

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

Sistema electrónico de control de fluidos mediante
Electrowetting on Dielectric en PCB

Autora: Matilde Nieto Párraga

Tutor: Francisco Antonio Perdigones Sánchez

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

Sevilla, 2022



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

Sistema electrónico de control de fluidos mediante Electrowetting on Dielectric en PCB

Autora:

Matilde Nieto Párraga

Tutor:

Francisco Antonio Perdigones Sánchez

Profesor titular

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

Trabajo Fin de Grado: Sistema electrónico de control de fluidos mediante Electrowetting on Dielectric en PCB

Autora: Matilde Nieto Párraga

Tutor: Francisco Antonio Perdigones Sánchez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Para empezar, me gustaría dar las gracias a mi tutor Fran. Estoy muy orgullosa y contenta del resultado de este proyecto. Realizar este trabajo, gracias a tu guía y tu paciencia, ha sido una experiencia muy chula y me ha hecho aprender muchas cosas.

Gracias a mi familia. Me habéis acompañado durante todo este recorrido, animándome cuando lo necesitaba, celebrando las victorias y apoyándome cuando las cosas no salían bien. Siempre habéis intentado hacérmelo todo más fácil para que yo me pudiera centrar en la carrera, así que este título es tan mío como vuestro.

Gracias a Isma y Carlos. En realidad, también os podría haber mencionado junto con la familia, porque sé que vuestra amistad incondicional la tendré siempre. Muchas gracias por escucharme, aguantarme y alegrarme todos estos años. Sin vosotros todo se me haría mucho más difícil.

Gracias a mis *etsiliados*. No os puedo nombrar uno a uno porque, por suerte, sois unos cuantos. Pocas cosas unen más que compartir los éxitos y, sobre todo, los fracasos que vivimos durante la carrera. Hacíais que pasar todo el día en la universidad; ya sea en el cdc, en la biblioteca o en las salas de estudio, fuera algo que me encantara. Pero todo no era estudiar. Me llevo todas las comidas juntos, el descansar tirados en el césped y los momentos tan especiales que hemos pasado en las casas rurales o en la alameda. Espero conservaros siempre.

Gracias de la misma forma al grupito de Fcom. Aunque os conocí un poco más tarde, también hemos compartido muchas comidas, tardes de estudio y horas en la sala de cultura jugando al poker. Me lo paso genial con vosotros. Habéis sido muy importantes para mí estos años y lo seguiréis siendo.

Gracias Luis. Le has puesto música a mis últimos años de carrera. Contigo me he atrevido a hacer cosas que no podría haber hecho sola, como cantar en la sala o en la gala de ingenieros. Pero, sobre todo, me has apoyado y ayudado mucho en esta etapa. No he podido tener mejor compañero.

Por último, pero no menos importante, tengo que agradecer a Cruzcampo todos esos momentos con mis amigos y familia. No hubiera sido lo mismo sin ti.

Matilde Nieto Párraga

Sevilla, 2022

Resumen

Desde hace varias décadas se lleva incorporando la microfluídica a un gran número de aplicaciones. Las ventajas que ofrece tanto en versatilidad como en rapidez de respuesta e integración en los sistemas han provocado que esta tecnología sea clave para el desarrollo de dispositivos como pantallas, microlentes o los Lab-on-a-Chip.

En este proyecto se va a desarrollar un sistema basado en la técnica de microfluídica discreta llamada Electrowetting on Dielectric. Se explicarán las bases del electrowetting y cómo se han diseñado y fabricado cada una de las partes del sistema. Además, se marcará como objetivo adicional, utilizar materiales de bajo coste.

Abstract

For several decades, microfluidics has been included into a large number of applications. The advantages it offers in versatility, in the speed of response and integration in systems have made this technology key to the development of devices such as screens, microlenses or Lab-on-a-Chip.

In this project, a system based on a discrete microfluidic technique called Electrowetting on Dielectric will be developed. The basics of electrowetting and how each part of the system has been designed and manufactured will be explained. In addition, to use low-cost materials, will be marked as an additional objective.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
1 Introducción y Objetivos	1
1.1 <i>Introducción al Electrowetting</i>	1
1.1.1 Reversed Electrowetting	3
1.2 <i>Objetivos</i>	5
2 Estado del Arte	7
3 Fabricación y Prueba del Circuito	15
3.1 <i>Electrodos</i>	15
3.1.1 Diseño en KiCad	15
3.1.2 Fabricación de los electrodos	19
3.1.3 Resultados de la prueba de los electrodos	21
3.2 <i>Circuito de activación de electrodos</i>	22
3.2.1 Diseño del circuito	22
3.2.2 Fabricación del circuito de activación de electrodos	25
3.2.3 Programa de Arduino	25
3.2.4 Resultados de la prueba del circuito de activación de electrodos	27
4 Sistema Final	29
4.1 <i>Nuevo diseño</i>	29
4.1.1 Diseño del circuito	29
4.1.2 Fabricación del circuito	32
4.2 <i>Fuente de Alimentación</i>	33
4.2.1 Diseño de la Fuente de Alimentación	33
4.2.2 Fabricación de la Fuente de Alimentación	37
4.2.3 Resultados de la prueba de la fuente de alimentación	38
4.3 <i>Prueba del sistema completo</i>	39
5 Conclusiones	43
5.1 <i>Líneas futuras</i>	44
Anexo A: Códigos de Arduino	47
Referencias	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1. Relación entre el ángulo de contacto y la humectación. [7]	2
Tabla 2–1. Comparación de velocidad de diferentes tecnologías de microfluídica. [28]	10
Tabla 3–2. Archivos generados en un proyecto de KiCad. [41]	16
Tabla 3–2. Opciones de KiCad más relevantes en el diseño de este proyecto.	16
Tabla 3–3. Componentes del circuito de activación de electrodos.	23
Tabla 4–1. Componentes de la fuente de alimentación.	35
Tabla 5–1. Precio del sistema final.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Equilibrio de fuerzas en la línea de contacto [6]	2
Figura 1-2. EWOD: a) Estado inicial b) Tras aplicar tensión al electrodo [8]	3
Figura 1-3. Ángulo de contacto entre el líquido y la superficie en función de la tensión aplicada. [9]	3
Figura 1-4. Relación entre el ángulo de contacto y la capacidad total del sistema. [9]	4
Figura 1-5. Relación del ángulo de contacto con la tensión según el reversed electrowetting. [9]	5
Figura 1-6. Esquema del sistema completo.	5
Figura 2-1. Cabezal de impresión de inyección de tinta. [15]	7
Figura 2-2. Diagrama de bloques del analizador de gas mediante cromatografía. [16]	8
Figura 2-3. Esquema de un μ -TAS. [18]	8
Figura 2-4. Anillo hidrofílico permanente formado en la superficie de la película de PET. [25]	9
Figura 2-5. Esquema del efecto de Continuous Electrowetting (CEW) [26]	9
Figura 2-6. Esquema del micromotor líquido y secuencia de polarización de los electrodos. [26]	10
Figura 2-7. A) Esquema del sistema. B) Celda de la lente y el electrodo [27]	10
Figura 2-8. Arquitectura de tres capas con los colores amarillo, magenta y cian. [28]	11
Figura 2-9. Esquema de un sistema EWOD con alimentación inalámbrica mediante acoplamiento inductivo y circuito equivalente del EWOD. [29]	11
Figura 2-10. Movimiento del motor y la carga en un sistema EWOD. [30]	12
Figura 2-11. Dispositivo de diagnóstico FINDER. [33]	12
Figura 2-12. Circuito DMF del sistema FINDER. [33]	13
Figura 2-13. Diseño y fabricación del test de qPCR DMF. [37]	13
Figura 3-1. Logo del software de diseño electrónico KiCad. [39].	16
Figura 3-2. Símbolo de los electrodos.	17
Figura 3-3. Huella de los electrodos.	18
Figura 3-4. Esquemático de los electrodos.	18
Figura 3-5. Layout de los electrodos.	19
Figura 3-6. Visualización 3D de los electrodos.	19
Figura 3-7. Máscara impresa en photoplotter	20
Figura 3-8. Electrodos con Parafilm-M.	21
Figura 3-9. Movimiento de la gota por los cuatro electrodos.	22
Figura 3-10. Esquemático del circuito completo.	23
Figura 3-11. Layout del circuito completo.	24
Figura 3-12. Visualización 3D del circuito completo.	25
Figura 3-13. Resultado de la fabricación del circuito.	25
Figura 3-14. Placa del Arduino Mega 2560. [45]	26

Figura 3-15. Código del programa de Arduino.	26
Figura 3-16. Resultado de la prueba del circuito completo y del programa de Arduino.	27
Figura 4-1. Esquemático de la matriz de electrodos.	30
Figura 4-2. Layout de la matriz de electrodos.	30
Figura 4-3. Esquemático del nuevo circuito de activación de electrodos.	31
Figura 4-4. Layout del nuevo circuito de activación de electrodos.	31
Figura 4-5. Matriz de electrodos.	32
Figura 4-6. Máscara del circuito de activación de electrodos.	32
Figura 4-7. Circuito de activación de electrodos.	33
Figura 4-8. Circuito rectificador de onda completa con puente de diodos.	33
Figura 4-9. Formas de onda de la tensión a la entrada del circuito y a la salida del puente de diodos.	34
Figura 4-10. Formas de onda de la tensión a la entrada y de las tres salidas del circuito.	34
Figura 4-11. Régimen transitorio de las salidas de la fuente de alimentación.	35
Figura 4-12. Esquemático de la fuente de alimentación.	36
Figura 4-13. Layout de la fuente de alimentación.	37
Figura 4-14. Máscara de la fuente de alimentación.	37
Figura 4-15. Fuente de alimentación.	38
Figura 4-16. Prueba fuente de alimentación a 300 voltios.	38
Figura 4-17. Prueba fuente de alimentación a 200 y 100 voltios.	39
Figura 4-18. Disposición y conexionado del sistema completo.	40
Figura 4-19. Gota moviéndose por los 7 electrodos.	40
Figura 4-20. Fuente de alimentación dañada.	41
Figura 4-21. Gotas sincronizadas.	41
Figura 4-22. Gotas desplazándose en sentido contrario.	41
Figura 4-23. Gotas mezclándose.	42

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Si por algo me gusta aprender lo que sea es por enseñarlo; y no hay cosa que, por estúpida y beneficiosa que sea, me agrade si es que tengo que saberla para mí solo.

- Lucio Anneo Seneca. "Cartas a Lucilio"-

Desde finales del siglo XVII conocemos el mundo microscópico. Al principio solo nos dedicábamos a observar, pero con el paso del tiempo aprendimos a cambiar y crear sistemas que aprovecharan las ventajas de trabajar a esta escala. Estos sistemas se denominan MEMS y, su principal uso, es el de captar y medir fenómenos imposibles de detectar con métodos macroscópicos [1].

Debido a que podemos escalar prácticamente cualquier componente, hay MEMS que cubren innumerables disciplinas. Además, su alta integración en chips nos permite llegar a conseguir especificaciones impensables para la tecnología de hace unos años. Entre ellos encontramos sensores, actuadores, dispositivos audiovisuales, de radiofrecuencia, etc. Pero los que nos interesan en este trabajo son los de micro fluidos. Estos últimos permiten trabajar con volúmenes minúsculos de líquidos que son usados, en su mayor parte, para dispositivos biomédicos, microlentes o pantallas. [2]

Dentro de la microfluídica podemos encontrar sistemas de flujo continuo mediante microcanales y dispositivos de gotas discretas. Nos centraremos en la microfluídica discreta (DMF). Las ventajas de trabajar con DMF son varias. En primer lugar, podemos controlar perfectamente las cantidades de reactivos que queremos y agregarlas individualmente, además de necesitar muy poca cantidad de producto. También nos beneficiamos de una respuesta muy rápida y una alta integración en sistemas como los Lab-on-a-Chip.[3]

En este trabajo, en concreto, vamos a diseñar e implementar un sistema de microfluídica discreta basado en el Electrowetting. A continuación, explicaremos el funcionamiento de esta técnica de control de fluidos.

1.1 Introducción al Electrowetting

Como hemos comentado anteriormente, la función del Electrowetting es la de desplazar gotas de líquido. Esto se consigue gracias a una matriz de electrodos y una tensión alta. Se va cambiando la tensión de un electrodo a otro y, el campo eléctrico que se genera modifica la humectación de la gota y, por tanto, su posición. Pero ¿Cómo se relaciona la humectación con la posición? [3][4]

La mojabilidad es la capacidad que tiene un líquido de extenderse e impregnar un sólido. Si se coloca un líquido en una superficie sólida y plana, la tensión superficial del líquido y las fuerzas adhesivas a la superficie tienden al equilibrio. Esto quiere decir que el ángulo de contacto entre las dos fases (sólido y líquido) cambia según las propiedades del material para lograr que las fuerzas del sistema estén en armonía. [5] Este equilibrio puede apreciarse en la figura 1-1.

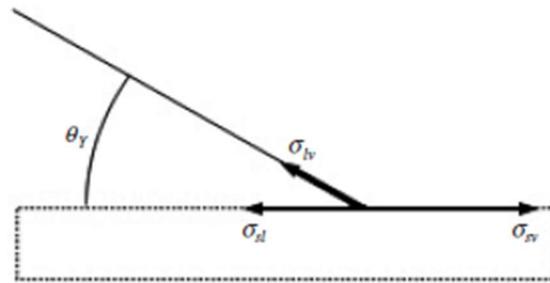


Figura 1-1. Equilibrio de fuerzas en la línea de contacto [6]

La siguiente ecuación se conoce como la ecuación de Young y gracias a ella podemos relacionar las energías interfaciales del líquido, la superficie sólida y el aire con el ángulo de contacto entre el líquido y el sólido.

$$\cos \theta_Y = \frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}}$$

Las energías interfaciales surgen del contacto entre las fases. σ_{sv} se refiere a sólido-vapor, σ_{sl} a sólido-líquido y σ_{lv} a líquido-vapor. Cuanto más pequeño es el ángulo de contacto más alta es la mojabilidad y viceversa. Es decir, si θ_Y es mayor de 90° consideraremos que tenemos una superficie hidrofóbica y nuestra gota quedará redondeada. Sin embargo, si el ángulo es menor de 90° estaremos ante una superficie hidrofílica y la gota se extenderá sobre el sólido. [3][6]. La tabla 1-1 refleja la mojabilidad para cualquier ángulo de contacto.

Ángulo de contacto	Mojabilidad
$\theta_Y = 0^\circ$	Total
$0^\circ < \theta_Y < 90^\circ$	Alta
$90^\circ < \theta_Y < 180^\circ$	Baja
$\theta_Y = 180^\circ$	Nula

Tabla 1-1. Relación entre el ángulo de contacto y la mojabilidad. [7]

Como indica el nombre de nuestro proyecto, **Electrowetting on Dielectric**, usaremos un dieléctrico entre los electrodos y la gota para evitar la hidrólisis del agua y, además, añadiremos una capa hidrofóbica para mantener nuestra gota compacta y que no se extienda mientras no se esté aplicando tensión. Pero en la ecuación de Young que acabamos de ver no interviene la tensión, ¿Cómo la enlazamos entonces? La respuesta nos la proporciona Lippmann con la siguiente ecuación.

$$\sigma_{sl}^{eff}(U) = \sigma_{sl} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{2d} U^2$$

La tensión superficial entre el dieléctrico y la gota cambia en función de la tensión aplicada en los electrodos. Esto se debe a que se crea un cúmulo de cargas en el metal cuando le aplicamos tensión y, en contrapartida, emergen contraiones en el lado del líquido, formando una capacidad compuesta de dos capacidades (metal-dieléctrico y dieléctrico-líquido) y disminuyendo la tensión superficial. ϵ_d es la constante dieléctrica del dieléctrico, d es el grosor del dieléctrico y U es la tensión aplicada. [6]

Por último, para obtener una relación directa entre el ángulo de contacto y la tensión aplicada sustituimos la ecuación de Lippmann en la de Young:

$$\cos \theta = \cos \theta_Y + \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{2d \sigma_{lv}} U^2$$

En la figura 1-2 se puede advertir la diferencia en el ángulo de contacto cuando aplicamos tensión al electrodo.

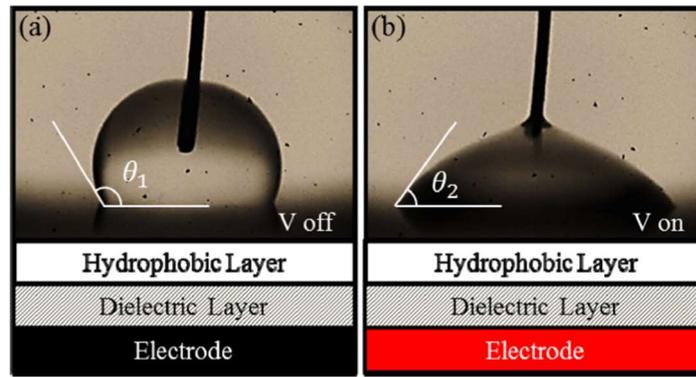


Figura 1-2. EWOD: a) Estado inicial b) Tras aplicar tensión al electrodo [8]

Con todo esto solo nos queda explicar el movimiento de la gota. Como hemos visto en este apartado, podemos cambiar el ángulo de contacto entre la gota y la superficie aplicando una tensión eléctrica. Inicialmente tendremos la gota en un electrodo sin tensión y, por lo tanto, en una superficie hidrofóbica, con un ángulo de contacto mayor a 90° . Para que se desplace al electrodo vecino, se aplica tensión a este segundo electrodo, consiguiendo que el ángulo de contacto en su superficie se decremente y cambie la mojabilidad del líquido. El líquido se expandirá hacia este electrodo gracias a encontrarse en una superficie hidrofílica, convirtiendo la energía eléctrica en mecánica. La gota debe ser lo suficientemente grande como para superponerse un mínimo en los electrodos vecinos. [3][8]

A partir de ahora se seguirá hablando del electrowetting, pero más adelante se diseñará un circuito que no se fundamenta en el electrowetting tal y como se ha explicado. Hasta ahora, el funcionamiento del electrowetting ha consistido en el desplazamiento de una gota desde una superficie hidrofóbica, a la que no se le está transfiriendo tensión, hacia una superficie hidrofílica con una alta tensión aplicada. Sin embargo, en el diseño escogido, emplearemos el *reversed electrowetting*. Su desempeño es prácticamente igual, salvo porque, en este caso, la gota se mueve de alta tensión a baja tensión.

1.1.1 Reversed Electrowetting

Esta subsección se basa en el contenido del artículo de Dan Klarman et al. [9] En dicho artículo se explica cómo se produce *reversed electrowetting*. Además, se realiza un montaje que respalda la teoría propuesta. Para entender cómo funciona dicho fenómeno, hay que saber qué es el ángulo de saturación en el electrowetting.

Como se ha especificado anteriormente, mediante la ecuación de Young-Lippmann se puede cambiar el ángulo de contacto entre una gota de líquido y la superficie en la que se encuentra gracias a una tensión eléctrica. En el caso del electrowetting, se utiliza el incremento de tensión para disminuir el ángulo de contacto y aumentar así la mojabilidad de la superficie. Pero el ángulo no puede disminuir hasta el infinito por mucha tensión que se le aplique, por lo que hay cierto valor, llamado saturación de ángulo de contacto, a partir del cual se deja de cumplir la ecuación de Young-Lippmann. En la siguiente figura se representa la variación del ángulo de contacto con la tensión. La línea continua desciende hasta llegar al valor de saturación, pero si no se produjera saturación y se siguiera la ecuación de Young-Lippmann, la función sería la trazada por la línea discontinua.

