Omega$ (x2). Se necesitan para asegurar una correcta lectura del estado de los interruptores.



Figura 3-16. Imagen de la resistencia de $1k\Omega$.

- Placa Arduino Mega. Es la tarjeta que, al ser programada, permite realizar el control sobre cada uno de los elementos electrónicos que intervienen en el proceso de introducción de las agujas en una microfluídica, los cuales se conectan a ella a través de sus pines.



Figura 3-17. Imagen de la placa Arduino Mega.

- Placa de circuito impreso. Esta placa cuenta con un circuito integrado, dos transistores BJT, dos resistencias de $1k\Omega$ y otras dos de $10k\Omega$ por cada motor paso a paso empleado. Se coloca sobre la placa Arduino y se conecta a ella mediante el acoplamiento de sus pines. Gracias a esta conexión se amplían las capacidades de la placa Arduino, permitiendo el control de los dos motores paso a paso.

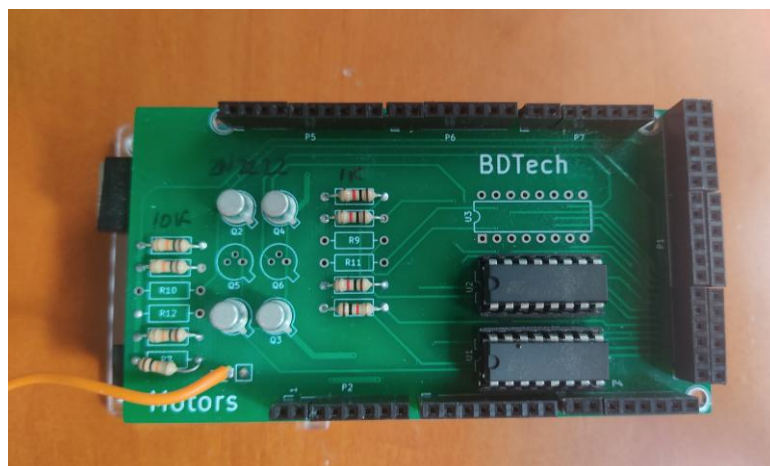


Figura 3-18. Imagen de la placa de circuito impreso.

- Pantalla. Permite mostrar mensajes que indican qué parte del código de control se está ejecutando. Se coloca sobre la placa de circuito impreso y se conecta a ella mediante el acoplamiento de sus pines.

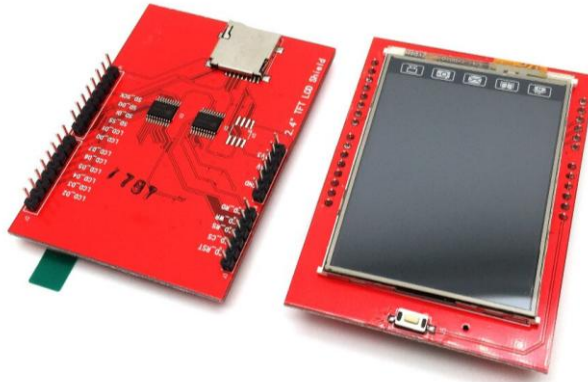


Figura 3-19. Imagen de la pantalla.

Todos estos elementos se encuentran unidos a la placa de circuito impreso mediante cableado, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 3-20, excepto la placa Arduino y la pantalla que se conectan a ella mediante el acoplamiento de los pines tal y como se ha indicado en la descripción de los elementos.