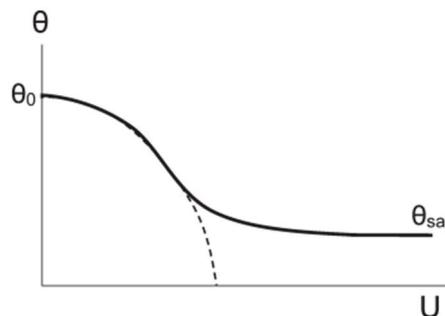


Figura 1-3. Ángulo de contacto entre el líquido y la superficie en función de la tensión aplicada. [9]

El ángulo θ_0 se refiere al ángulo de Young (θ_Y). Este es el ángulo que presenta el sistema en equilibrio, cuando las energías interfaciales están en armonía y no hay ninguna tensión aplicada. Cómo se determina el ángulo de saturación es un tema un poco polémico, ya que hay varios modelos que intentan explicar su origen. En este artículo se llega a dicho ángulo analizando la energía libre del sistema. Los resultados obtenidos concuerdan con los datos recogidos experimentalmente.

La energía libre o energía libre termodinámica es la capacidad de un sistema de realizar un trabajo y convertir parte de su energía en energía de otro tipo. [10] En el caso de nuestro sistema, tenemos que distinguir dos estados. El primero es cuando el sistema se encuentra en reposo y el segundo cuando se le aplica tensión. La energía libre total es la suma de las energías libres de cada estado.

$$F_{tot}(\theta, U) = F_{cap}(\theta) + F_{el}(\theta, U)$$

En el primer estado el comportamiento de la gota está definido por la tensión superficial, por lo que la energía libre, a la que llamaremos energía libre por capilaridad (F_{cap}), se concreta en la siguiente ecuación:

$$F_{cap}(\theta) = A_{sv}\sigma_{sv} + A_{sl}\sigma_{sl} + A_{lv}\sigma_{lv} - V\Delta P$$

Siendo A_{ij} el área que comparten las fases, σ_{ij} las energías interfaciales y ΔP la diferencia de presión en la interfaz líquido-vapor. Hemos dejado fijado el volumen (V) del sistema al volumen de la gota. $F_{cap}(\theta)$ es una funcional de la forma de la gota. Una funcional es una función que toma funciones como su argumento. Es decir, una función cuyo dominio es un conjunto de funciones. [11] Según el principio de energía mínima, deducido de la segunda ley de la termodinámica, se declara que, para un sistema cerrado y con parámetros externos constantes, la energía interna disminuirá y su valor será cercano al mínimo en el equilibrio. [12] Para encontrar el ángulo de contacto en el equilibrio θ_Y , debemos determinar los mínimos en la funcional $F_{cap}(\theta)$ mediante cálculo variacional. De esta forma es como se llega a la ecuación de Young y a su ángulo de contacto θ_Y .

Por otra parte, en el segundo estado, la energía libre total la define la energía libre por campo eléctrico (F_{el}), cuya ecuación es la que sigue:

$$F_{el}(\theta, U) = -\frac{1}{2}C_{tot}(\theta)U^2$$

$C_{tot}(\theta)$ es la capacidad total que surge de la acumulación de cargas al aplicar tensión y esta capacidad depende del ángulo de contacto. ¿Por qué no consideramos ya F_{cap} ? La razón es que, según vamos subiendo la tensión, $|F_{el}| \gg F_{cap}$, por lo que F_{tot} solo depende de F_{el} . Ahora vamos a hacer lo mismo que en el estado de reposo, es decir, vamos a buscar los mínimos de F_{el} y encontrar cuál es el ángulo de contacto al que tiende el sistema para minimizar su energía. Este ángulo de contacto es el de saturación, θ_{sat} .

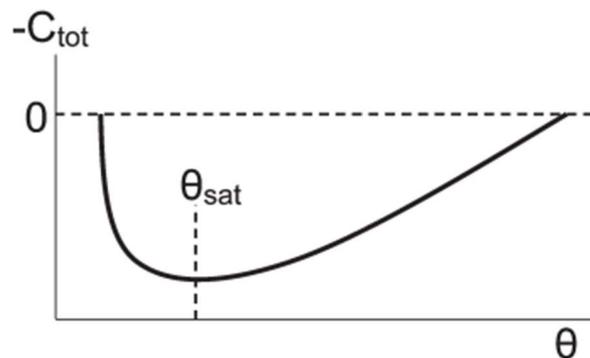


Figura 1-4. Relación entre el ángulo de contacto y la capacidad total del sistema. [9]

En resumen, cuando no se aplica tensión al sistema, la energía libre total solo depende de la energía libre por capilaridad y el ángulo de contacto tiende a θ_Y . Sin embargo, cuando subimos la tensión, solo se tiene en cuenta la energía libre por campo eléctrico y el ángulo de contacto tiende a θ_{sat} . Se ha comprobado que ambos términos de F_{tot} son independientes, por lo que es posible que el ángulo de saturación sea mayor que el ángulo θ_Y . Esto significa que, si se sube la tensión, aumentaría el ángulo de contacto, yendo en contra del funcionamiento normal del electrowetting. En la siguiente figura puede observarse el resultado del experimento de reversed electrowetting.

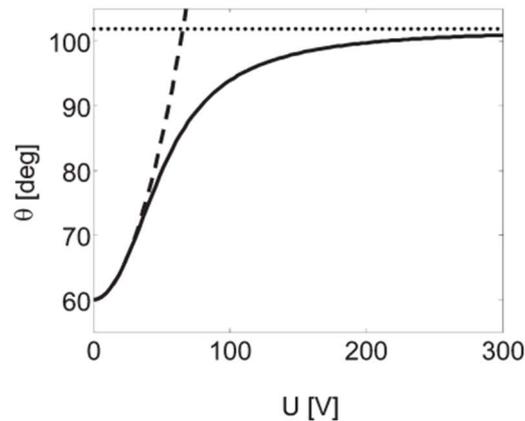


Figura 1-5. Relación del ángulo de contacto con la tensión según el reversed electrowetting. [9]

1.2 Objetivos

Este proyecto consiste en diseñar e implementar un circuito electrónico capaz de controlar una gota de líquido mediante electrowetting. Para ello se divide el sistema en cuatro partes:

- Electrodo: se fabricará una matriz de electrodos por los que se trasladará la gota.
- Fuente de alimentación: dará el voltaje necesario para que la gota se mueva de un electrodo a otro.
- Programa de Arduino: se controlará el movimiento de la gota programando en un Arduino el recorrido deseado.
- Circuito de activación de electrodos: cambiará la tensión al electrodo que se le indique mediante el programa y activará el LED asociado a dicho electrodo.

Por lo tanto, el objetivo fundamental del trabajo es diseñar y fabricar el sistema completo, representado en la figura 1-6, uniendo todas las partes tras verificar su correcto funcionamiento.

Como requisito adicional, se procurará que el dispositivo sea de bajo coste, eligiendo materiales y componentes que nos permitan disminuir el precio de la fabricación.

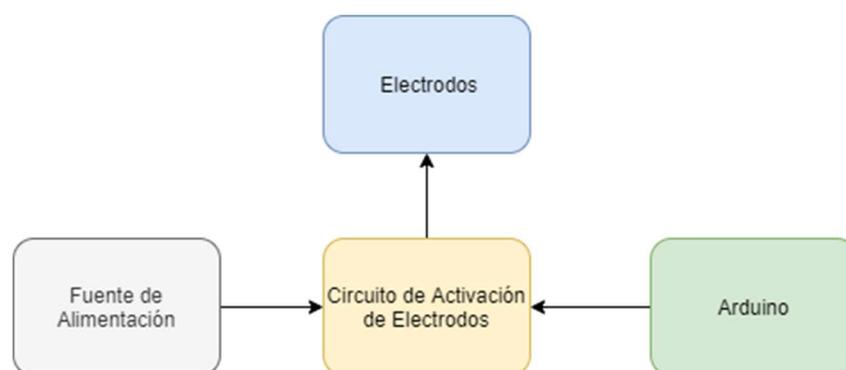


Figura 1-6. Esquema del sistema completo.

2 ESTADO DEL ARTE

Progresar es tanto innovar como conservar lo conseguido.
- Fernando Savater. "Diccionario del ciudadano sin miedo a saber"-

Es necesario poner en contexto la tecnología que se utiliza en este trabajo. Estar al tanto del desarrollo del electrowetting, así como de su aplicación en la industria y los últimos avances en esta materia, pueden ayudar a entender la razón de uso de esta técnica y la importancia que sostiene de cara a nuevos adelantos tecnológicos.

El electrowetting y la microfluídica pueden parecer métodos muy avanzados, pero desde las investigaciones de Lippmann a finales del siglo XIX, sobre la electrocapilaridad, se lleva indagando en el funcionamiento y perfeccionamiento del control de líquidos.

Probablemente, el primer dispositivo en emplear microfluídica fue el cabezal de impresión de inyección de tinta. En 1965, Richard G. Sweet, realizó un oscilógrafo capaz de hacer mediciones a una frecuencia de 100.000 muestras por segundo. Para ello, dividió un chorro de tinta en gotas y cargó eléctricamente cada una de éstas en proporción a la tensión de la señal de entrada. Después las pasó a través de un campo eléctrico uniforme que las desviaba hasta que chocaban con un papel en movimiento, formando el gráfico que representaba la señal medida. En la siguiente figura pueden verse los componentes de este dispositivo. [13][14]

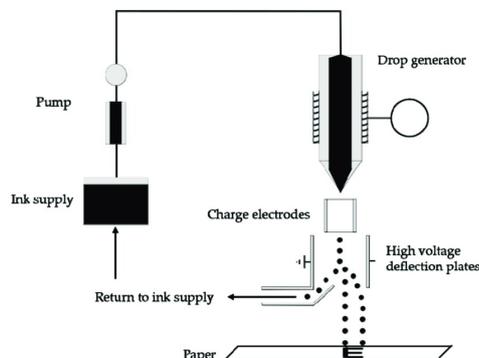


Figura 2-1. Cabezal de impresión de inyección de tinta. [15]

Un gran impulso para la microfluídica ha sido el uso del silicio. Inicialmente se empezaron a diseñar circuitos microelectrónicos y, gracias al refinamiento de la fotolitografía, posteriormente fue posible la fabricación de estructuras tridimensionales en silicio. Este suceso permitió desplegar las ventajas que conlleva trabajar a nivel microscópico y trasladarlas a otras áreas fuera de la electrónica.

La biología molecular fue de las primeras disciplinas que se valieron de estas nuevas técnicas. En concreto, en 1979, se fabricó un analizador de gas mediante cromatografía. La cromatografía es una técnica de análisis de fluidos, tanto líquidos como gases, que se basa en la separación de los componentes de la muestra. Para conseguir esta separación hacemos que la sustancia a analizar entre en el sistema a diferente velocidad que el resto de la muestra. La válvula de inyección de las muestras, la columna capilar, encargada de separar los componentes de la muestra, y el detector de conductividad térmica se montaron en el sustrato de la oblea de silicio, agilizando mucho el proceso y consiguiendo un tiempo de respuesta significativamente más corto. La figura 2-2 representa el sistema del analizador. [13][16][17]

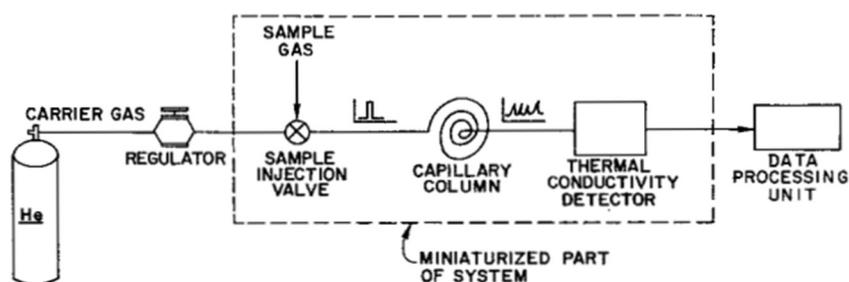


Figura 2-2. Diagrama de bloques del analizador de gas mediante cromatografía. [16]

La evolución que se alcanzó tras introducir nuevos materiales y mejorar los procesos de fabricación provocó que la microfluídica creciera y se desarrollara, sobre todo en el ámbito de la biotecnología. Por ejemplo, en 1990, nacieron los μ -TAS (Miniaturized Total Analysis Systems). Este tipo de microsistemas trata de agrupar todos los pasos necesarios para el análisis químico de una sustancia en un solo dispositivo. Con ese fin se disminuyó el diámetro y la longitud de los canales. Así consiguieron mejorar la separación de la muestra y disminuir su tiempo de transporte. En la siguiente figura se muestran algunos elementos que forman parte de los μ -TAS [18]

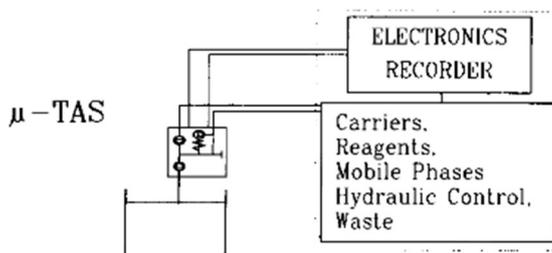


Figura 2-3. Esquema de un μ -TAS. [18]

Los dispositivos citados anteriormente se basan en microcanales y, de ahora en adelante, veremos el progreso del electrowetting. Esta técnica surgió en 1981 de la mano de G. Beni y S. Hackwood. La motivación que los llevó a desarrollarla fue la de crear una pantalla pasiva con un tiempo de respuesta muy rápido y un consumo bajo, ya que utilizaba tensiones por debajo del voltio. Esta pantalla en concreto era capaz de cambiar de transparente a blanca de forma reversible. [19]

Aunque las pantallas basadas en microfluídica discreta no habían hecho más que empezar, dos años más tarde, en 1983, se utilizó el electrowetting como interruptor para fibra óptica multimodo. Las ventajas que se consiguieron son similares a las mencionadas en la pantalla pasiva, es decir, bajo tiempo de respuesta y bajo consumo. Además, el interruptor se probó en más de un millón de ciclos sin ningún signo de degradación. [20]

Siguiendo con las fibras ópticas, en 1987 se volvió a dar uso al electrowetting para eliminar el modo TM de una luz guiada. En el artículo escrito por R. C. Gauthier, B. E. Paton, et al. se discuten diferentes formas de cambiar la posición de una gota de mercurio que hace de revestimiento en la guía de un polarizador/atenuador óptico, siendo el electrowetting una de ellas. [21]

En 1989 se utilizó el electrowetting en un sistema de refrigeración líquida para dispositivos microelectrónicos. El líquido refrigerante se desplazaba por unos microcanales gracias al electrowetting, que actuaba como lo haría una microbomba. La gran diferencia a la hora de no usar microbombas en el diseño es que, al no tener

partes móviles, se consiguió reducir el tamaño garantizando una presión similar en ambos casos. [22]

Otro giro importante se produjo en 1993 y vino de la mano de Bruno Berge. Dicho investigador fue el primero en emplear el Electrowetting on Dielectric (EWOD). Incluyó una película aislante entre el electrodo y una gota de líquido y demostró que el principio del electrowetting seguía funcionando, además de evitar la electrólisis. [23] Durante los siguientes años se estudiaron diferentes materiales aislantes y sus propiedades cuando se les aplicaba en sistemas basados en EWOD. Por ejemplo, en 1995 se investigó sobre una película de tereftalato de polietileno (PET) de $12\mu\text{m}$, siendo este uno de los polímeros plásticos más utilizados en la industria. Con el fin de averiguar la relación entre el ángulo de contacto y la tensión aplicada, se realizaron experimentos que concluyeron en un cambio de mojabilidad irreversible en el material. Si se llega a una tensión lo suficientemente alta, se forma un anillo hidrofílico permanente que marca el perímetro de la gota cuando la tensión está activa. En la siguiente figura puede apreciarse el anillo formado tras aplicar una tensión de 250 V durante 5 minutos. [24][25]

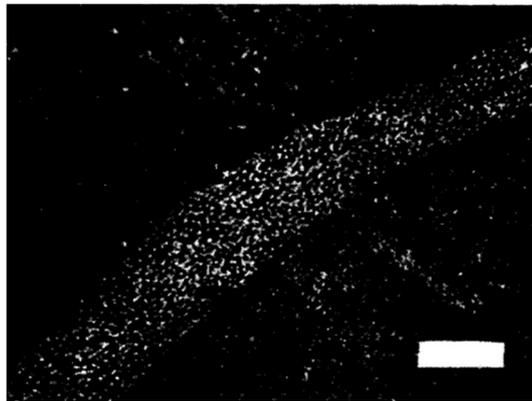


Figura 2-4. Anillo hidrofílico permanente formado en la superficie de la película de PET. [25]

En 1998 se desarrolló una técnica llamada Continuous Electrowetting (CEW). Su funcionamiento es similar al del electrowetting convencional pero, en este caso, se mueve una gota de mercurio dentro de un canal lleno de electrolitos. A ambos lados del canal se posicionan dos electrodos, activándose solo uno de ellos. La energía potencial entre el mercurio y los electrolitos se incrementa cuanto más nos alejamos del electrodo activado. Teniendo en cuenta que cuando aumenta el potencial, disminuye la tensión superficial, la gota de mercurio se desplazará hacia el electrodo negativo donde la tensión superficial es menor. La figura 2-5 representa el sistema cuando el electrodo encendido es el izquierdo. Se puede apreciar que la densidad de cargas eléctricas en la interfaz mercurio-electrolito se acrecenta hacia la derecha y, precisamente en este sentido, se genera el movimiento. [26]

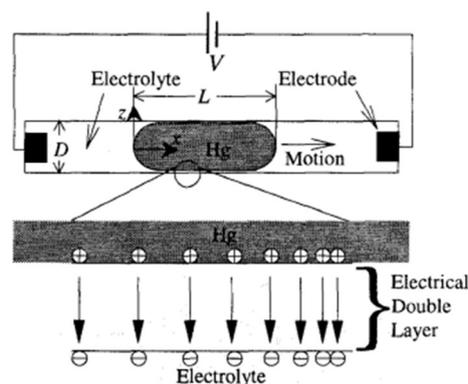


Figura 2-5. Esquema del efecto de Continuous Electrowetting (CEW) [26]

Uno de los dispositivos que surgió de este invento fue el micromotor líquido. El canal era un tubo circular que encerraba 4 gotas de mercurio separadas entre sí y una solución de sulfato de sodio como electrolito. Para asegurar que el movimiento de las gotas fuera constante se pusieron varios electrodos a lo largo del canal. La función de estos electrodos era cambiar de polaridad antes de que la gota se detuviera, de esta forma se movería siempre al electrodo vecino y, después, volverían a cambiar la polaridad para mantener el movimiento en una sola dirección. Tanto el esquema del micromotor como la polaridad de los electrodos se reproducen en

la siguiente figura. Los electrodos con el mismo número están conectados entre sí. [26]

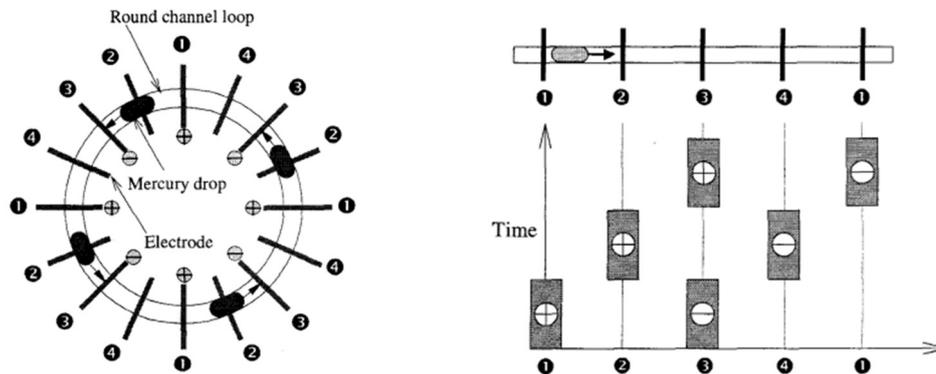


Figura 2-6. Esquema del micromotor líquido y secuencia de polarización de los electrodos. [26]

Volviendo al Electrowetting on Dielectric, en el año 2000 se diseñó una lente con distancia focal variable. Su funcionamiento se basa en cambiar la forma de una gota redonda para que varíe a su vez la distancia focal de la lente. Dentro de una celda fabricada de películas de polímero estiradas, se encuentra una gota redonda de 1-bromododecano. Además de la gota, el compartimento está relleno de sulfato de sodio debido a que este líquido es conductor. La elección del material de la gota se debe a que es orgánico, apolar y no es miscible en agua. También tiene la misma densidad que el sulfato de sodio, por lo que la gravedad no deformará la interfaz líquido-líquido. Debajo de la película de polímero se encuentra un electrodo, que no es más que otra celda llena de agua salada a la que se le aplicará tensión para conseguir deformar la gota. En la figura 2-7 A) se aprecia la gota tanto en reposo como con la tensión activa y, en la B), las celdas de la lente y el electrodo. [27]

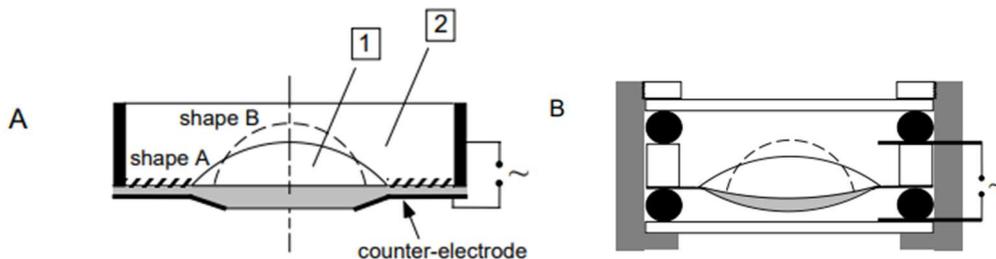


Figura 2-7. A) Esquema del sistema. B) Celda de la lente y el electrodo [27]

Hasta ahora hemos visto las aplicaciones más importantes del electrowetting, esto es, pantallas, fibra óptica, Lab-on-a-Chip y microlentes. Estas utilidades siguen siendo las que predominan hoy en día, pero los dispositivos han progresado notablemente gracias a las numerosas investigaciones en este campo. En 2006, B. J. Feenstra et al., presentaron una pantalla basada en electrowetting que dista mucho de la primera diseñada en 1981. La principal característica de este sistema es que se trata de una pantalla a color. En el artículo citado se muestran dos arquitecturas diferentes para obtener una pantalla reflectante de bajo consumo y alta velocidad de movimiento del líquido. En la siguiente tabla se compara la velocidad del electrowetting con otras técnicas de microfluídica. [28]

Technology	Max. Velocity (mm/s)	References [full details in citations 5 – 12]
Electrowetting	100	Prins <i>et al.</i> , Science 2001, Pollack <i>et al.</i> , APL 2000
Thermocapillarity	15	Sakata <i>et al.</i> , J. Lightwave Tech 2001
Redox-active surfactants	2	Gallardo <i>et al.</i> , Science 1999
Electro-osmosis	0.2	Schasfoort <i>et al.</i> , Science 1999
Structured surfaces	0.15	Sandre <i>et al.</i> , Phys Rev E 1999
Photoresponse	0.05	Ichimura <i>et al.</i> , Science 2000
Patterned surface with thermocapillarity	0.003	Kataoka <i>et al.</i> , Nature 1999

Tabla 2–1. Comparación de velocidad de diferentes tecnologías de microfluídica. [28]

El electrowetting es, con diferencia, la tecnología más rápida y por ello es muy útil en este tipo de dispositivos. Como hemos mencionado anteriormente hay dos arquitecturas diferentes, la monocapa y la de tres capas.

Explicaremos la segunda ya que, aun siendo un poco más costosa, da mejores resultados en cuanto a rendimiento óptico. Además, no hay subdivisión del píxel en los colores RGB. Su funcionamiento se basa en el movimiento de una gota de aceite tintado dentro de una celda de agua. Un sustrato reflectante de color blanco con un electrodo encima se encarga de aplicar tensión cuando no queramos que se vea el color del aceite en el píxel. Con esto se consigue mover a un lado la gota de aceite y dejar que el sustrato refleje la luz. Para crear una gran variedad de colores sin necesidad de filtros de color, se colocan tres capas monocromáticas, una encima de otra, con los colores magenta, amarillo y cian. Cada capa se podrá activar y desactivar por separado. En la figura 2-8 se dibuja un píxel con las tres capas de color. [28]

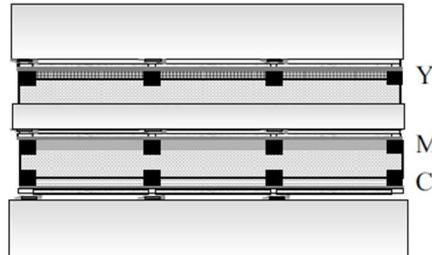


Figura 2-8. Arquitectura de tres capas con los colores amarillo, magenta y cian. [28]

El siguiente artículo no trata sobre una aplicación del EWOD, como la mayoría de los estudios aludidos hasta ahora, sino que explora una nueva forma de sacarle partido a este procedimiento. En 2013, Sang Hyun Byun y Sung Kwon Cho, consiguieron implementar un dispositivo EWOD cuya alimentación era inalámbrica. Para ello utilizaron el acoplamiento inductivo basándose en un circuito LC resonante, configuración utilizada tanto para el transmisor de energía como para el receptor. El receptor se sitúa dentro del campo magnético que genera el transmisor y éste induce voltaje en la bobina receptora. Básicamente es como un transformador. Además, la tensión inducida es AC y, aunque el electrowetting sigue funcionando en alterna, hay una frecuencia ω_c llamada frecuencia de corte. Si esta frecuencia se supera, se pasa de tener una gota conductora a un aislante eléctrico. Por lo tanto, la gota puede modelarse como una resistencia y un condensador en paralelo. En la siguiente figura se representa el circuito del sistema y el modelado de la gota. [29]

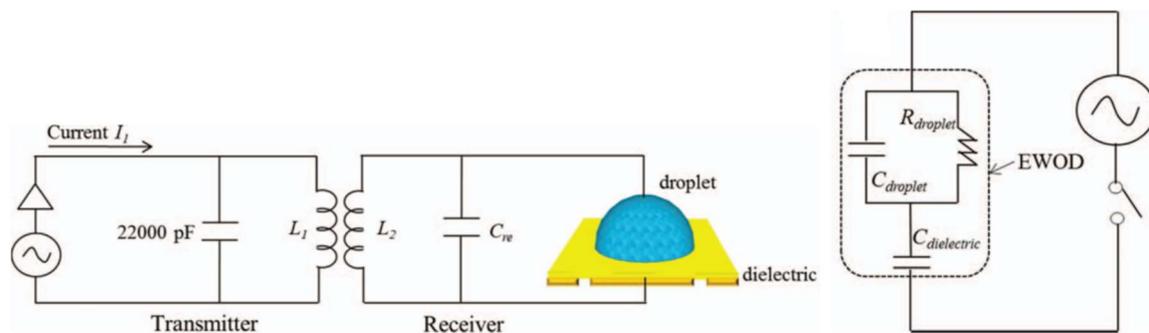


Figura 2-9. Esquema de un sistema EWOD con alimentación inalámbrica mediante acoplamiento inductivo y circuito equivalente del EWOD. [29]

La dificultad que se encontraron fue que la gota no era capaz de oscilar a una frecuencia de más de 100 kHz, pero esta frecuencia es importante, ya que si se transmite a menos no se obtiene el voltaje necesario para las aplicaciones de EWOD. La solución que encontraron fue la de modular en amplitud el movimiento de la gota y dejar de portadora la señal de alta frecuencia para garantizar el correcto funcionamiento. La siguiente ecuación muestra la modulación AM de la señal de alimentación y control de movimiento:

$$s(t) = A \cos(\omega_{carry} t) \cdot [1 + B \cos(\omega_{env} t)]$$

Siendo A la amplitud de la portadora y B la constante de la envolvente. En consecuencia, en este estudio, se mandaron 300 voltios a una frecuencia de 137 kHz y la gota, siguiendo la envolvente de la señal, se desplazaba a razón de 122 Hz. [29]

Para finalizar este capítulo faltaría mencionar tres artículos recientes relacionados con los sistemas Lab-on-a-Chip. La necesidad de elegir este tema es debido al beneficio que está suponiendo el electrowetting para el sector biomédico y químico.

En 2019, Matin Torabinia, Parham Asgari et al., crearon un dispositivo capaz de realizar síntesis orgánica utilizando EWOD. La síntesis orgánica consiste en obtener compuestos orgánicos complejos a través de reacciones químicas entre sustancias simples. Un ejemplo de molécula obtenida gracias a la síntesis orgánica es la sacarina, por lo que puede apreciarse la importancia que este proceso tiene actualmente. El problema de realizar síntesis orgánica mediante EWOD reside en la manipulación de los solventes. Estas sustancias suelen ser solventes apróticos polares o apolares, es decir, carecen de moléculas N-O o H-O, lo que les impide dar y aceptar protones. La poca movilidad que llegan a experimentar con la técnica de EWOD hace imposible utilizarla.

Para resolver este problema se ideó un sistema basado en motor y carga. Sobre una matriz de electrodos se disponen dos gotas. Una es de líquido con propiedades de electrowetting, éste será el motor. La otra gota es de líquido que no puede moverse y será la carga. El funcionamiento del sistema se basa en que las gotas son inmiscibles y que, al acercar el motor a la carga, formarán una gota compuesta para minimizar la energía libre superficial. Como la sustancia del motor tendrá una tensión superficial mayor que la de la carga, al mover la gota compuesta, se desplazarán las dos gotas debido a la fuerza de arrastre viscosa que ejerce el motor. En la figura 2-10 se representa el movimiento de ambas sustancias. [30][31][32]

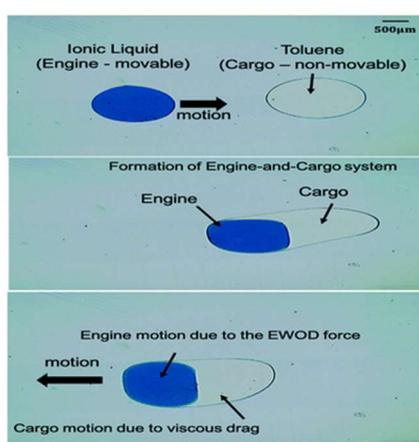


Figura 2-10. Movimiento del motor y la carga en un sistema EWOD. [30]

En el año 2020, la empresa Baebies consiguió crear una plataforma para el diagnóstico de múltiples enfermedades llamada FINDER. Esta empresa está especializada en la fabricación de dispositivos para el diagnóstico de enfermedades a bebés y niños. El núcleo de esta idea es la microfluídica discreta. Gracias al diseño de FINDER, se pueden realizar varios tipos de análisis en el mismo dispositivo. Este sistema está formado por una placa PCB, que contiene el circuito electrónico y de microfluídica, y una mini Tablet Android para poder correr aplicaciones. Además, cuenta con dos fluorímetros que miden la fluorescencia y un espectrómetro de absorción de espectro completo. Este último sirve para determinar la absorción de radiación en un amplio rango de frecuencias. En la figura 2-11 se presenta tanto el dispositivo completo como la placa donde se realizan las pruebas un poco más en detalle. [33]



Figura 2-11. Dispositivo de diagnóstico FINDER. [33]

Algunos ejemplos de tests que se han realizado son TBLI o ALB. El TBLI o test de bilirrubina total, es una forma de control de la ictericia. El ALB es una prueba de albúmina en la sangre. La albúmina es una proteína producida por el hígado. Esta proteína ayuda a transportar hormonas, proteínas y enzimas por el cuerpo, por lo que un nivel bajo de albúmina puede suponer daño en el hígado o en los riñones. Adicionalmente, también es

útil para llevar a cabo PCR rápida. En la siguiente figura se muestra el circuito de DMF. En caso de realizar una PCR, se encarga de concentrar la muestra, limpiarla y eluir el ARN del virus calentándola y moviéndola. Por último, detecta la transcriptasa inversa, enzima que utilizan los retrovirus para convertir su ARN en ADN vírico. [33][34][35][36]

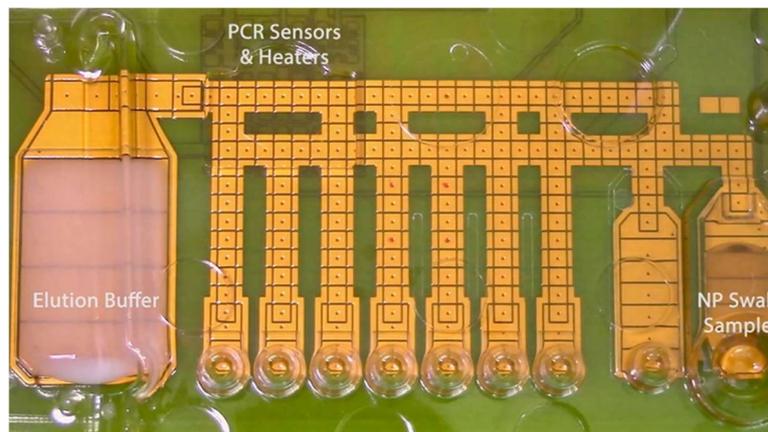


Figura 2-12. Circuito DMF del sistema FINDER. [33]

Por último, queda citar el trabajo de Kuan-Lun Ho et al. realizado en enero de este año 2022. En este artículo fabrican un test desechable para detectar el gen del SARS-CoV-2 mediante qPCR. La PCR cuantitativa (qPCR) se utiliza para detectar y cuantificar ácidos nucleicos. Se realiza mediante un tinte fluorescente que se une a la cadena de ADN amplificada. Midiendo la fluorescencia podemos cuantificar en tiempo real la cantidad de ADN replicado, ya que dicha señal de fluorescencia y la cantidad de ADN son proporcionales. En el caso del Covid, se detecta el ARN del virus. Gracias a la microfluídica discreta estos tests cuentan con la ventaja de trabajar con muy poca cantidad de muestra y detectar con rapidez los resultados de los procedimientos. El test de qPCR DMF diseñado constaba de una placa superior transparente hecha de policarbonato (PC) y una placa inferior fabricada con PCB. El PCB contiene electrodos de cobre cubiertos por una película dieléctrica de poliimida (PI) y una capa hidrofóbica con flúor. Las placas superior e inferior se conectaron eléctricamente. La placa inferior de PCB contenía un total de 274 electrodos que ofrecieron la posibilidad de realizar múltiples reacciones de qPCR simultáneas. [37][38]

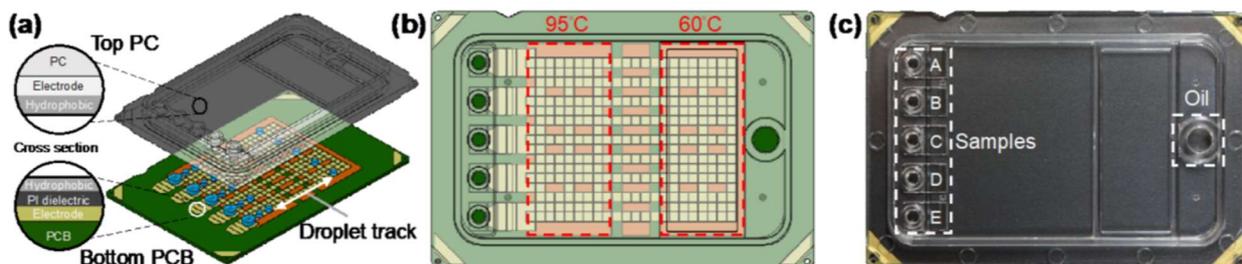


Figura 2-13. Diseño y fabricación del test de qPCR DMF. [37]

En la figura 2-13 se aprecia el dispositivo antes descrito. En la imagen a) se exponen los materiales de los que está compuesto y el circuito de microfluídica en la PCB. En la b) podemos ver las entradas diseñadas para la inserción de las muestras y el aceite, además de las zonas con diferente temperatura para la realización de la PCR. Por último, en la c), se nos muestra el dispositivo ya montado y cubierto con la carcasa.

3 FABRICACIÓN Y PRUEBA DEL CIRCUITO

El proceso de aprender un arte puede dividirse convenientemente en dos partes: una, el dominio de la teoría; la otra, el dominio de la práctica.

- Erich Fromm. "El arte de amar"-

Ya que se han introducido los fundamentos del electrowetting y se ha contextualizado dicha tecnología, aprovecharemos los conocimientos adquiridos para realizar un sistema de control de fluidos. Como se expuso en los objetivos del trabajo, el proyecto se divide en cuatro partes, que se irán desarrollando en los siguientes capítulos. En este capítulo se describe el proceso de diseño y fabricación de los electrodos, parte principal del sistema, y del circuito de activación de electrodos. Además, se incluirá el pequeño programa de control de Arduino.

3.1 Electrodo

La razón por la cual se ha decidido empezar por los electrodos es para poder realizar una primera prueba de concepto. Dicho de otra forma, se pretende conseguir que la gota se desplace de un electrodo a otro antes de pasar a diseñar el resto del circuito de control. De esta forma se podrán aislar y corregir los errores pertenecientes a este fragmento del sistema.

Los electrodos no son más que unas superficies de cobre a las que se les aplicará tensión para mover la gota. Su diseño es un tanto simple, sin embargo, hay que tener en cuenta que los electrodos necesitan tener muy cerca a sus vecinos si se quiere conseguir el movimiento de la gota. En la introducción se menciona que para hacer posible el desplazamiento, se ha de superponer un mínimo la gota en el electrodo adyacente. Con este fin, se realizan los electrodos con interdigitado, ya que aumentan el área compartida. El diseño de todos los elementos del proyecto se efectúa en un software llamado KiCad.

3.1.1 Diseño en KiCad

Una de las razones por la cual se escogió este programa es porque nos permite realizar layouts en PCB, es decir, disponer los componentes de nuestro circuito en una placa PCB y conectarlos mediante pistas. El motivo por el que usaremos PCB en nuestro dispositivo reside en cumplir el requisito que exige minimizar los costes de materiales y producción. Esta placa permite una gran integración de distintas partes del sistema en la misma superficie a un precio muy razonable, sobre todo comparado con otros métodos y materiales. [4] Antes de empezar a trabajar en los electrodos, es preciso hablar sobre el programa de diseño elegido y comentar algunas de sus características y opciones.