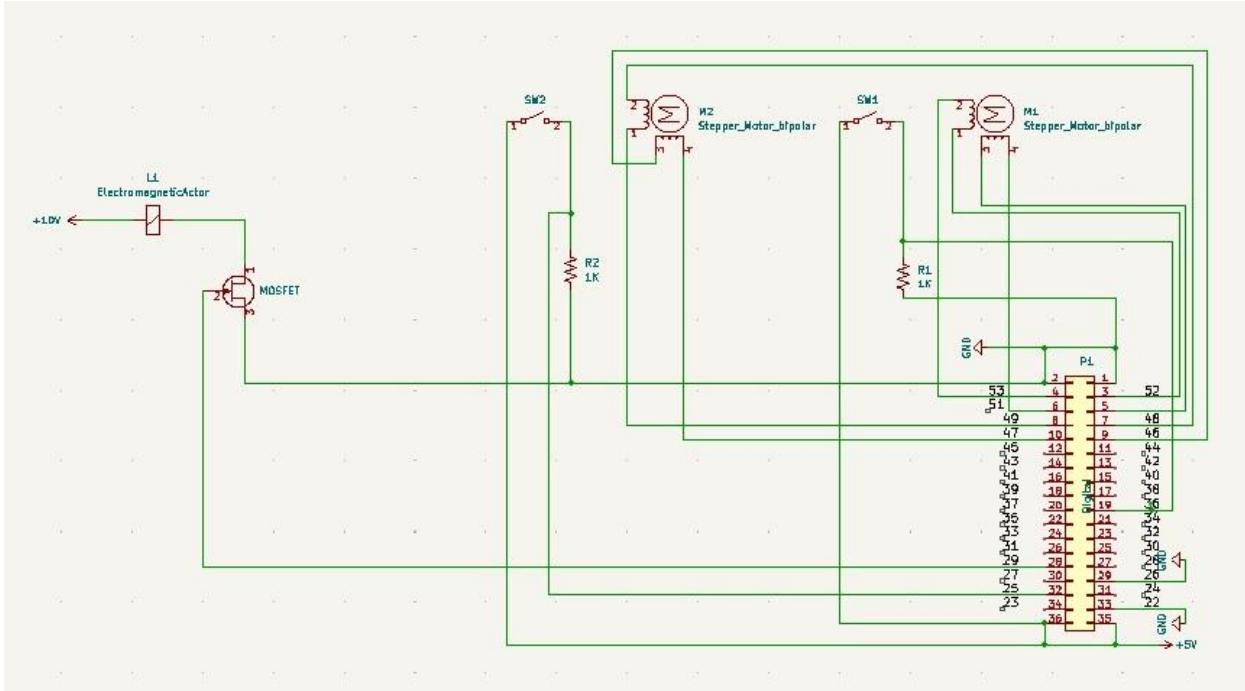


Figura 3-20. Esquema de las conexiones eléctricas.

3.3 Diseño del programa de control

El programa de control está compuesto, principalmente, por cinco funciones encargadas de controlar el movimiento de los tres actuadores: los dos motores paso a paso y el actuador electromagnético. Estas cinco funciones se ejecutan de forma lineal y se repiten tantas veces como conjuntos de microfluídica con agujas se deseen obtener.

A continuación se describe cada una de esas cinco funciones:

- Retroceso_motor1

Esta función hace girar el motor que se encarga del desplazamiento de la pieza "Cogida_doble_3agujas", de tal forma que esta retroceda. Se ejecuta hasta que dicha pieza llega a la posición de recogida de las agujas, es decir, mientras el interruptor que se encuentra sobre la pieza "Base_cogida_agujas" no se encuentre pulsado (`digitalRead(PinInt1) == LOW`). La velocidad a la que se mueve el motor, teniendo en cuenta que se produce un avance lineal de 2mm por cada vuelta que gira el motor, es $VELOCIDADDEGIRO2 = 700rpm * \frac{2mm}{1vuelta} * \frac{1min}{60s} = 23,33 mm/s$

```
void Retroceso_motor1(void){
  int ID_MOTOR=1; //identificador del motor que se mueve
  int direccion=-1; //hacia atrás

  while(digitalRead(PinInt1) == LOW){ //mover motor mientras el interruptor no está pulsado
    motor1.setSpeed(VELOCIDADDEGIRO2);
    motor1.step(direccion);
  }
}
```