3.1.1.1 Software de diseño KiCad



Figura 3-1. Logo del software de diseño electrónico KiCad. [39]

KiCad es un programa de código abierto especializado en la automatización del diseño electrónico. Incluye la creación del esquemático y el layout en PCB con salida Gerber. Los archivos de salida Gerber son documentos vectoriales que describen las conexiones eléctricas, pistas y vías de una PCB e incorporan las instrucciones para su producción. Una de las principales ventajas de KiCad es la interfaz intuitiva que facilita su manejo aún cuando el usuario no tiene experiencia con programas de diseño electrónico. Ahora pasaremos a ver los principales ficheros que se generan durante el desarrollo de un proyecto y, después, se mencionan las opciones más relevantes para la creación de nuestras máscaras. [39][40]

	*.pro	Archivo con los parámetros del proyecto, incluyendo la lista de librerías de componentes.
	*.sch	Archivos de esquemas de circuitos.
	*.lib	Archivos de librerías de símbolos, que contienen las descripciones de los componentes: forma gráfica, pines, campos.
	*.kicad_pcb	Archivo de la placa que contiene toda la información del diseño.
	*.pretty	Librerías de huella de componentes.
	*.net	Archivo de Netlist creado por el esquema y leído por el editor de la placa donde se relaciona el circuito con las huellas de los componentes.

Tabla 3–1. Archivos generados en un proyecto de KiCad. [41]

	Editor de símbolos	Permite editar y crear símbolos que no se encuentren en librerías ya existentes.
	Editor de huellas	Permite editar y crear huellas que no se encuentren en librerías ya existentes.
	Navegador de librerías de símbolos/huellas	Permite navegar por todas las librerías de símbolos y huellas pertenecientes al proyecto.
	ERC/DRC	Revisa que se cumplan las reglas eléctricas y de diseño.
	Asignación símbolo-huella	Asigna las huellas de los dispositivos de la PCB a los símbolos del esquemático.
	Generar/Cargar Netlist	Permite generar la Netlist en el esquemático y cargarla en el layout de la PCB.

Tabla 3–2. Opciones de KiCad más relevantes en el diseño de este proyecto.

3.1.1.2 Diseño de los electrodos en KiCad

Para comenzar con el diseño de los electrodos, lo primero que debe hacerse es crear un proyecto en KiCad. Dentro de la carpeta del proyecto tendremos todos los archivos necesarios para trabajar. Empezaremos abriendo el esquemático, donde colocaremos los símbolos de los componentes que nos interesen y los conectaremos entre sí formando el circuito deseado. Nuestro circuito es muy sencillo, ya que solo consiste en cuatro electrodos conectados a sus respectivos pines mediante pistas de cobre. Para la primera prueba de concepto, activaremos manualmente los electrodos llevando la tensión directamente de la fuente de alimentación a los pines de los electrodos.

Como puede imaginarse, los electrodos no están incluidos en ninguna librería predeterminada, por lo que es necesario hacer tanto su símbolo como su huella. Para efectuar el símbolo, tenemos que abrir el editor de símbolos y crear una nueva librería que se guardará dentro de nuestro proyecto. Seguidamente le daremos nombre a nuestro símbolo y le agregaremos los pines. Por último, le proporcionaremos la forma deseada. En el caso de los electrodos, la forma es un rectángulo y tan solo contiene un pin de entrada. En la figura 3-2 se expone el símbolo correspondiente a los electrodos.

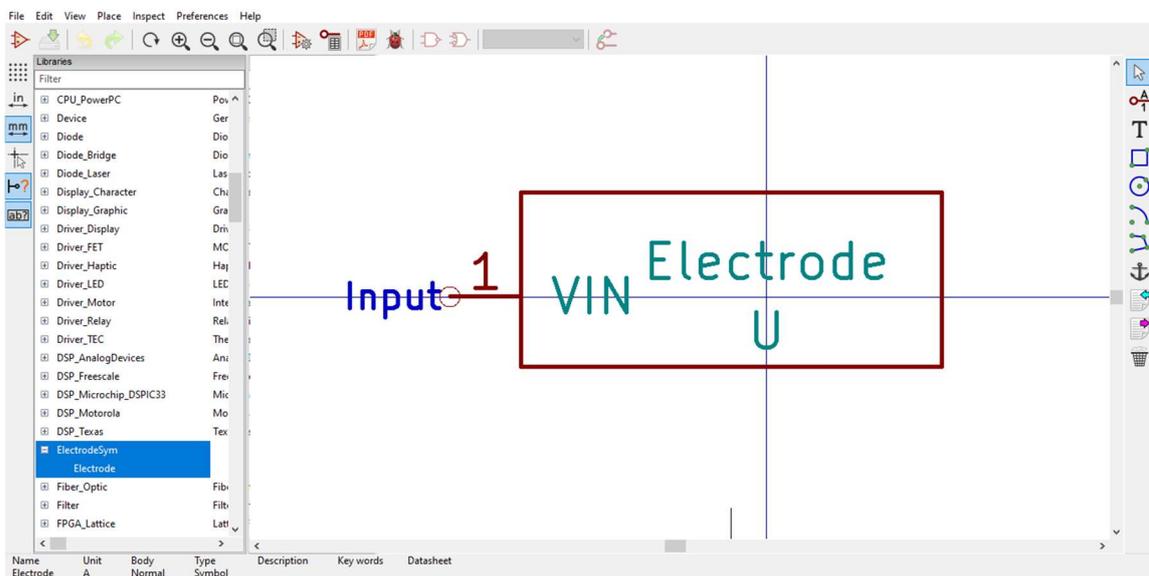


Figura 3-2. Símbolo de los electrodos.

La creación de la huella es muy parecida a la del símbolo. Abrimos el editor de huellas y, una vez hemos añadido una librería nueva al proyecto y le hemos dado nombre a la huella, diseñamos la forma que tendrá nuestro electrodo cuando esté fabricado en la placa PCB. El tamaño que se ha elegido es el de un cuadrado de 3 mm por lado, puesto que es una extensión apropiada para colocar encima una gota. Ya que debemos diseñar los electrodos con interdigitado, le incorporamos unos salientes triangulares de 0.25 mm. El resultado puede observarse en la siguiente figura.

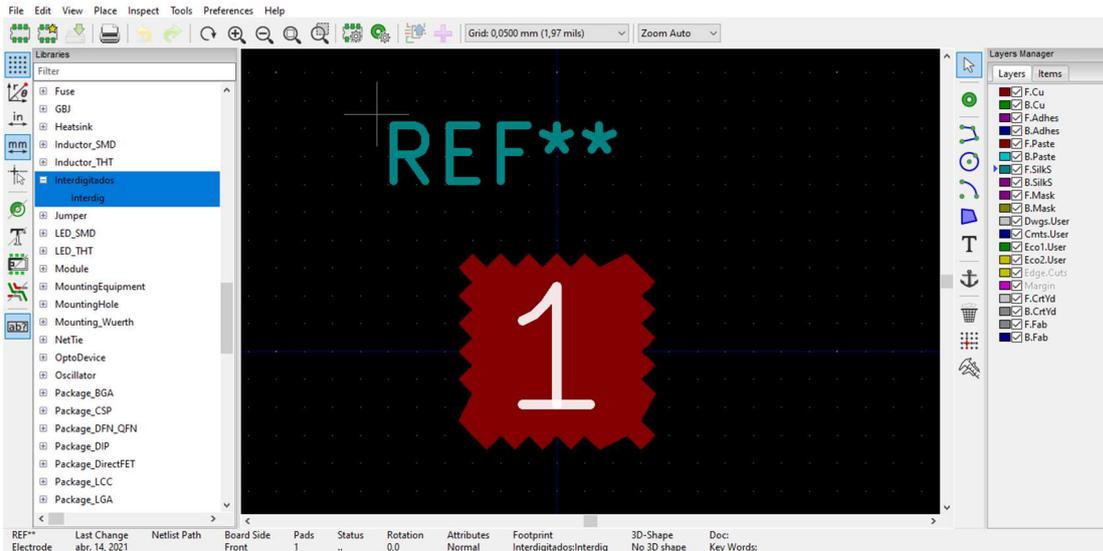


Figura 3-3. Huella de los electrodos.

Dado que los pines se encuentran fácilmente en las librerías propias de KiCad, ya podemos realizar el esquemático de nuestro circuito. La figura 3-4 se corresponde con dicho esquemático.

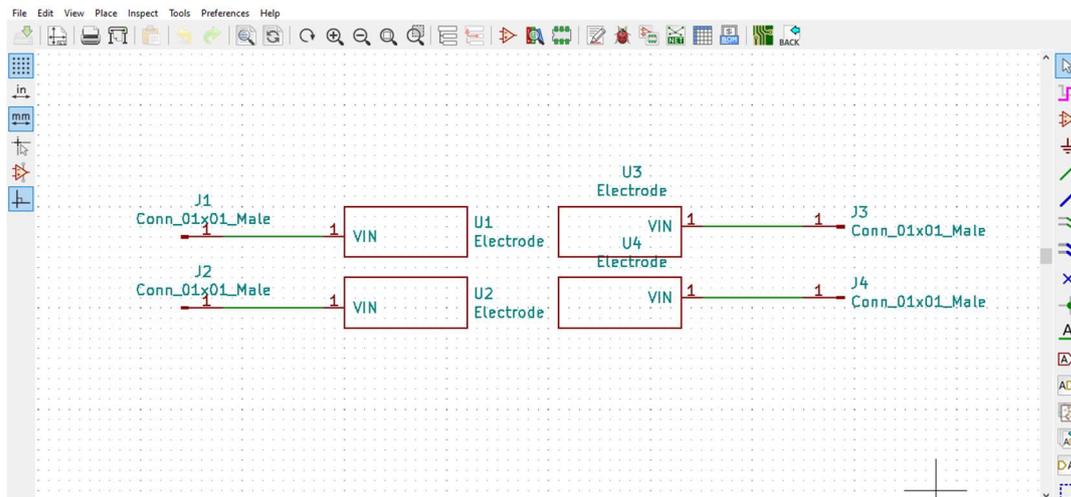


Figura 3-4. Esquemático de los electrodos.

Tras comprobar que no hay ningún error gracias al ERC (Electrical Rules Check), pasamos a asignar las huellas a sus correspondientes símbolos. A continuación, generamos la Netlist del circuito. En este momento ya habremos terminado con el esquemático. Simplemente cargando la Netlist en el editor de layout PCB nos aparecerán las huellas de los componentes y cómo deben ser conectados entre sí siguiendo las conexiones del esquemático. Posicionamos los electrodos y los pines para lograr el resultado que nos interesa y los unimos con pistas de cobre de 1mm de ancho. Al ser un circuito con pocos elementos y conexiones nos basta con una sola capa de cobre, por lo que hay que tener en cuenta que, tanto las huellas como las pistas, van en la parte frontal de la placa, así que escogeremos F.Cu a la hora de elegir la capa en la que estarán estos elementos. Además, dado que los electrodos deben estar muy cerca, se han dejado tan solo 150 μm de separación entre ellos.

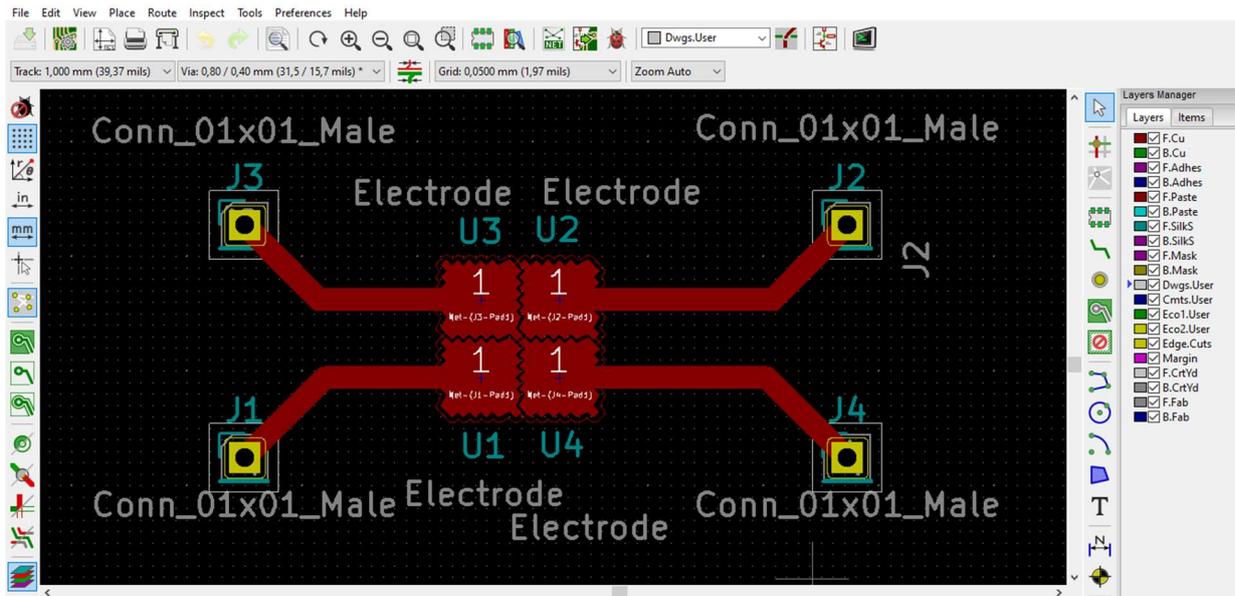


Figura 3-5. Layout de los electrodos.

En la figura anterior puede verse el layout ya completado. El motivo de que los pines se encuentren retirados de los electrodos es que necesitamos espacio para añadir tanto la capa dieléctrica como la capa hidrofóbica que cubren a los electrodos. Una vez terminado el layout ya tendremos nuestra máscara lista para imprimir y utilizar en la fabricación de nuestra PCB. Podemos advertir cómo quedará la placa gracias al visualizador 3D que incorpora KiCad.

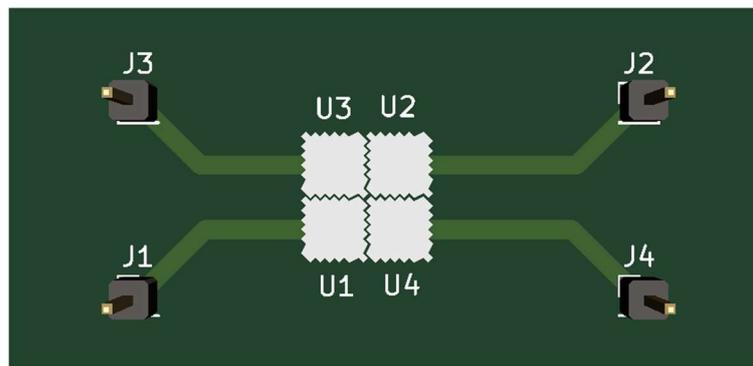


Figura 3-6. Visualización 3D de los electrodos.

3.1.2 Fabricación de los electrodos

La elección del tipo de PCB que se va a utilizar es el primer paso en la fabricación de la placa. Como se ha mencionado anteriormente, se necesitará una placa con solo una capa de cobre, ya que todo nuestro diseño se encuentra en la misma. Por otro lado, el espesor de cobre que se ha seleccionado es de $5\ \mu\text{m}$. Esto se debe a que, para procurar que el movimiento de la gota sea fluido y sin complicaciones, la superficie debe ser lo más plana y uniforme posible, por lo que conviene que los electrodos no sobresalgan apenas del sustrato.

Otra acción que debemos realizar antes de introducimos en el laboratorio es imprimir la máscara que hemos diseñado en el apartado anterior. Utilizando el photoplotter nos queda el circuito de la figura 3-7 todo en negro y el fondo transparente. Es importante que sea de esta manera y explicaremos el por qué más adelante. El photoplotter es un dispositivo que, sirviéndose de archivos Gerber para guiarse, imprime lo que se le haya mandado en una película en blanco y negro gracias a un láser. [42]

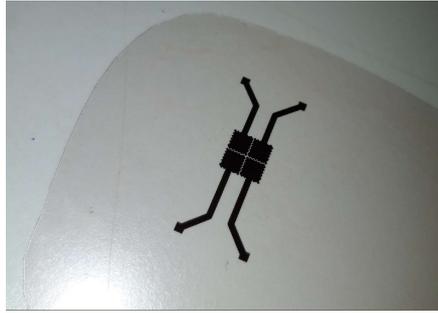


Figura 3-7. Máscara impresa en photoplotter

Fabricaremos la placa mediante fotolitografía. Este proceso nos permite revelar el circuito deseado en cobre gracias a la acción de rayos UV sobre una resina fotosensible. Para asegurarnos de que la resina fotosensible no se dañe durante la operación, es fundamental trabajar con luz muy tenue. Seguidamente, expondremos los pasos necesarios para obtener correctamente la PCB con los electrodos.

1. Cambiar la resina propia de la placa por resina en spray. Un fragmento de PCB se compone de un sustrato con una capa de cobre por encima. Cubriendo el cobre se encuentra la resina fotosensible y viene por defecto en las PCB. En este caso es demasiado gruesa y puede perjudicarnos en el revelado, por lo que es conveniente cambiarla. Para retirar la resina solo tenemos que empapar la placa en acetona y frotar con un papel absorbente hasta eliminarla por completo. Cuando esté expuesto el cobre, lo limpiamos bien con acetona y alcohol. Antes de disponer la nueva resina, debemos quitar el polvo que haya podido situarse en el cobre con un paño. Una vez esté bien limpio, colocamos la resina en spray con mucho cuidado, ya que es fácil que quede una capa desigual en cuanto a grosor. Si no ha salido bien del todo, podemos repetir el proceso las veces que queramos limpiando de nuevo la resina con acetona.
2. Calentar la nueva resina. La resina que acabamos de verter está todavía líquida. Es necesario que se endurezca para que sea capaz de proteger al circuito en el revelado. Para esto, se calienta en un hot plate a 70°C durante 6 minutos. Un hot plate es un aparato de laboratorio que consiste en una superficie capaz de alcanzar temperaturas muy elevadas en poco tiempo.
3. Introducir la placa en la insoladora. La insoladora es una máquina que se encarga de emitir rayos UV. He aquí la razón por la que la máscara es negra y transparente. Como las pistas y los dispositivos están impresos en negro, los rayos no traspasarán la máscara dañando la resina fotosensible de esa parte, sin embargo, sí que perjudicarán la que se encuentra en la parte transparente de la máscara. Para ello, haremos 4 exposiciones de 20 segundos cada una, dejando 10 segundos entre ellas.
4. Revelar el circuito. Para dejar en la placa solo el cobre que pertenece a los electrodos, los pines y las pistas, debemos utilizar dos soluciones. La primera es el revelador de PCB. Este líquido reutilizable se encargará de proteger la resina del circuito y de eliminar la que ha sido insolada. Cuando podamos ver la forma del circuito sobresaliendo del cobre expuesto en el resto de la placa, retiraremos la PCB y la enjuagaremos con agua. La segunda solución la hemos preparado anteriormente utilizando 25 ml de agua oxigenada, 25 ml de agua fuerte y 50 ml de agua normal. Al insertar la placa en el líquido, éste corroerá el cobre que no esté protegido por la resina. Hay que tener mucha precaución con este paso ya que la capa de cobre que tenemos es muy fina y, aunque esté protegido por la resina, es fácil borrar las pistas del circuito si se deja más tiempo del necesario. Cuando solo quede el cobre perteneciente al circuito, apartamos la placa y la aclaramos con agua. Antes de proceder a taladrar debemos limpiar la PCB frotándola con un papel empapado en acetona, ya que el circuito se encuentra todavía cubierto de resina. No hacerlo supondría un problema a la hora de soldar.
5. Taladrar los pines y pads. Nos vamos a la taladradora y utilizamos una broca fina porque los pines que vamos a soldar son de 2 mm de diámetro. En esta placa tan solo tenemos que soldar los 4 pines que van conectados a los electrodos.
6. Soldar los componentes. Para unir los componentes a la placa utilizamos estaño. El estaño se funde a una temperatura de 230° C. Nos valemos de un soldador de lápiz para fundir el metal y conectar el cobre con las patas de los componentes.

Después de completar los pasos anteriores tendremos lista la placa, pero aún faltan dos elementos para ponerla en funcionamiento y comprobar si es capaz de mover la gota. Como sabemos, hace falta un dieléctrico y una capa hidrofóbica. Para el dieléctrico se probó con Parafilm-M y SU-8. El Parafilm-M es una cinta muy flexible, semitransparente e hidrofóbica que puede ajustarse con mucha facilidad a todo tipo de superficies. El SU-8 es una resina transparente y biocompatible que, una vez estirada en una máquina llamada Spin Coater, se polimeriza al exponerla a radiación UV y calentarla.[43] Al final, el mejor resultado lo dio el Parafilm-M. Estirándolo nos da el grosor perfecto, además es más barato y fácil de colocar. De capa hidrofóbica se ha utilizado aceite de silicona. Es importante que el aceite esté bien extendido y cubra todos los electrodos, ya que la gota no podrá moverse si no es así. En la figura 3-8 se aprecia la placa fabricada con el Parafilm-M colocado.

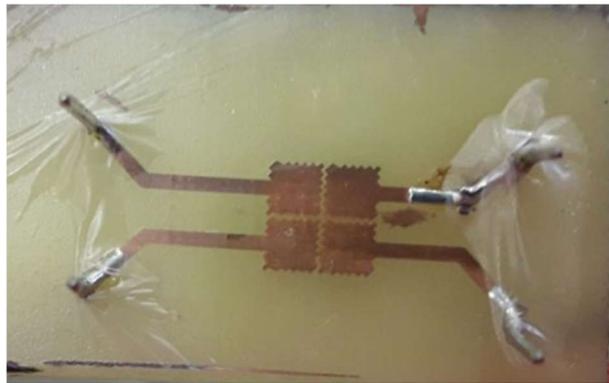


Figura 3-8. Electrodo con Parafilm-M.

3.1.3 Resultados de la prueba de los electrodos

Para comenzar con la prueba, primero se debe disponer de una fuente de alimentación de potencia. Las tensiones con las que trabajaremos son de entre 100 y 400 voltios, aunque apenas se inyectará corriente. La fuente que utilizaremos tiene un rango de 0 hasta 600 voltios.

Una vez tenemos la fuente, aplicaremos el aceite de silicona cubriendo los electrodos. En este momento se coloca la gota encima de uno de ellos. La prueba se realiza de forma manual, es decir, sujetamos los cables del positivo y negativo de la fuente de alimentación y los vamos cambiando de un electrodo a otro. Con la fuente ya encendida, se coloca el negativo en el electrodo donde está la gota y el positivo en uno de los electrodos vecinos. La gota deberá trasladarse al electrodo con tensión. Se cambia ahora el negativo a donde está la gota y se le da tensión a otro electrodo adyacente. Este proceso se repite todas las veces que queramos. La tensión que se transfiere a los electrodos depende del grosor de la capa de Parafilm-M, pero la gota comenzará a moverse en torno a los 100 voltios. Hay que tener cuidado aumentando la tensión ya que, sobre todo si la capa dieléctrica es muy fina, es probable que acabe conduciendo y explote al hacer contacto con la gota. En la siguiente figura se muestra el desplazamiento de la gota por los electrodos.

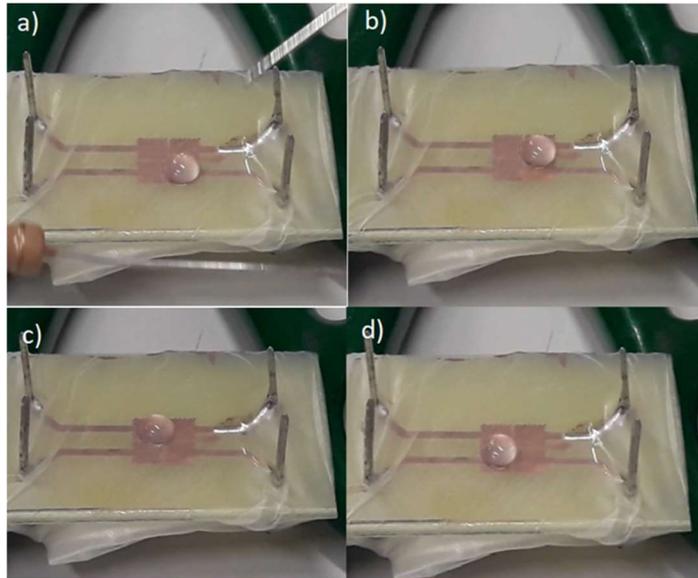


Figura 3-9. Movimiento de la gota por los cuatro electrodos.

Ya que hemos realizado con éxito la prueba, procedemos a diseñar y construir el resto del circuito que nos permitirá mover la gota de forma automática.

3.2 Circuito de activación de electrodos

Las aplicaciones que se valgan del electrowetting para su funcionamiento no pueden depender de que se esté moviendo la gota manualmente. Se necesita un circuito que se encargue de proporcionar tensión a los electrodos cuando sea preciso. De esta forma, la gota se moverá de forma automática y a una velocidad que no podría alcanzar si la manipula una persona.

Como hemos mencionado anteriormente, una de las ventajas de las PCB consiste en poder integrar varias partes de un sistema dentro de la misma placa. Por lo tanto, se realizará una placa nueva que incluirá tanto este circuito como los electrodos. Para el diseño, nos hemos basado en el artículo citado de la vigesimoséptima conferencia iraní sobre ingeniería eléctrica [3], ya que su propósito en dicho artículo es similar al de este trabajo. En ambos proyectos se prioriza la utilización de materiales de bajo coste en el diseño de un sistema de control de fluidos. Como se explicó en la introducción del documento, este diseño se basa en el reversed electrowetting y, por tanto, la gota se mueve de alta tensión a baja tensión.

3.2.1 Diseño del circuito

En la siguiente figura se puede ver el esquemático del circuito hecho en KiCad, de esta forma será más fácil visualizar lo que se está explicando. El esquemático se ha realizado de forma similar al de los electrodos anteriores.

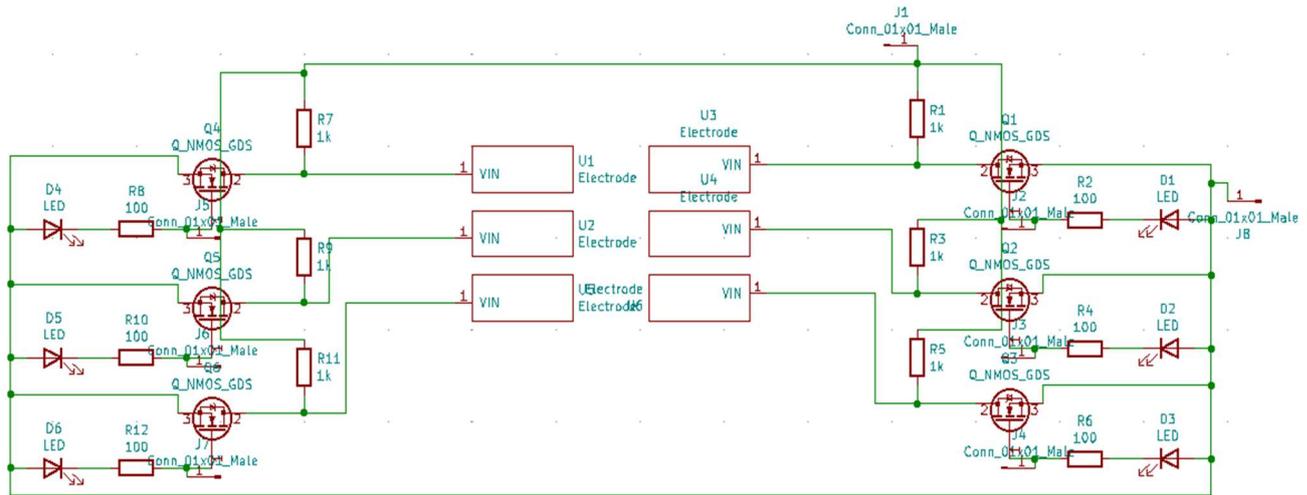


Figura 3-10. Esquemático del circuito completo.

Como podemos observar, en este caso, en vez de cuatro electrodos vamos a fabricar seis. Cada electrodo está conectado tanto a alimentación, correspondiente al pin J1 que se encuentra en la parte de arriba del circuito, como a un transistor MOSFET. El drenador del transistor es el que da a los electrodos, mientras que su fuente está unida a la tierra del circuito, respectiva al pin J8, a la derecha. La puerta está conectada a un pin, una resistencia y un led. De dicho pin saldrá un cable hasta una salida digital del Arduino.

Al utilizar *reversed electrowetting*, los electrodos estarán todos activos de base. Cuando queramos que la tensión de alguno sea nula para producir el desplazamiento de la gota, mandaremos, a través del Arduino, una señal de 5 voltios al pin conectado a la puerta del transistor. Debemos ver el transistor como un interruptor, es decir, cuando no le llega tensión a la puerta se asemeja a un circuito abierto y, cuando sí que posee esa tensión, funciona como un cortocircuito. Por lo tanto, al activar la puerta, conectaremos el electrodo a tierra y, además, se encenderá el diodo led correspondiente al transistor que estamos encendiendo. La resistencia que va desde alimentación hasta el electrodo y el drenador es una resistencia de pull-up. Estas resistencias se encargan de que el voltaje en los electrodos, cuando el transistor no conduce, sea prácticamente el mismo que la alimentación, y de que cuando el transistor se active y los electrodos se conecten a tierra, la tensión de alimentación caiga por completo en la resistencia y no se produzca un cortocircuito entre alimentación y tierra.

Ya que tenemos el esquemático, asignamos las huellas a los símbolos de los componentes. En este proyecto solo utilizaremos componentes THT, Through-Hole Technology, ya que es más fácil trabajar con ellos en una PCB. En la siguiente tabla se recogen los dispositivos utilizados en este diseño.

	Resistencia Pull-Up	Valor: 150k Ω	Potencia: 1W
	Resistencia Puerta de los MOSFET	Valor: 1k Ω	Potencia: ¼ W
	MOSFET	Huella: TO-220	Tensión máxima Drenador-Fuente: 600 V
	LED	Huella: 5mm	Longitud de onda (λ): 568 nm

Tabla 3-3. Componentes del circuito de activación de electrodos.

Ahora se va a explicar lo que se ha tenido en cuenta a la hora de seleccionar los valores de estos componentes. En el caso de las resistencias es necesario determinar la tensión y corriente a la que serán expuestas. Se comenzará por las resistencias de pull-up.

Para la aplicación que tendrá el circuito es necesaria una alta tensión y una muy baja intensidad. La tensión que utilizaremos no pasará de los 300 voltios y la intensidad deseada es, sin embargo, de pocos miliamperios. Escogiendo un valor de resistencia de 150 k Ω tendremos: $I = \frac{V}{R} = \frac{300 V}{150 k\Omega} = 2 mA$

La potencia máxima disipada por la resistencia será: $P = V \cdot I = 300 V \cdot 2 mA = 0.6 W$. La resistencia que se va a emplear tendrá 1 vatio de potencia. Así nos aseguramos mantener un margen de seguridad entre la potencia que disipará la resistencia y la que es capaz de soportar, evitando sobrecalentamientos.

Las resistencias que se encuentran en la puerta de los transistores son de 1 k Ω . Sabemos que la tensión que cae en los diodos LED es de 1.95 V y que la tensión que se aplica a la puerta de los transistores es de 5 V, por lo que en estas resistencias caen 3.05 V. La intensidad que las recorre también debe ser de pocos miliamperios: $I = \frac{V}{R} = \frac{3.05 V}{1 k\Omega} = 3.05 mA$. La potencia que disipará como máximo es: $P = V \cdot I = 3.05 V \cdot 3.05 mA = 9.3 mW$.

Para escoger los transistores, hay que fijarse en la tensión máxima drenador-fuente porque van a exponerse a tensiones que rondan los 300 voltios. Al incluir unos MOSFET que soporten 600 V de tensión evitamos que se produzcan posibles daños al circuito. Por su parte, los leds podrían haber sido de cualquier color ya que su única función es la de señalar cuál es el electrodo que está apagado en cada momento.

Puesto que ya tenemos diseñado el esquemático de nuestro circuito y conocemos el por qué de los componentes que lo conforman, vamos a pasar al layout de la placa. Igual que antes, cargamos la netlist y nos aparecerán los componentes y cómo deben ir conectados. En este diseño también irán todos los componentes en la cara frontal de la PCB. Colocamos los componentes intentando minimizar el espacio utilizado. Por último, delimitamos el tamaño de la placa haciendo un rectángulo con la capa Edge.Cuts. En la siguiente figura se muestra el layout de la placa.

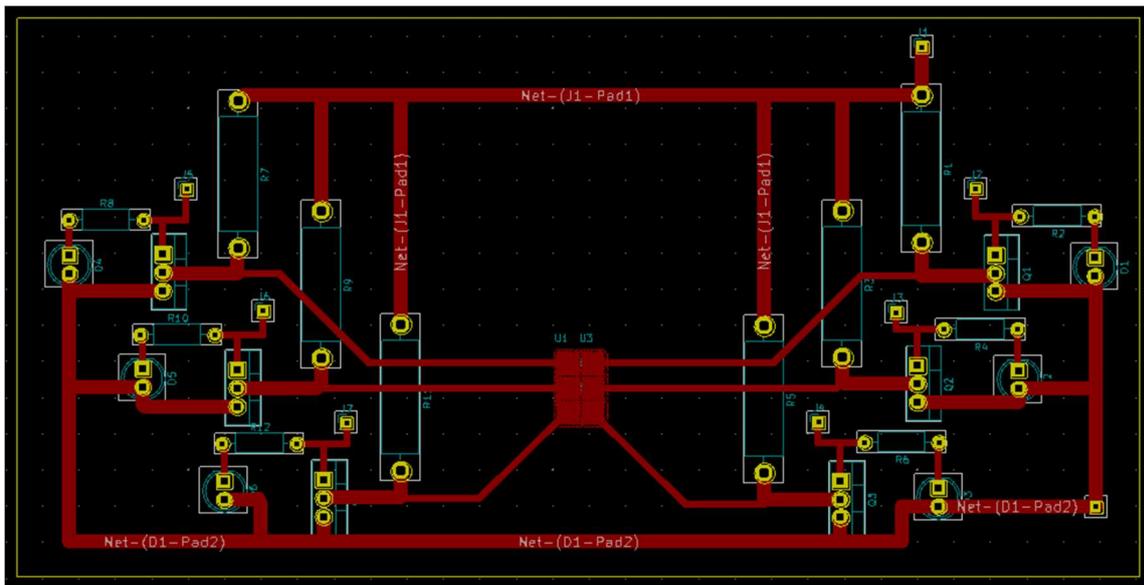


Figura 3-11. Layout del circuito completo.

Si se observan las pistas del circuito, se aprecia que hay algunas más anchas, de 2mm, y otras más finas, de 1mm. Las pistas de 1mm son las que usamos en el anterior diseño, sin embargo, en éste hemos decidido ampliar a 2mm las pistas que van desde alimentación a las resistencias de pull-up, las que unen tierra con los leds y transistores, y las que conectan las resistencias de pull-up con los drenadores de los MOSFET. La razón por la que hemos ensanchado estas pistas es porque, al trabajar con tensiones altas, los componentes tienden a calentarse en exceso. Las pistas, aparte de conectar los componentes entre ellos, tienen la función de disipar parte del calor del circuito, por lo que cuanto más anchas sean las pistas más calor serán capaz de disipar.

Por último, cabe mencionar el tamaño de la placa final. Según la hemos diseñado, medirá 15.4 cm x 7.75 cm. Lo ideal hubiera sido que midiera como máximo 10 cm x 10 cm, ya que su fabricación es más barata si se manda a construir. Se pudo concentrar todo el diseño en ese espacio, pero quedaban los componentes muy apretados y demasiado cerca de los electrodos, por lo que al final se optó por dejarlo como estaba.

Se puede ver cómo quedará la placa una vez construida en la siguiente figura. Se ha utilizado el visualizador 3D de KiCad.

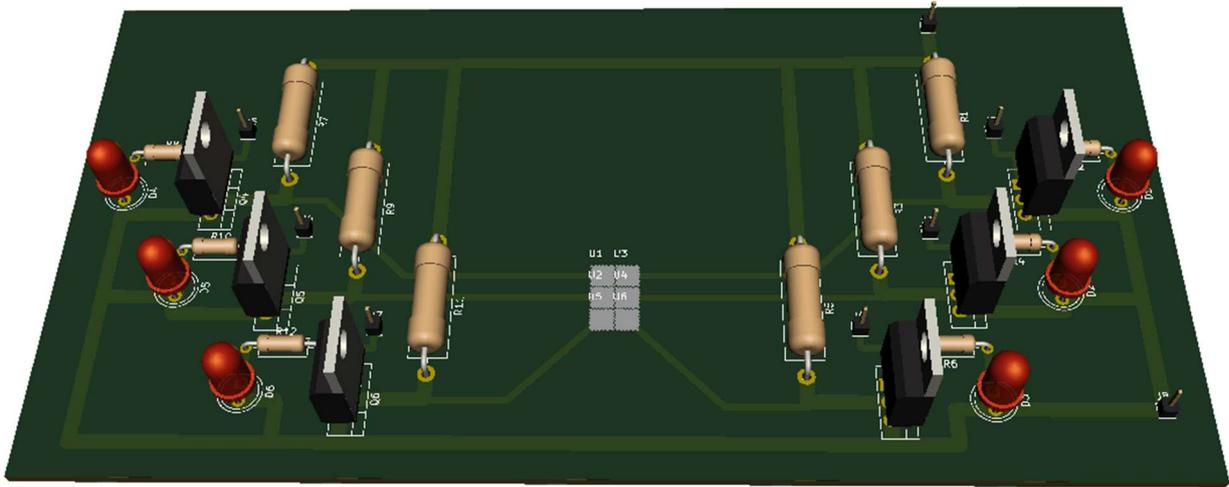


Figura 3-12. Visualización 3D del circuito completo.

3.2.2 Fabricación del circuito de activación de electrodos

La máscara, al igual que la de los electrodos, se imprime en el photoplotter. El proceso necesario para obtener la placa es el mismo que para los electrodos, la fotolitografía. Exponemos la resina a la luz UV en la insoladora y revelamos el circuito mediante el revelador de PCB y el líquido atacante para el cobre. Después taladramos y soldamos los componentes. En la imagen 3-13 se contempla el resultado de este proceso de fabricación. Como puede observarse, solo se utilizan 2 electrodos de los 6. Esto se debe a que durante el revelado del circuito se dañaron algunas pistas al introducir la placa en el líquido que corroe el cobre. Al tener una capa de cobre tan fina es difícil que se elimine todo el cobre indeseado sin desgastar algunos tramos del circuito. De todas formas, este inconveniente no nos afectará mucho, ya que este primer prototipo es de prueba y solo se desea averiguar si el diseño funciona correctamente. Con dos electrodos nos basta.