- Retroceso_motor2

Esta función hace girar el motor que se encarga del desplazamiento de la pieza "EmpujaMF", de tal forma que esta retroceda. Se ejecuta hasta que dicha pieza llega a la posición de recogida de la microfluídica, es decir, mientras el interruptor que se encuentra sobre la pieza "Base1_EmpujaMF" no se encuentre pulsado (`digitalRead(PinInt1) == LOW`). La velocidad a la que se mueve el motor es $VELOCIDADDEGIRO2 = 700rpm = 23,33 mm/s$.

```
void Retroceso_motor2(void){
  int ID_MOTOR=2; //identificador del motor que se mueve
  int direccion=-1; //hacia atrás

  while(digitalRead(PinInt2) == LOW){ //mover motor mientras el interruptor no está pulsado
    motor2.setSpeed(VELOCIDADDEGIRO2);
    motor2.step(direccion);
  }
}
```

- Avance_motor1

Esta función hace girar el motor que se encarga del desplazamiento de la pieza "Base_cogida_agujas", de tal forma que esta avance. En primer lugar se desplaza la pieza hacia delante 22mm (pasosmotor0) a una velocidad de 700rpm ($VELOCIDADDEGIRO2 = 23,33 \text{ mm/s}$) hasta colocar las agujas a la entrada de los orificios de la microfluídica. Las constantes que se emplean para el cálculo de los pasos que debe dar el motor son $PASOSPORVUELTA = 50 \text{ pasos/vuelta}$ y $LONGITUDPORVUELTA = 2 \text{ mm/vuelta}$, por lo que el número de pasos que se dan para conseguir un avance de 22mm es $\text{pasosmotor0} = 22\text{mm} * \frac{50 \text{ pasos}}{1 \text{ vuelta}} * \frac{1 \text{ vuelta}}{2\text{mm}} = 550 \text{ pasos}$.

Tras este avance, se hace retroceder dicha pieza 1mm ($\text{pasosmotor1} = 1\text{mm} * \frac{50 \text{ pasos}}{1 \text{ vuelta}} * \frac{1 \text{ vuelta}}{2\text{mm}} = 25 \text{ pasos}$) y avanzar posteriormente 2mm ($\text{pasosmotor2} = 2\text{mm} * \frac{50 \text{ pasos}}{1 \text{ vuelta}} * \frac{1 \text{ vuelta}}{2\text{mm}} = 50 \text{ pasos}$), a una velocidad de 96rpm ($VELOCIDADDEGIRO1 = 96\text{rpm} * \frac{2\text{mm}}{1 \text{ vuelta}} * \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 3,2 \text{ mm/s}$), para favorecer la entrada de las agujas. Este ciclo se repite hasta que la pieza "Base_cogida_agujas" llega al final de su recorrido, es decir, hasta que las agujas se han introducido la distancia deseada.

```
void Avance_motor1(void) {
  int ID_MOTOR=1; //identificador del motor que se mueve
  int direccion=1; //hacia delante
  int pasosmotor0=22*PASOSPORVUELTA/LONGITUDPORVUELTA;
  int pasosmotor1=1*PASOSPORVUELTA/LONGITUDPORVUELTA;
  int pasosmotor2=2*PASOSPORVUELTA/LONGITUDPORVUELTA;
  int i;
  int j;

  for (i=1; i<pasosmotor0; i++){
    motor1.setSpeed(VELOCIDADDEGIRO2);
    motor1.step(direccion);
  }

  for (j=1; j<8; j++){
    direccion=-1; //hacia atrás
    for (i=1; i<pasosmotor1; i++){
      motor1.setSpeed(VELOCIDADDEGIRO1);
      motor1.step(direccion);
    }

    direccion=1; //hacia delante
    for (i=1; i<pasosmotor2; i++){
      motor1.step(direccion);
    }
  }
}
```