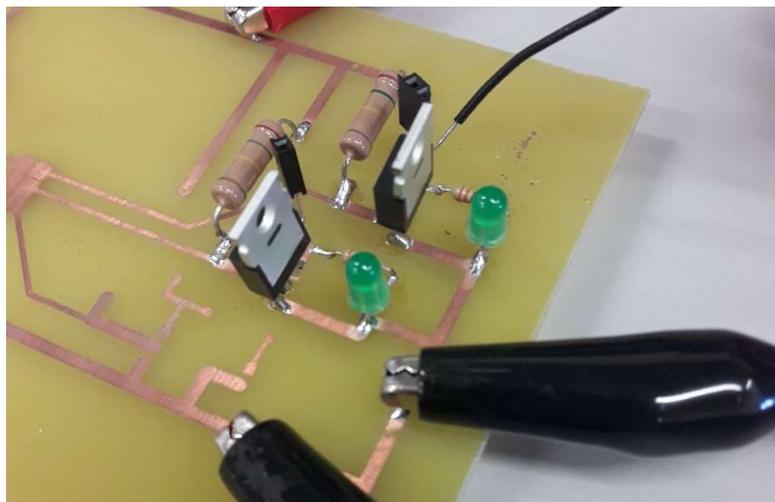


Figura 3-13. Resultado de la fabricación del circuito.

3.2.3 Programa de Arduino

Para automatizar el movimiento de la gota debemos configurar la secuencia de apagado de los electrodos. Así marcaremos el camino que debe seguir la gota de forma ininterrumpida. Para ello utilizaremos un Arduino, puesto que es muy fácil de programar y de conectar a nuestro circuito. En concreto, emplearemos el Arduino

Mega 2560, que es una placa con un microcontrolador ATmega2560. En la figura 3-17 se muestra la placa al completo. El Arduino Mega 2560 contiene 54 pines digitales, 16 pines analógicos, 4 UARTs, un oscilador de 16 MHz, conectores USB y de alimentación, conector ICSP y botón de reset. [44]

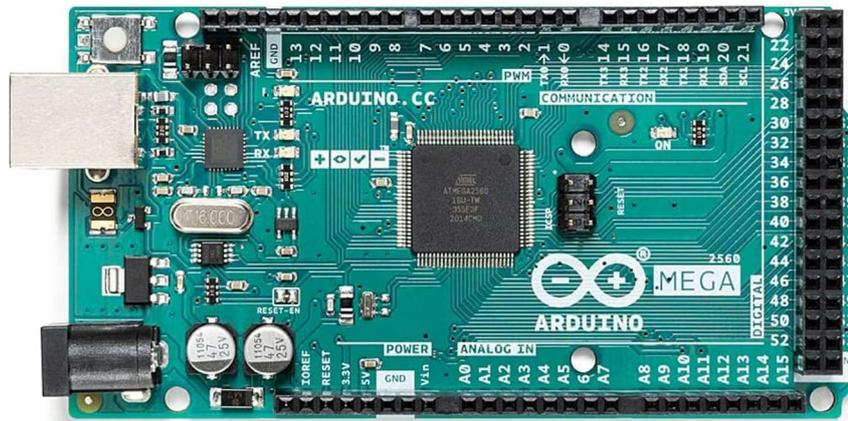


Figura 3-14. Placa del Arduino Mega 2560. [45]

Para la función que deseamos, conectaremos las puertas de los transistores con los pines digitales del Arduino. Además, debemos configurar estos pines como salida. De esta forma, cuando activemos algún pin digital, obtendremos una señal de 5 V que sale del Arduino y llega al pin del circuito. Como tanto los pines del Arduino como los de nuestro circuito son hembra, es necesario unirlos con cables macho-macho. También hay que conectar las tierras de ambas placas con la de la fuente de alimentación, así tendremos la misma referencia. El código que aparece seguidamente es el que utilizaremos en esta prueba.

```
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(22, OUTPUT);
  pinMode(24, OUTPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  digitalWrite(22, HIGH);
  delay(5000);
  digitalWrite(22, LOW);
  digitalWrite(24, HIGH);
  delay(5000);
  digitalWrite(24, LOW)
}
```

Figura 3-15. Código del programa de Arduino.

Como hemos mencionado anteriormente, primero se han de configurar como salida los pines digitales que vayamos a utilizar. En este caso escogemos el 22 y el 24. Ahora entramos en un bucle que se repite infinitamente en el que se activa un pin durante un momento y, cuando se desactiva, se activa el siguiente durante el mismo intervalo de tiempo. Así se van alternando sin parar. A la hora de programar el tiempo que está activo un pin, debemos tener en cuenta que el número introducido se interpreta en milisegundos. En nuestro caso con 5s de intervalo basta, por lo que añadimos un delay de 5000 ms.

Este programa se ha realizado en el entorno de programación de Arduino. Una vez se ha finalizado el programa y se ha verificado, se conecta la placa Arduino al ordenador donde estamos programando. Así podremos pasar el programa del ordenador al microcontrolador mediante el puerto USB. Además, al conectar la placa por USB también la estaremos alimentando. El programa se empezará a ejecutar en cuanto se haya cargado por completo en la placa.

3.2.4 Resultados de la prueba del circuito de activación de electrodos

Para finalizar este capítulo, se mostrarán los resultados que se consiguen con este diseño del circuito y el programa de Arduino. Recordamos que nuestro objetivo es la automatización del movimiento de la gota al realizar electrowetting. Para la prueba disponemos del circuito que hemos fabricado y del programa de Arduino, pero debemos de poseer, al igual que fue necesario en la prueba de los electrodos, de una fuente de alimentación de potencia, Parafilm-M y aceite de silicona.

Tapamos los electrodos con una fina capa de Parafilm-M estirado e intentamos que quede bien fijo. Por encima cubrimos el Parafilm con aceite de silicona. Ya que tenemos la placa preparada solo tenemos que conectarla tanto a alimentación como al Arduino. Utilizando cables banana-cocodrilo, enchufamos la placa a la fuente de alimentación y, con cables macho-macho, conectamos los pines que se encuentran en la puerta de los MOSFET a los pines digitales 22 y 24 del Arduino. Inicialmente los dos electrodos estarán activos. Como hemos programado que el primer pin en activarse sea el 22, es necesario que la gota se encuentre situada en el electrodo cuyo transistor esté conectado al pin 24. De esta forma, cuando el programa se cargue en el Arduino, se abrirá el transistor del pin 22, lo que provocará que el electrodo se conecte a tierra y que su led correspondiente se encienda. En este momento la gota se trasladará al electrodo con voltaje nulo. Conforme se van activando y desactivando los transistores, la gota se irá moviendo de un electrodo a otro.

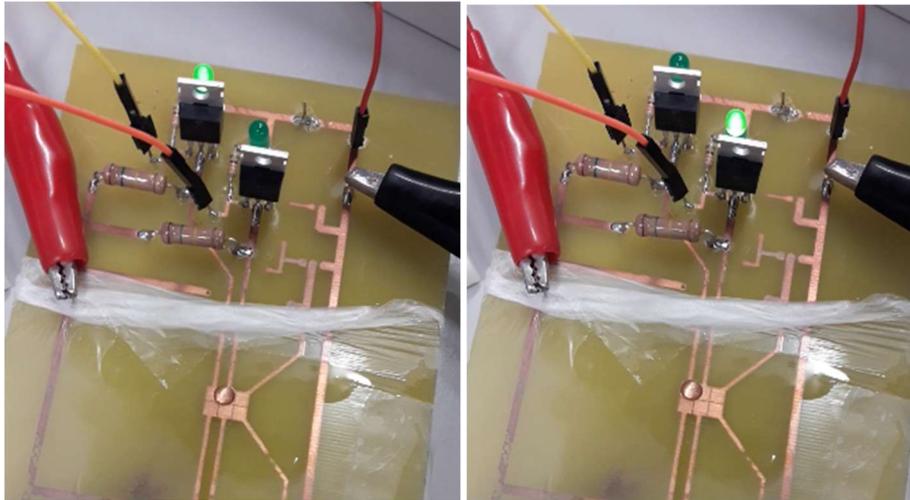


Figura 3-16. Resultado de la prueba del circuito completo y del programa de Arduino.

Hemos podido comprobar que la gota no tiene ningún problema en desplazarse por los electrodos y seguir lo que se ha programado en el microcontrolador. Además, se ha probado a bajar el tiempo de intervalo en el programa hasta llegar a 500 ms y se ha verificado que la gota se mueve correctamente. Por debajo de los 200 ms deja de responder. En este punto estamos muy cerca de cumplir los objetivos de nuestro proyecto. Tan solo nos falta la fuente de alimentación para completar todas las partes, sin embargo, en el próximo capítulo, aparte de la fuente, fabricaremos de nuevo tanto unos electrodos como su circuito de activación para lograr un sistema más cómodo y versátil.

4 SISTEMA FINAL

Y, sin embargo, se mueve.

- Galileo Galilei-

En este capítulo, se van a rediseñar tanto el circuito de activación como los electrodos para que su uso sea más cómodo. Además, se fabricará la fuente de alimentación necesaria para dar tensión al sistema. De esta forma, no hará falta depender de una fuente de alimentación de potencia externa como en los ensayos realizados hasta ahora. Por último, se mostrarán los resultados obtenidos tras realizar pruebas al sistema completo.

4.1 Nuevo diseño

En el capítulo anterior ya se comprobó que el diseño del circuito cumplía con su función y con los requisitos propuestos, pero cambiando un poco la disposición de los componentes se puede conseguir un mejor resultado. La motivación que lleva a modificar la placa viene de la incomodidad a la hora de manipular los electrodos. Como se ha mencionado en varias ocasiones, los electrodos tienen que estar recubiertos de un dieléctrico y éste, a su vez, debe ser impregnado por una capa hidrofóbica. Hasta ahora teníamos los electrodos y el resto del circuito en la misma placa. Esta distribución nos complica mucho el ajustar el Parafilm-M y extender el aceite de silicona, ya que los electrodos están rodeados por el circuito de activación. Así que, para solventar este problema, se ha decidido dividir el circuito completo en dos placas. La primera solo contendrá los electrodos y, la segunda, el circuito de activación. Con pines y cables conectaremos las dos placas entre sí. Además, así se evita el riesgo de mojar el circuito cuando se coloquen las gotas de líquido.

4.1.1 Diseño del circuito

Del diseño del circuito no vamos a cambiar nada salvo separar los electrodos en otra placa. Aparte de facilitarnos el montaje del sistema, también nos permite añadir una matriz de electrodos en la que no todos ellos tengan acceso al exterior. Es decir, antes no había forma de sacar una pista si el electrodo estaba rodeado por otros. Sin embargo, ahora podemos extraer la pista por debajo, conectando el electrodo encerrado con su pin correspondiente.

En la siguiente figura se aprecia el nuevo esquemático de los electrodos. Este esquemático es prácticamente igual al de la figura 3-4, solo que lo hemos ampliado a 9 electrodos.

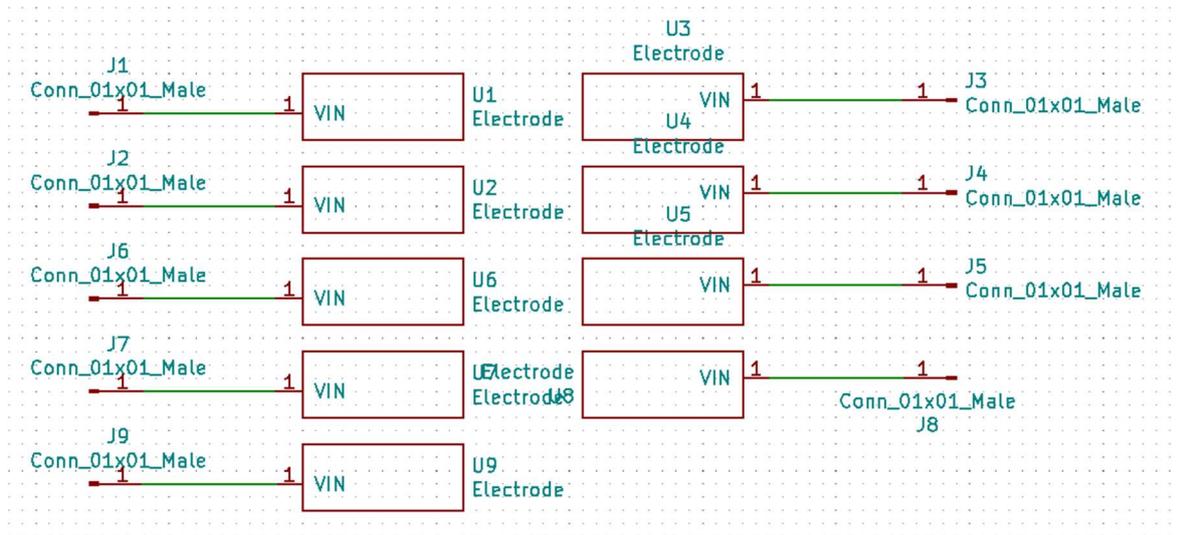


Figura 4-1. Esquemático de la matriz de electrodos.

Por otra parte, el layout que se muestra a continuación se divide en dos capas. Como se ha mencionado antes, esto es necesario porque de otra forma no se podría conectar el electrodo encerrado. La capa de abajo, en verde, representa la unión entre el electrodo del medio y su pin correspondiente.

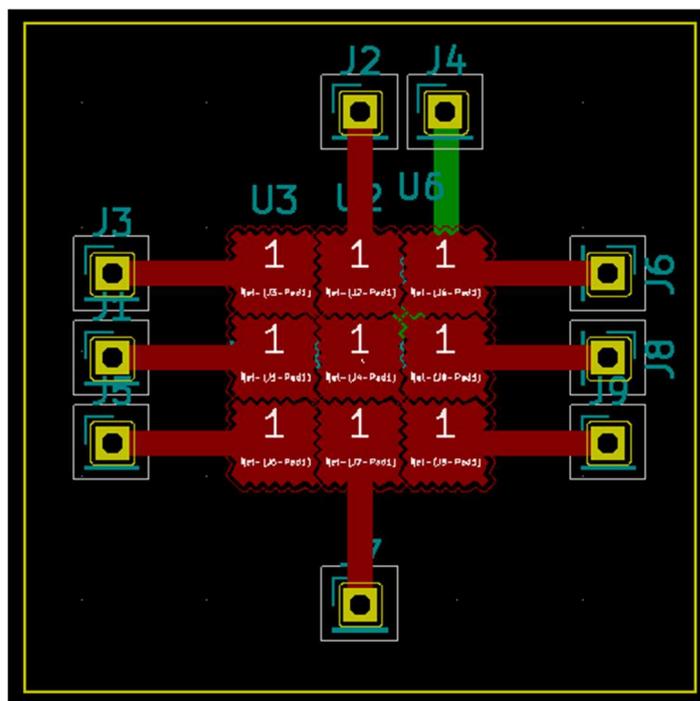


Figura 4-2. Layout de la matriz de electrodos.

Hemos vuelto a delimitar la placa con la capa Edge.Cuts. Gracias al cambio de disposición se ha conseguido minimizar el tamaño de esta placa a un cuadrado de 2.7 cm x 2.7 cm. En la imagen 4-3 se muestra el esquemático del circuito de activación de electrodos al que irá conectado la placa anterior.

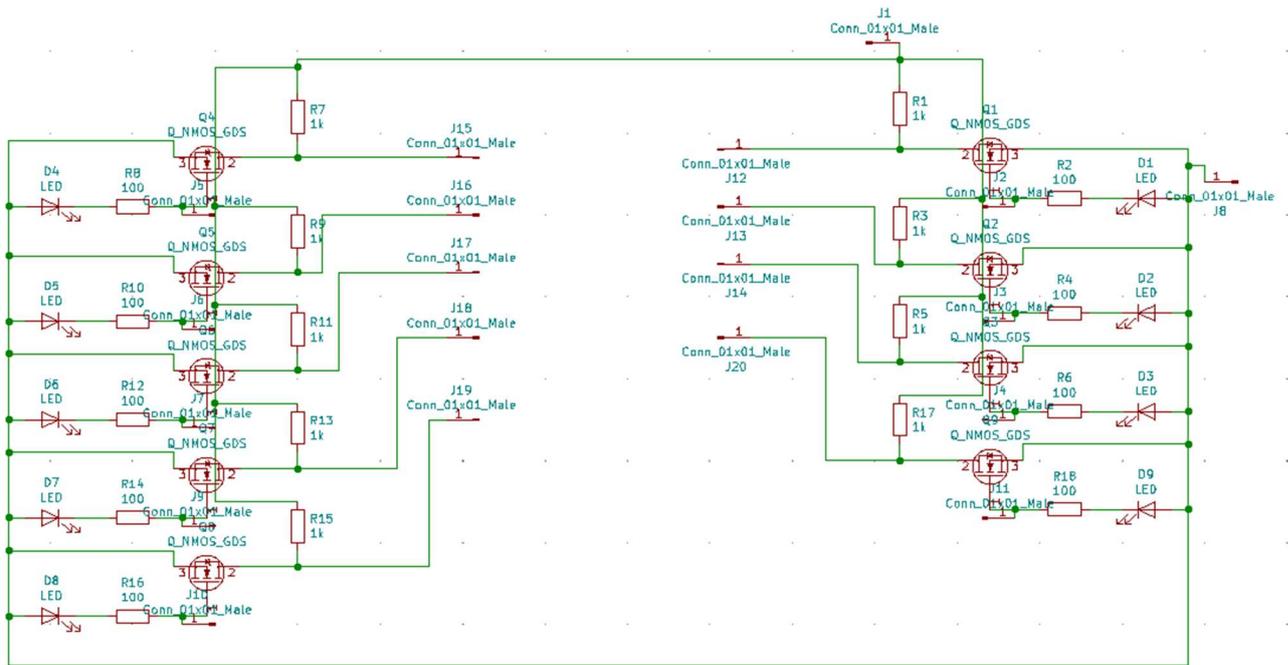


Figura 4-3. Esquemático del nuevo circuito de activación de electrodos.

Se observa en la figura anterior que este esquemático y el de la figura 3-13 solo tienen dos diferencias. La primera es el número de componentes, puesto que en este hay tres electrodos más. La segunda es que se han sustituido los electrodos por pines. En un principio se concibió este diseño para pinchar la placa de los electrodos en los pines centrales de este circuito. Aunque esta idea es totalmente funcional, se decidió unir los pines de las dos placas mediante cables, así pueden separarse aún más.