- Avance_motor2

Esta función hace girar el motor que se encarga del desplazamiento de la pieza "EmpujaMF", de tal forma que esta avance 77mm ($\text{pasosmotor} = 77\text{mm} * \frac{50 \text{ pasos}}{1 \text{ vuelta}} * \frac{1 \text{ vuelta}}{2\text{mm}} = 1925 \text{ pasos}$), que es la distancia necesaria para colocar la microfluídica en la posición adecuada para la posterior introducción de las agujas. La velocidad a la que se mueve el motor es $VELOCIDADDEGIRO2 = 700\text{rpm} = 23,33 \text{ mm/s}$.

```

void Avance_motor2(void){
  int ID_MOTOR=2; //identificador del motor que se mueve
  int direccion=1; //hacia delante
  int pasosmotor=77*PASOSPORVUELTA/LONGITUDPORVUELTA;
  int i;

  for (i=1; i<pasosmotor; i++){
    motor2.setSpeed(VELOCIDADDEGIRO2);
    motor2.step(direccion);
  }
}

```

- Electroiman

Esta función activa el electroimán haciendo que este se extienda, elevando así la pieza "Rampa", y, tras 2 segundos, lo desactiva para que retroceda y la pieza "Rampa" vuelva a su posición horizontal.

```

void Electroiman(void){
  digitalWrite(PinEI, HIGH); //extensión
  delay(2000);
  digitalWrite(PinEI, LOW); //contracción
}

```

La fuerza mínima que hay que ejercer con el actuador electromagnético sobre la pieza "Rampa" se obtiene igualando momentos a ambos lados del eje.

$$M_i = M_d \rightarrow \left(m_c + \frac{1}{6}m_r\right)gd_i = \left(F - \frac{5}{6}m_rg\right)d_d \quad (3-1)$$

donde M_i y M_d son los momentos a cada lado del eje,

F es la fuerza mínima necesaria para levantar la pieza "Rampa" ,

$m_c = 55g$ es la masa del contrapeso,

$m_r = 30g$ es la masa de la pieza "Rampa",

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$ es la gravedad,

$d_i = 25mm$ es la distancia del contrapeso al eje y

$d_d = 19mm$ es la distancia del punto en el que actúa el actuador electromagnético al eje.

Sustituyendo cada variable por su valor numérico y despejando, se obtiene el valor de F :

$$\left(0,055 + \frac{1}{6}0,03\right) * 9,8 * 0,025 = \left(F - \frac{5}{6}0,03 * 9,8\right) * 0,019 \rightarrow F = 1,02N \quad (3-2)$$

En la Figura 3-21 se muestra el diagrama de flujo que indica el orden en el que se ejecutan las funciones descritas.

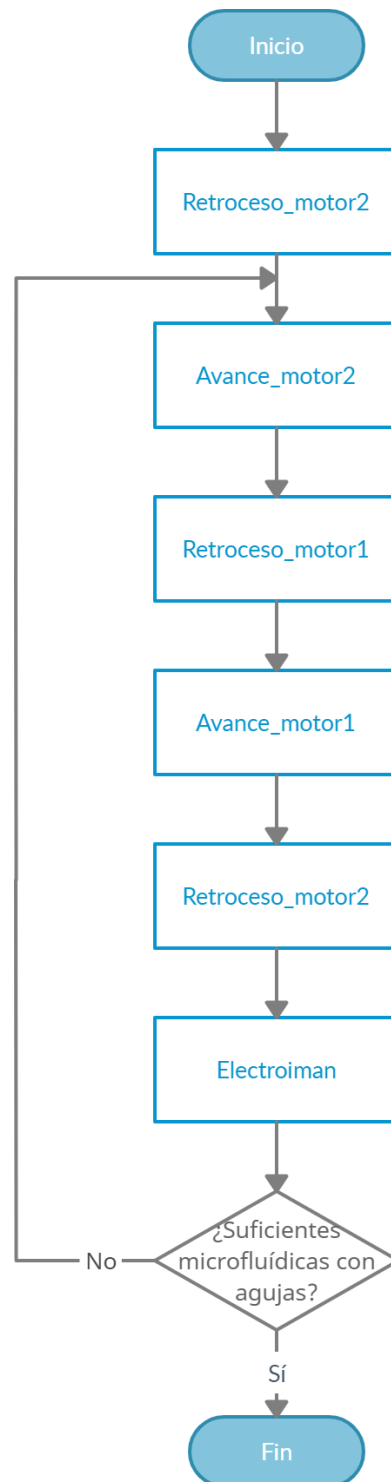


Figura 3-21. Diagrama de flujo del programa de control.