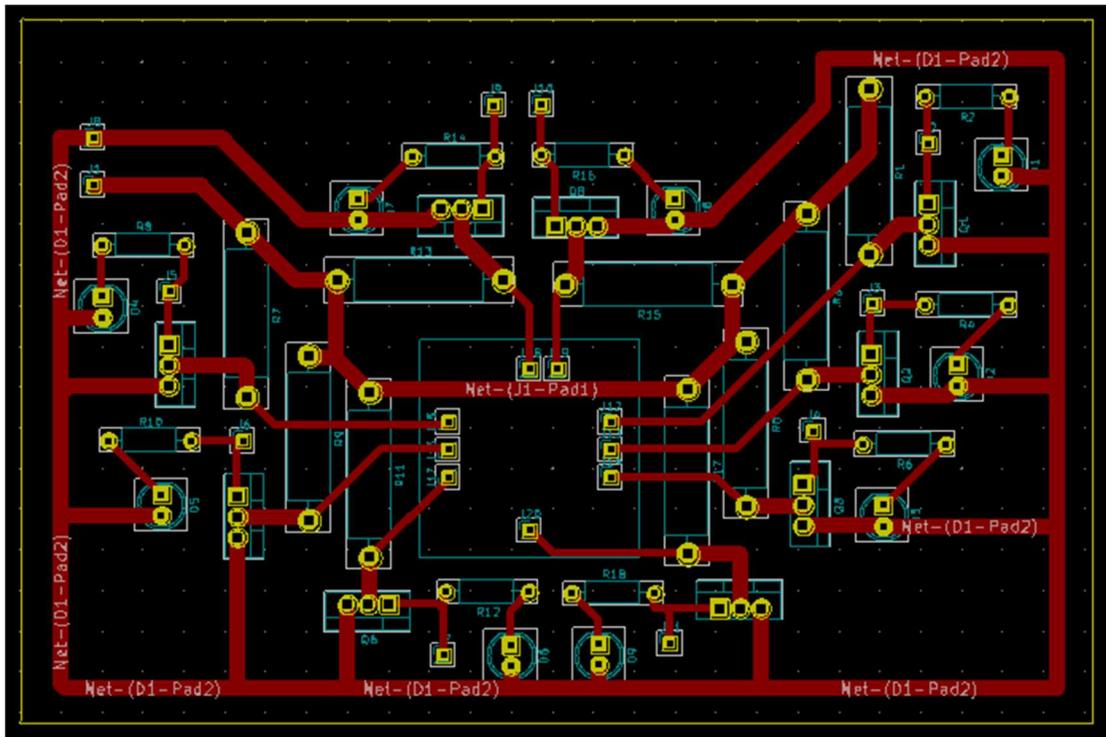


Figura 4-4. Layout del nuevo circuito de activación de electrodos.

Este es el layout del nuevo circuito. Es bastante más compacto que el realizado en el diseño anterior. Sus dimensiones son 13 cm x 8.6 cm. Esto quiere decir que hemos conseguido añadir los componentes necesarios para tres electrodos más en menos espacio. Aún así, este incremento de componentes no nos ha permitido cumplir el tamaño de 10 cm x 10 cm necesario para minimizar costes en la fabricación industrial. Ya que tenemos las dos placas diseñadas, el siguiente paso es fabricarlas.

4.1.2 Fabricación del circuito

El proceso de fabricación del circuito es exactamente igual al que hemos realizado anteriormente, es decir, mediante fotolitografía. En el caso de los electrodos, no ha sido posible seguir fielmente el layout de la figura 4-4. Esto se debe a que no vamos a mandar a fabricar de forma industrial nuestro dispositivo, por lo que no se puede poner una vía que conecte el cobre del electrodo encerrado, que se encuentra en la capa frontal de la placa, con la pista de la capa de abajo. Así que al final se utilizará una PCB de una sola capa de cobre de $5\ \mu\text{m}$ de espesor y no se conectará el electrodo central. El resultado obtenido se presenta seguidamente.

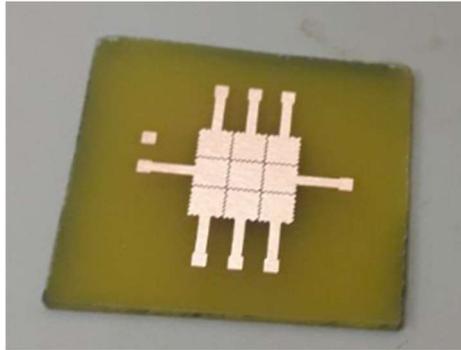


Figura 4-5. Matriz de electrodos.

Para el circuito de activación, se ha decidido utilizar una PCB con una capa de cobre de $32\ \mu\text{m}$ de espesor. Como se explicó en la sección 3.1.2, una gota necesita una superficie muy uniforme para que su movimiento sea fluido, por eso los electrodos no pueden sobresalir mucho y el cobre de la placa es muy fino. En este circuito ya no tenemos ese problema, por lo que podemos usar un espesor de cobre mayor. Al tener una capa de cobre más gruesa, también se puede dejar la resina fotosensible que viene por defecto, en vez de cambiarla por una capa más fina de resina en spray. Así evitaremos dañar el circuito con tanta facilidad cuando lo sometamos a las soluciones corrosivas. Por último, cabe mencionar que la máscara de la figura 4-6 puede imprimirse en papel vegetal en vez de en la photoplotter.

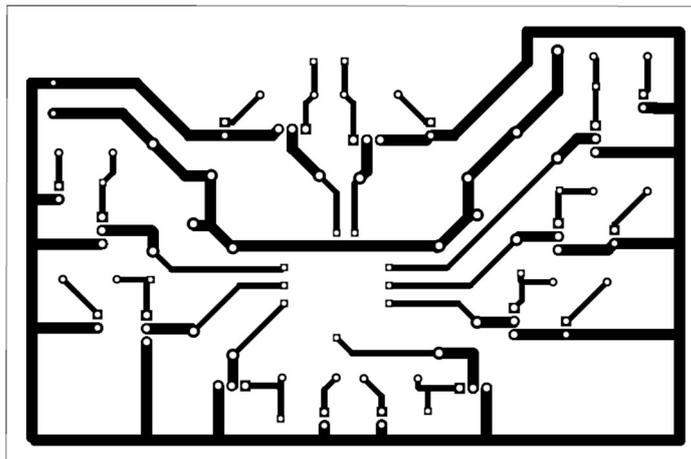


Figura 4-6. Máscara del circuito de activación de electrodos.

En la figura 4-7 se muestra el resultado tras fabricar el circuito, limpiar el cobre con acetona, taladrar y soldar los componentes. En rojo se han marcado los pines que se conectan a la fuente de alimentación. Dentro del cuadrado azul se encuentran los pines que se unen a los electrodos y, el resto de pines del circuito, van conectados al Arduino.

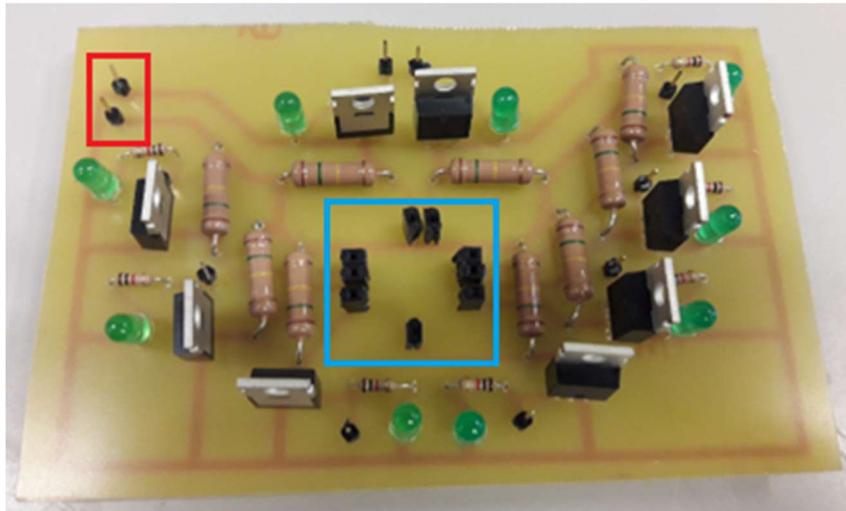


Figura 4-7. Circuito de activación de electrodos.

4.2 Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación es la última parte necesaria para completar el proyecto. Ahora se profundizará en su diseño, fabricación y prueba, como se ha hecho en las demás placas. El objetivo de esta fuente es pasar de la tensión alterna de la red a una tensión continua suficiente como para mover una gota.

4.2.1 Diseño de la Fuente de Alimentación

Se ha decidido que la fuente va a tener 3 salidas. Como el electrowetting se empieza a producir un poco antes de los 100 V, pondremos una salida de 100 V, otra de 200 V y otra de 300 V. Los picos de la onda de tensión de entrada llegan a los 311 voltios, por lo que, con la configuración de rectificador de onda completa con puente de diodos, mostrada en la figura 4-8, es suficiente.

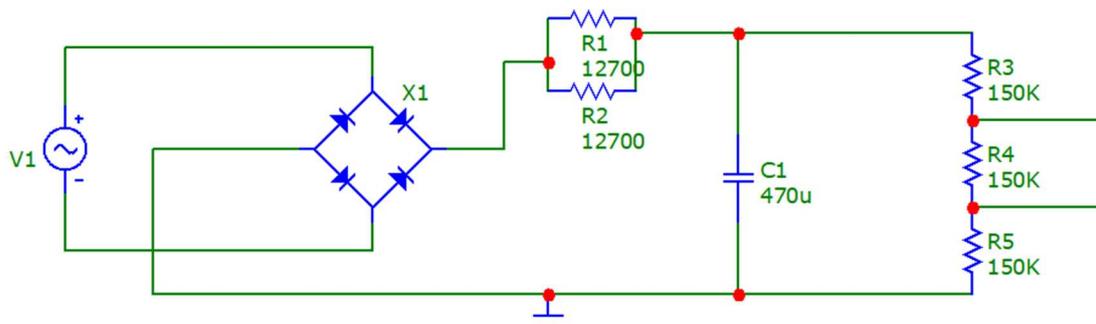


Figura 4-8. Circuito rectificador de onda completa con puente de diodos.

La fuente de señal V1 de la figura anterior representa la tensión que llega a través de la red eléctrica. Sabemos que su valor eficaz es de 220 V, pero nos interesa conocer su amplitud para modelarla. Como es una señal sinusoidal, el valor eficaz no es más que la amplitud multiplicada por la raíz cuadrada de dos. Este dato se consigue realizando el valor cuadrático medio de un periodo de la señal. Despejando, nos queda que el valor de pico es de 311 V, de aquí viene la amplitud mencionada antes de la imagen.

Al pasar esta función por un puente de diodos, conseguimos invertir el periodo negativo de la señal mientras que el periodo positivo sigue igual a la salida. La función azul de la gráfica 4-9 representa la salida del puente de diodos, y la roja, la señal de entrada del circuito.

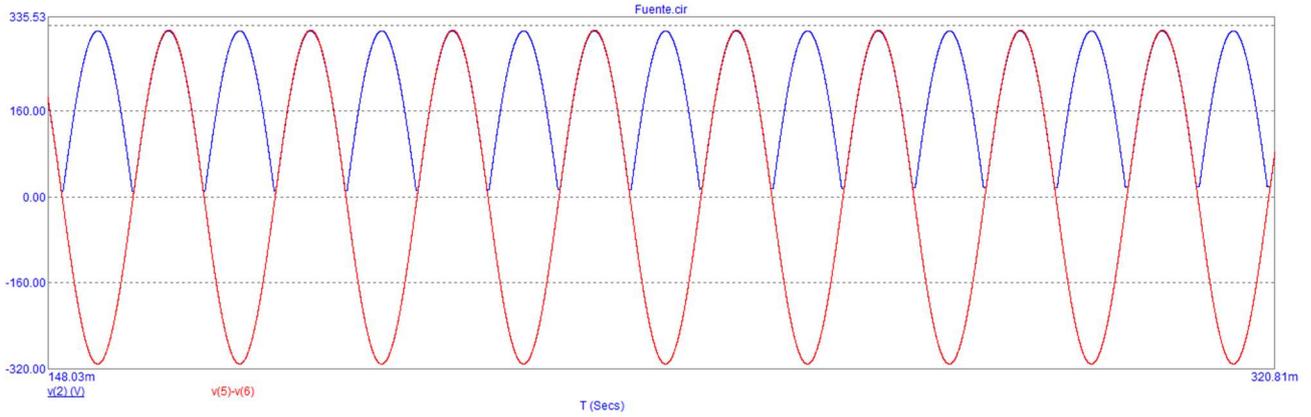


Figura 4-9. Formas de onda de la tensión a la entrada del circuito y a la salida del puente de diodos.

Seguidamente, hemos añadido dos resistencias en paralelo. Estas resistencias se encargan de limitar la corriente que circula por el circuito, evitando daños a otros dispositivos como los diodos. Por último, se encuentra el condensador en paralelo con las tres resistencias. Cada una de las resistencias nos da una de las tres salidas que hemos propuesto. La función del condensador consiste en dar a la salida una tensión continua. Tras unos cuantos ciclos en los que este dispositivo se carga, se empezará a descargar levemente cuando la señal baje de su pico. Al descargarse muy lentamente, casi no habrá variado la tensión para cuando vuelva a crecer y estar en su máximo. En la siguiente figura se representa en verde la salida de 300 V, en rosa la salida de 200V y en azul la de 100V, cuando el condensador ya está cargado.

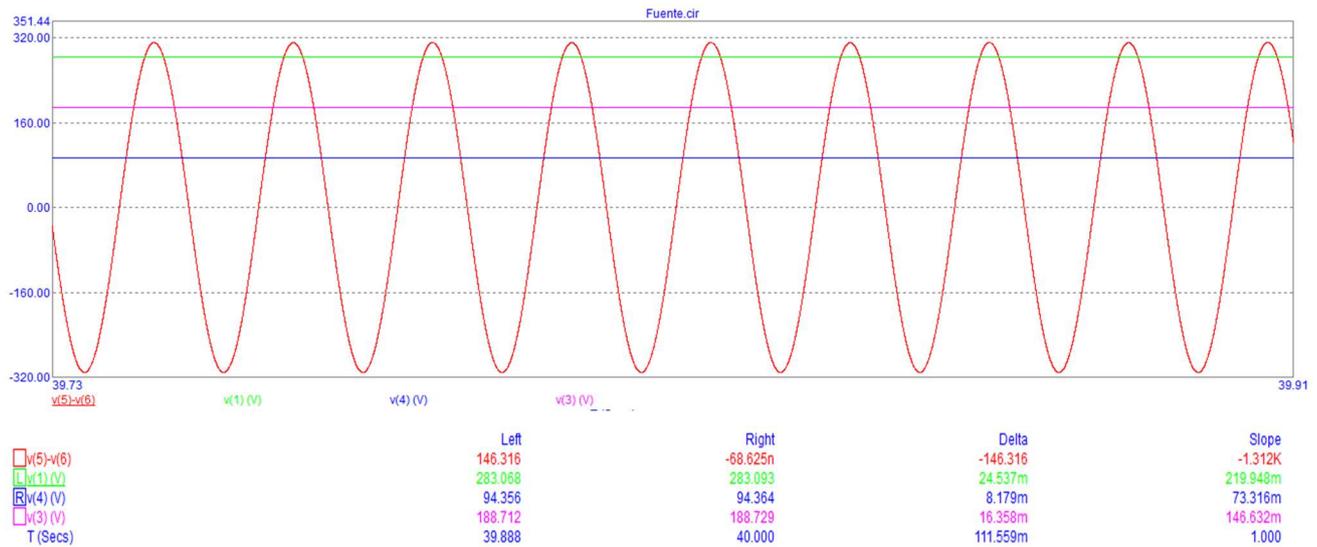


Figura 4-10. Formas de onda de la tensión a la entrada y de las tres salidas del circuito.

Como puede observarse en la figura anterior, las gráficas de las salidas son continuas, por lo que habremos conseguido nuestro objetivo. Los valores obtenidos en esta simulación son de 283.093 V, 188.729V y 94.356 V. También es importante saber el tiempo que tarda el condensador en cargarse del todo, es decir, el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el régimen permanente, ya que solo entonces obtendremos los valores de salida deseados y podremos empezar a controlar la gota en nuestro sistema de electrowetting. Se llega al régimen permanente cuando la señal se encuentra al 95% de su valor final. En nuestro caso, el 95% de cada salida es: 268.938 V, 179.293 V y 89.638 V.

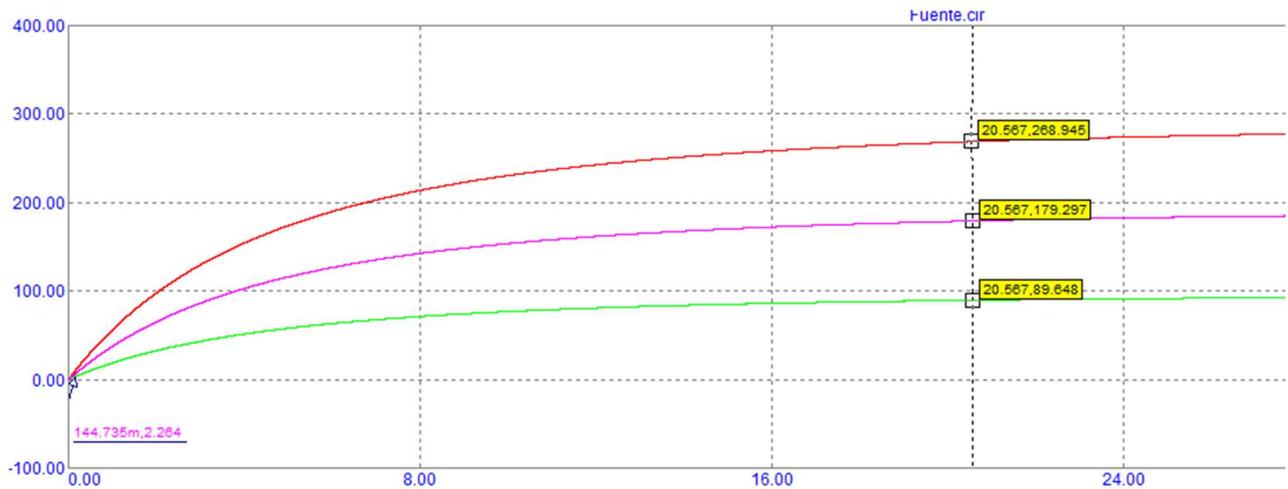


Figura 4-11. Régimen transitorio de las salidas de la fuente de alimentación.

Queda reflejado en la imagen que el régimen permanente se alcanza para cada salida en el segundo 20.587. Éste es el tiempo que tarda, desde que se enchufa la fuente de alimentación, en estabilizarse el sistema. Como detalle, hay que mencionar que tanto la representación del circuito como las simulaciones se han realizado en el programa Micro-Cap.

Los componentes que se utilizan son los descritos en la siguiente tabla.

	Puente de diodos	Modelo: GBJ2510	Caída en directa de cada diodo: 1.05 V
	Resistencias en paralelo	Valor: 12700 Ω	Potencia: 10 W
	Condensador	Valor: 470 μF	Tensión máxima: 400 V
	Resistencias en serie	Valor: 150 k Ω	Potencia: 1W

Tabla 4-1. Componentes de la fuente de alimentación.

El valor de las resistencias en paralelo se ha escogido teniendo en cuenta que la tensión máxima a la que serán expuestas es de 311 V. Además, no nos interesa que circule mucha corriente. Con unos pocos miliamperios nos basta. Al utilizar las resistencias de 12700 Ω tendremos: $I = \frac{V}{R} = \frac{311 \text{ V}}{6350 \Omega} = 48.98 \text{ mA}$. Ésta será la

corriente que atravesará el circuito cuando el condensador esté aún descargado. Se ha puesto 6350 Ω en la ecuación anterior porque es el resultado de hacer el paralelo de las dos resistencias. Esto quiere decir que por cada una de ellas circulará una corriente de 24.49 mA, la mitad de la corriente total. Por lo tanto, la potencia que disiparán estas resistencias será: $P = V \cdot I = 311 \text{ V} \cdot 24.49 \text{ mA} = 7.62 \text{ W}$. Para evitar sobrecalentamientos se han escogido resistencias de 10 W.