3.4 Presupuesto

En este apartado se muestra el presupuesto necesario para poder llevar a cabo la implementación del sistema descrito en los apartados anteriores. En la Tabla 3-1, aparece un cálculo aproximado del precio de cada uno de los materiales empleados para la obtención del sistema, así como el coste total de este.

Tabla 3-1. Coste de los elementos que conforman el sistema obtenido

| Material | Cantidad | Unidad | Coste [€/ud] | Coste total [€] |
|---|----------|--------|--------------|-----------------|
| PLA | 0,750 | kg | 20 | 15 |
| Resina | 0,047 | 1 | 27 | 1,27 |
| Motor paso a paso con eje roscado | 2 | ud | 13 | 26 |
| Interruptor | 2 | ud | 3 | 6 |
| Actuador electromagnético | 1 | ud | 9 | 9 |
| Transistor MOSFET | 1 | ud | 2 | 2 |
| Resistencia 1k Ω | 2 | ud | 0,25 | 0,50 |
| Arduino MEGA | 1 | ud | 42 | 42 |
| Placa de circuito impreso con componentes | 1 | ud | 20 | 20 |
| Pantalla | 1 | ud | 7 | 7 |
| Cable | 3 | m | 1 | 3 |
| | | | Total | 131,77 |

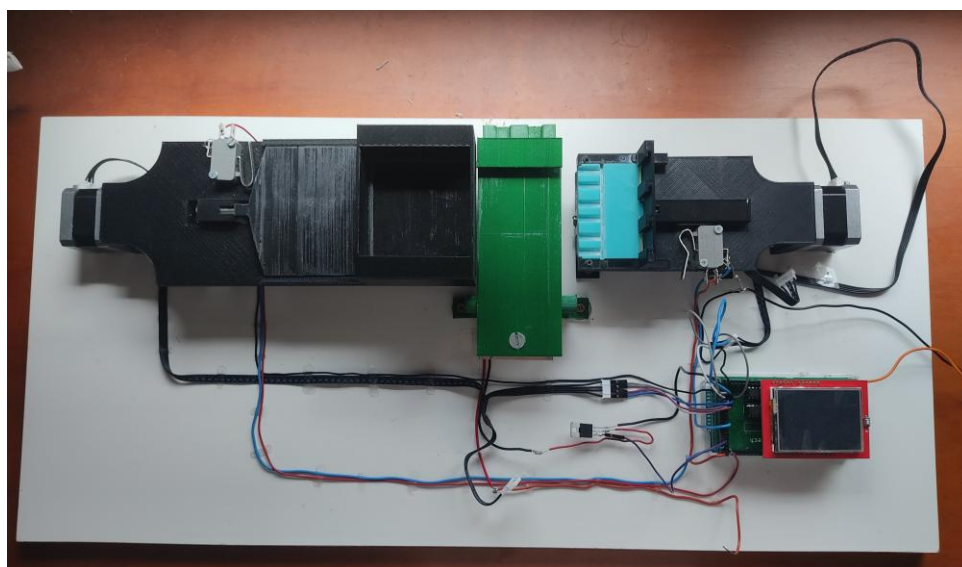


Figura 3-22. Disposición de los elementos mecánicos y electrónicos, así como del cableado.

Una vez obtenidos todos los elementos descritos anteriormente se colocan tal y como se muestra en la Figura 3-22. En ella aparecen todos los elementos que conforman la parte mecánica y la parte electrónica, así como la disposición y el cableado entre estos.

4 PRUEBAS REALIZADAS

En este apartado se tratan las pruebas que se han realizado sobre cada una de las piezas que conforman el sistema implementado, así como sobre el funcionamiento global, y los cambios que se han efectuado como resultado de dichas pruebas.

En primer lugar, se han ido imprimiendo progresivamente las distintas piezas que forman el sistema y se ha ido comprobando que las medidas de cada una de ellas era la adecuada con respecto al resto de piezas que componen una misma máquina. Esto ha dado como resultado el hecho de tener que rediseñar y reimprimir algunas de las piezas. También, al tratarse de un prototipo inicial, si las medidas no se cumplían por un margen pequeño, se ha rediseñado la pieza pero, en vez de volverla a imprimir, se ha limado la parte que fuera necesaria. Pero no solo ha habido que eliminar material, también ha habido que añadirlo en el caso de la pieza "Cogida_doble_3agujas", para evitar que cayeran las agujas de las columnas de alimentación cuando esta pieza se encontraba en el final de su recorrido.

Una vez que se hubieron obtenido todas las piezas con las dimensiones deseadas y adecuadas para el correcto funcionamiento de cada máquina, se hicieron pruebas con todo el sistema en su conjunto para comprobar si cuadraba el trabajo realizado por cada máquina con el de las demás. En este caso hubo que limar también alguna parte de alguna pieza, pero el mayor inconveniente que se detectó fue en el momento de introducir las agujas en la microfluídica. El problema era que, al introducir las agujas, estas ejercían una fuerza hacia arriba, haciendo que el extremo de la microfluídica por el que se introducían las agujas se levantara, creando un ángulo que impedía que las agujas entraran hasta el punto deseado. Para solucionarlo se llevaron a cabo tres medidas:

1. En primer lugar, se redujo el tamaño de las agujas, disminuyendo el diámetro de los cilindros que deben ser introducidos en los agujeros, ya que al tener un menor tamaño oponían menos resistencia a ser introducidos.
2. En segundo lugar, se aumentó el diámetro de los agujeros de la microfluídica en los que se deben introducir las agujas, así como el avellanado a la entrada de dichos agujeros, para favorecer la entrada de las agujas.
3. Por último, se modificó el programa de control, de manera que en vez de introducir las agujas con un solo movimiento hacia delante, se produjeran pequeños retrocesos para posteriormente avanzar una distancia mayor. Con esto se evitaba que se elevara la microfluídica, ya que, aunque al avanzar las agujas se produce un pequeño levamiento, cada vez que retroceden la microfluídica cae, por lo que esa elevación no se va acumulando.

El último problema encontrado en las pruebas realizadas fue que el actuador electromagnético no era capaz de levantar lo suficiente la rampa para que cayera la unión de microfluídica y agujas. Para solucionarlo se hizo una pequeña ranura en el lateral de la pieza "Base_cogida_agujas" para evitar que chocaran las agujas al caer, se subió el actuador para aumentar el ángulo de inclinación de la rampa cuando se activara y se alimentó este actuador de manera independiente al Arduino, con una tensión de 10V.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras el trabajo realizado, se puede concluir que se ha obtenido un prototipo inicial que permite introducir tres agujas dobles en una microfluídica de forma automática, si bien es cierto, que aún necesita añadirle mejoras para que lo haga de forma más eficiente.

Algunas de las mejoras que pueden llevarse a acabo ya han sido nombradas en el apartado de pruebas, pues las piezas a las que se le ha eliminado o añadido material, deberían volverse a imprimir con las medidas adecuadas. Y, dando un paso más hacia la optimización del proceso, sería aconsejable sustituir estas piezas por unas de aluminio o algún otro material más resistente que el plástico.

También, en lo que respecta al diseño, sería conveniente hacer que la columna de alimentación de las agujas sea una pieza independiente que se acople a "Base_cogida_agujas", lo que permitirá colocarla en el punto de recogida de las agujas con una mayor precisión. En este cambio de diseño, sería también conveniente dejar menos espacio entre esta pieza y la parte superior de "Cogida_doble_3agujas" para evitar que, cuando caiga una aguja, la que se encuentra encima entre por el hueco que se queda entre ambas piezas.

Otro de los puntos que debería estudiarse, es la unión entre las piezas "Eje" y "Rampa", ya que hay bastante holgura entre ellas y esta última no se mantiene en una posición fija. Otra de las mejoras en esta línea, sería sustituir el contrapeso colocado en uno de los extremos de la pieza "Rampa" formado por distintos elementos apilados, por una única pieza homogénea de igual peso.

Otra posible mejora para solucionar el problema de la introducción de las agujas, en lugar de modificar el código para que las agujas hagan pequeños retrocesos, sería que estas se introdujeran en la microfluídica mientras se encuentra en su posición inicial, bajo la columna de almacenamiento de las demás microfluídicas, ya que eso aseguraría la linealidad entre los agujeros de la microfluídica y las agujas, impidiendo que la microfluídica se levante. Tras esto, avanzarían solidariamente la máquina que desplaza las agujas y la que desplaza la microfluídica hasta colocar el conjunto resultante sobre la pieza encargada de enviarlo a la siguiente etapa, tras lo cual retrocedería la máquina que desplaza la microfluídica para poder levantar la rampa y retirar el conjunto. Para ello sería necesario un mayor desplazamiento por parte de la máquina encargada del movimiento de las agujas.

Otra de las cuestiones importantes a mejorar es el ahorro de tiempo, investigando formas de hacer que el proceso se haga de manera más rápida. Una de estas formas sería conseguir que los desplazamientos se hicieran a una mayor velocidad. Otra forma sería hacer que algunas de las acciones se realicen en paralelo; por ejemplo, los desplazamientos de recogida y empuje tanto de la microfluídica como de las agujas, hasta justo el momento de la inserción, podrían hacerse simultáneamente y ahorrar así tiempo.

También sería conveniente añadir varios detectores que aseguren el correcto funcionamiento del proceso y, en caso contrario, detener la maquinaria. Por ejemplo, se podrían colocar sensores ópticos en la parte inferior de las columnas de alimentación, tanto de la que contiene a las microfluídicas, como de las que contienen a las agujas, que indique si hay o no pieza en dicha posición, ya que de no haberla en alguna de ellas significaría que la columna está vacía y, por tanto, no se tienen los elementos necesarios para realizar la operación deseada. Otro sensor óptico podría colocarse en el extremo de la pieza encargada de retirar la unión de la microfluídica con las agujas, para asegurar que esta ha sido enviada a la siguiente etapa y no permanece sobre dicha pieza cuando esta vuelve a su posición horizontal.

Además de los detectores, sería aconsejable colocar un botón de arranque y parada de la maquinaria para que, en caso de producirse alguna anomalía en el funcionamiento que no sea detectada por los diferentes sensores empleados, se pueda detener la maquinaria manualmente. Este botón también serviría para iniciar el movimiento cuando se desee, ya sea como primer arranque o tras una parada forzada, en vez de que este se produzca con solo conectar el sistema a la fuente de alimentación.

Por último, y puesto que el objetivo final es obtener el LoC completo de manera automática, es necesario que se diseñen y automaticen el resto de etapas que conforman la cadena de producción del mismo. Y, para ello, será necesario también estudiar cómo se puede enlazar el sistema creado en este trabajo con el resto de la maquinaria que componga las demás etapas de la futura línea de producción.

ANEXO A: MANUAL DE USUARIO

En este anexo se explican las acciones que se deben realizar sobre el sistema para que este funcione tal y como cabría esperar.

En primer lugar, deben rellenarse las columnas de alimentación con varias microfluídicas, posicionadas con los agujeros orientados hacia la dirección en la que van a ser empujadas, y varias agujas, posicionadas con sus patas por fuera de las columnas y alineadas horizontalmente. Se deben colocar el mismo número de agujas en cada una de las tres columnas destinadas para ello, como microfluídicas se hayan colocado en su columna correspondiente. Para ello, sería conveniente que tanto la pieza "EmpujaMF" como la pieza "Cogida_doble_3agujas" no estuviesen en su posición más atrasada pulsando sus respectivos interruptores, porque, aunque el sistema funcionaría sin problemas, no permitiría comprobar si la parte del proceso encargada del retroceso de dichas piezas funciona correctamente.

Una vez cargadas las microfluídicas y las agujas, lo único que faltaría para poder iniciar el movimiento es realizar las conexiones necesarias (Figura 3-20) y suministrarle alimentación. Se debe alimentar, por un lado, la placa de Arduino con 5V y, por otro, el actuador electromagnético con 10V.

A continuación, se detallan los pasos que debe realizar el sistema, con el objetivo de que le sirva al usuario de guía de comprobación de que este está funcionando adecuadamente. Los movimientos que deben realizar las distintas máquinas son los siguientes:

- 1º. La pieza "EmpujaMF" se desplaza hacia atrás hasta activar el interruptor. En ese momento, debe haber caído una microfluídica en el hueco de dicha pieza.
- 2º. La pieza "EmpujaMF" se desplaza hacia delante, arrastrando la microfluídica que ha caído en el paso anterior, hasta llegar al punto en el que choca con la base de la máquina encargada del movimiento de las agujas ("Base_cogida_agujas"). Esta pieza permanece en esta posición para sujetar la microfluídica mientras, en pasos posteriores, se le introducen las agujas. Mientras se produce este movimiento, el resto de microfluídicas deben continuar en la columna de alimentación, sin interferir en él.
- 3º. La pieza "Cogida_doble_3agujas" se desplaza hacia atrás hasta activar el interruptor. En ese momento, deben haber caído tres agujas, una de cada columna, en los huecos de dicha pieza destinados para ello.
- 4º. La pieza "Cogida_doble_3agujas" debe desplazarse hacia delante, portando las tres agujas que han caído en el paso anterior, hasta llegar al punto en el que las agujas empiezan a introducirse en los agujeros de la microfluídica. Mientras esto sucede, el resto de agujas deben continuar en las columnas de alimentación, sin interferir en el movimiento de la pieza "Cogida_doble_3agujas".
- 5º. La pieza "Cogida_doble_3agujas" hace, de manera reiterada, un pequeño movimiento de retroceso y luego otro de avance, de forma que las agujas van introduciéndose poco a poco en la microfluídica. Este movimiento intermitente termina cuando la pieza "Cogida_doble_3agujas" llega al extremo de la pieza "Base_cogida_agujas", lo cual indica que las agujas se han introducido la distancia deseada.

- 6°. La pieza "EmpujaMF" se desplaza hacia atrás hasta activar el interruptor, dejando libre la microfluídica. En ese momento, debe haber caído una microfluídica en el hueco de dicha pieza. Este paso es igual que el 1°.
- 7°. La pieza "Rampa" se inclina, levantando el conjunto formado por la microfluídica y las tres agujas, haciendo que este se deslice por ella y caiga fuera por el otro extremo.
- 8°. La pieza "Rampa" vuelve a su posición inicial en horizontal y vuelven a repetirse todos los pasos a partir del 2°.

REFERENCIAS

- [1] E. León and F. Torrealba, «Los Lab-on-a-chip: aplicaciones existentes y desafíos futuros,» *Revista Digital de Investigación y Postgrado de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre"*, Vicerrectorado Barquisimeto. Venezuela. Vol.1 No1.), pp. 19-34, 2011.
- [2] F. Perdignes *et al.*, «Lab-on-PCB With Pre-Stored Reagents at Low Temperature and Automatic Microfluidic Handling,» *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2022, doi: 10.1109/JMEMS.2022.3200297