A la hora de elegir el condensador es muy importante tener en cuenta la tensión máxima que puede soportar. En este caso se ha decidido escoger uno de 400 V para tener un buen margen de seguridad. En cuanto al valor de la capacidad, es necesario que se mantenga un nivel de rizado pequeño para que la señal sea lo más plana posible. El rizado se produce cuando se rectifica una señal, pero aún se producen pequeñas ondulaciones en torno al valor promedio. El condensador utilizado es de 470 μF . Se va a calcular el rizado que se genera a la salida para ver si es válido. Sabemos que el rizado está relacionado con la capacidad y la frecuencia mediante la siguiente ecuación:

$$V_R = \frac{I_{med}}{f \cdot C}$$

I_{med} es la corriente media que atraviesa al condensador, f es la frecuencia del rectificador de onda completa y C es la capacidad utilizada. La frecuencia de la red eléctrica es de 50 Hz, pero en el rectificador de onda completa, al invertir el periodo negativo, se multiplica por dos. Por lo que $f = 100 \text{ Hz}$. Para calcular la corriente media tenemos que dividir la tensión media que atraviesa el condensador por la carga de las tres resistencias en serie. La tensión media es la media de un semiperiodo de la onda que sale del puente de diodos.

$$V_{med} = \frac{2V_{max}}{\pi} = \frac{2 \cdot 311}{\pi} = 197.99 \text{ V}$$

$$I_{med} = \frac{V_{med}}{R} = \frac{197.99}{3 \cdot 150k} = 439.98 \mu\text{A}$$

$$V_R = \frac{439.98\mu}{100 \cdot 470\mu} = 9.36 \text{ mV}$$

El porcentaje de tensión de rizado con respecto al valor medio de tensión es de un 0.0047 %, por lo que no existe apenas rizado. Se podría haber escogido un condensador con menor capacidad que nos diera un poco más de rizado sin que esto supusiera ningún problema, pero teníamos a mano este condensador de 470 μF que nos proporciona un muy buen resultado.

Por último, las resistencias que se han puesto en serie son las mismas que las resistencias de pull-up utilizadas en el circuito de activación de electrodos. En este caso la corriente máxima que circulará por ellas es de: $I = \frac{V}{R} = \frac{311 \text{ V}}{3 \cdot 150 \text{ k}\Omega} = 0.7 \text{ mA}$. Por lo que la potencia máxima que soportarán es: $P = V \cdot I = 311 \text{ V} \cdot 0.7 \text{ mA} = 0.22 \text{ W}$

Ahora que hemos explicado el diseño de la fuente y sus componentes, crearemos el esquemático y el layout en KiCad para proceder a fabricar. El esquemático es prácticamente igual al de la figura 4-8, aunque el puente de diodos es el integrado GBJ2510. También es diferente la salida del circuito. Antes teníamos una salida para cada tensión y ahora hay una sola salida que se conecta a la resistencia deseada mediante un jumper. Este circuito se presenta en la figura 4-12 y en la 4-13 su layout correspondiente.

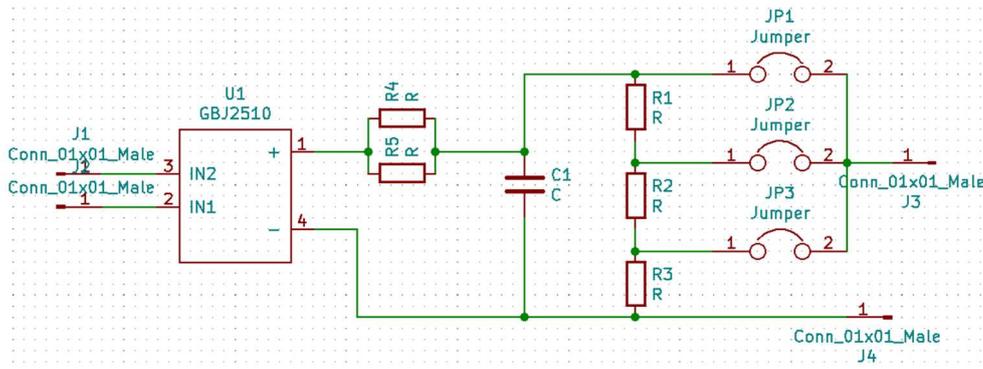


Figura 4-12. Esquemático de la fuente de alimentación.

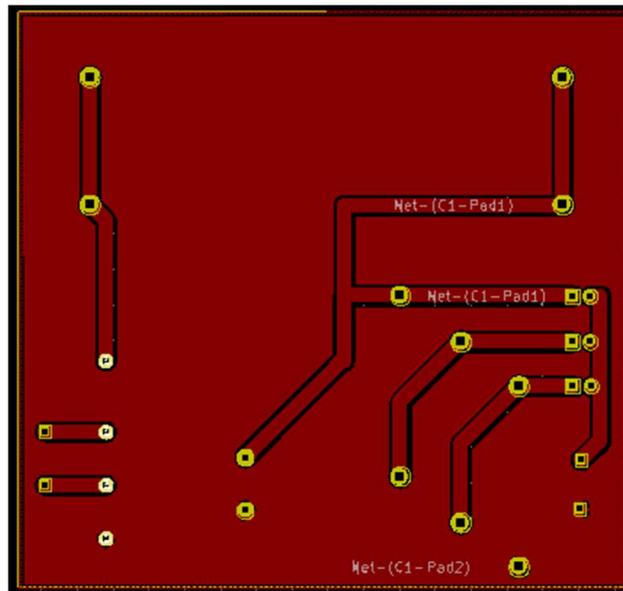


Figura 4-13. Layout de la fuente de alimentación.

Lo que más llama la atención de este layout es que se ha dejado casi todo el cobre de la placa. Se han separado, por supuesto, las pistas del circuito. La tierra va conectada a este sustrato de cobre. Como esta placa va a trabajar con tensiones altas, su temperatura crecerá notablemente con el tiempo, por lo que, al dejar casi toda la superficie de cobre, se logra disipar mucho mejor el calor que se genere.

4.2.2 Fabricación de la Fuente de Alimentación

El proceso de fabricación vuelve a ser el mismo y, en esta placa, al igual que en la del circuito de activación de electrodos, hemos utilizado una PCB con una capa de cobre de 32 μm de espesor. También se ha dejado la resina original y se ha impreso el layout en papel vegetal, consiguiendo la siguiente máscara.

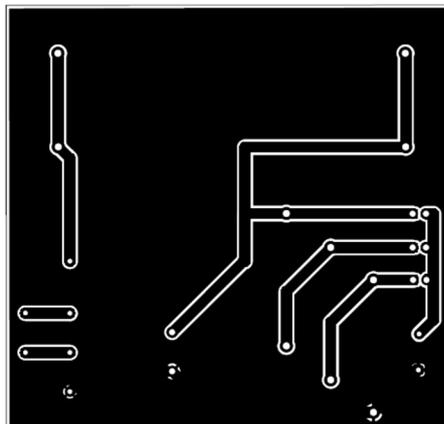


Figura 4-14. Máscara de la fuente de alimentación.

En la figura 4-15 se muestra el resultado del proceso de fabricación. Se ha resaltado en rojo la entrada del circuito, en azul la salida y, en verde, las tres posibles posiciones para colocar el jumper.



Figura 4-15. Fuente de alimentación.

4.2.3 Resultados de la prueba de la fuente de alimentación

Para probar la fuente de alimentación solo es necesario conectarla a la red eléctrica. Como tenemos 3 posibles tensiones de salida, comprobaremos que cada una de ellas funciona correctamente. En la siguiente imagen puede verse el resultado de la primera prueba, en la que esperamos obtener una tensión de unos 300 V.

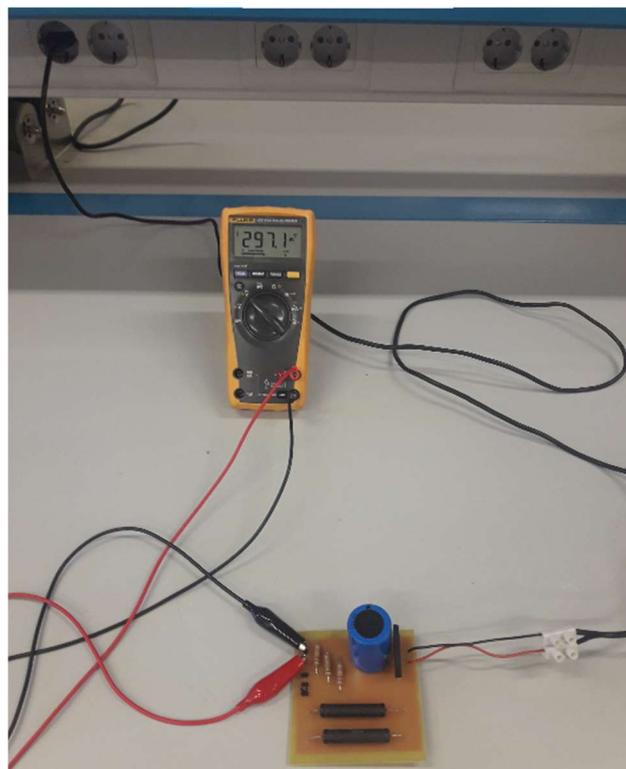


Figura 4-16. Prueba fuente de alimentación a 300 voltios.

El resultado obtenido es de 297.1 V, bastante mejor que el alcanzado en la simulación de la figura 4-10, donde se llegó a los 283.093 V. Esta diferencia puede deberse a que los diodos utilizados en el puente de la simulación tuvieran más caída de tensión que los del integrado GBJ2510. En la siguiente figura se muestran las pruebas realizadas a 200 V y 100 V. Los errores simulación-experimento se calculan de la siguiente forma: $error(\%) = (1 - \frac{V_{sim}}{V_{exp}}) \cdot 100$. Ordenados de la tensión más alta a la más baja son: 4.71%, 4.63% y 4.68%.

Al estar por debajo del 5% podemos dar nuestras simulaciones como válidas. Es importante tener en cuenta que, antes de cambiar el jumper y probar una nueva salida, se debe desenchufar el circuito y dejar que el condensador se descargue durante unos minutos.

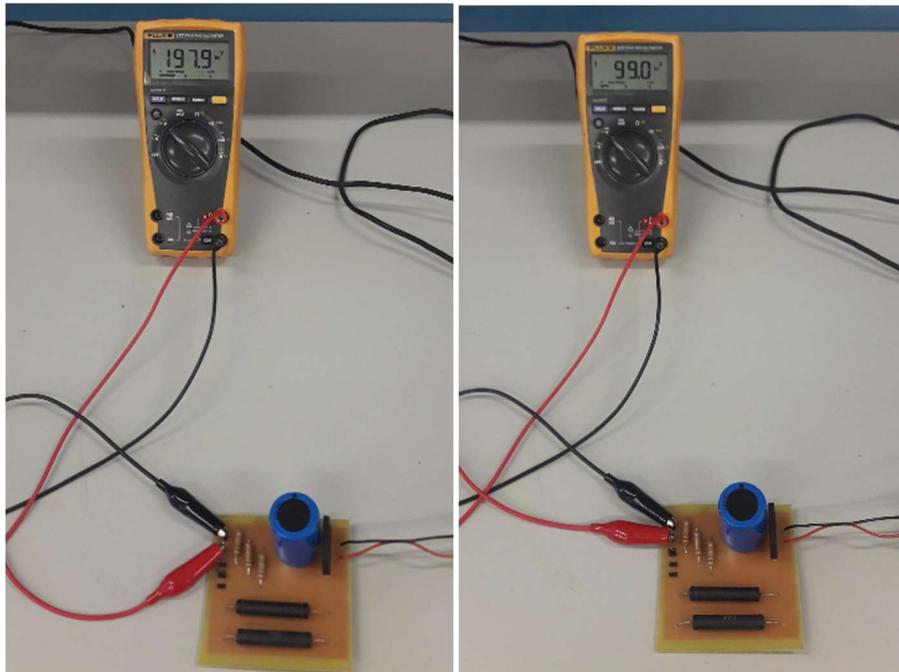


Figura 4-17. Prueba fuente de alimentación a 200 y 100 voltios.

4.3 Prueba del sistema completo

Llegados a este punto, ya se poseen todas las partes del sistema y se ha comprobado que funcionan correctamente por separado. En esta última sección, vamos a realizar varias pruebas al sistema completo. Para ello, uniremos los diferentes dispositivos e iremos cambiando el programa de Arduino para conseguir diferentes movimientos.

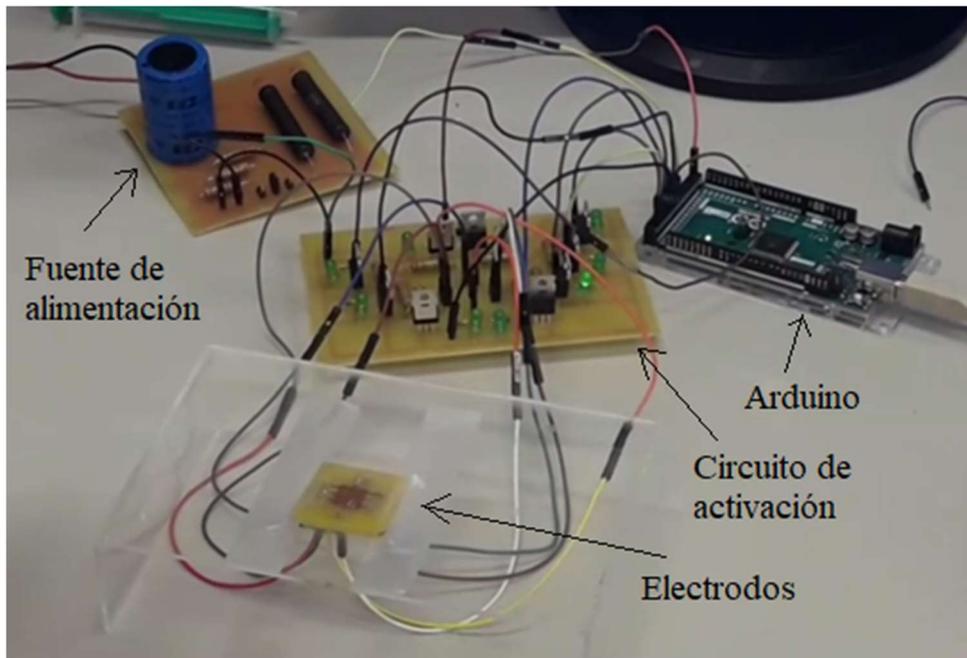


Figura 4-18. Disposición y conexionado del sistema completo.

En la figura 4-18 se muestra la disposición de todos los elementos del sistema. Los electrodos se encuentran apoyados sobre un soporte transparente que permite la unión mediante cables entre la matriz y el circuito de activación. Además, este soporte mantiene a los electrodos totalmente horizontales para evitar que a la gota le afecte la gravedad. Para la prueba se han recubierto los electrodos con el Parafilm-M, se han fijado al soporte con fiso y se ha colocado la capa de aceite de silicona. Por otra parte, se han conectado todas las puertas de los transistores a los puertos digitales del Arduino y, la alimentación del circuito de activación, a la fuente de alimentación. Las tierras de la fuente, el circuito y el Arduino se enlazan entre sí para tener la misma referencia.

La primera prueba consiste en comprobar que la gota es capaz de moverse por todos los electrodos excluyendo al central. Se recuerda que el central necesitaría una vía para poderse conectar con su pin correspondiente. Se debe mencionar que, a la hora de soldar los pines se dañó una de las pistas de cobre, por lo que en total hay 7 electrodos funcionales en la matriz. En la siguiente figura se muestra el resultado de la primera prueba.

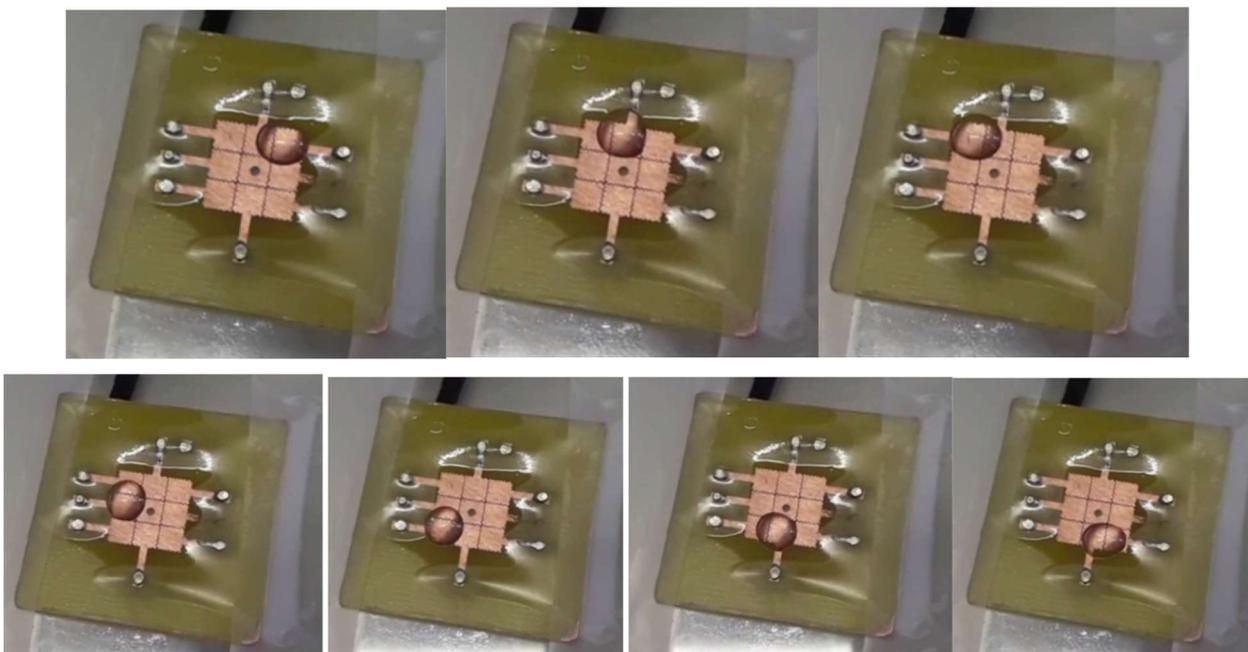


Figura 4-19. Gota moviéndose por los 7 electrodos.

Observamos que la gota realiza el recorrido sin problema. Esta prueba se ha realizado con las 3 tensiones de entrada posibles y, además, se ha utilizado una gota con un volumen lo suficientemente grande como para superponerse un poco en los dos electrodos vecinos. Con todas las salidas funciona correctamente. La diferencia reside en que cuanto más tensión tengan los electrodos con más rapidez y fuerza reacciona la gota. Lamentablemente, tras terminar este ensayo, se produjo un cortocircuito en la entrada de la fuente de alimentación provocando que tanto el puente de diodos como el cobre de su alrededor estallaran.



Figura 4-20. Fuente de alimentación dañada.

De ahora en adelante se hará uso de la fuente de alimentación de potencia que habíamos utilizado anteriormente. Las dos siguientes pruebas consisten en mover dos gotas de forma separada. Primero, haremos un programa en el que el movimiento de ambas gotas esté sincronizado. Después, se desplazarán en sentido contrario. El funcionamiento del sistema es el mismo en todos los casos, solo cambia el número de gotas y el programa de Arduino. A continuación, se exponen las imágenes de ambas pruebas.

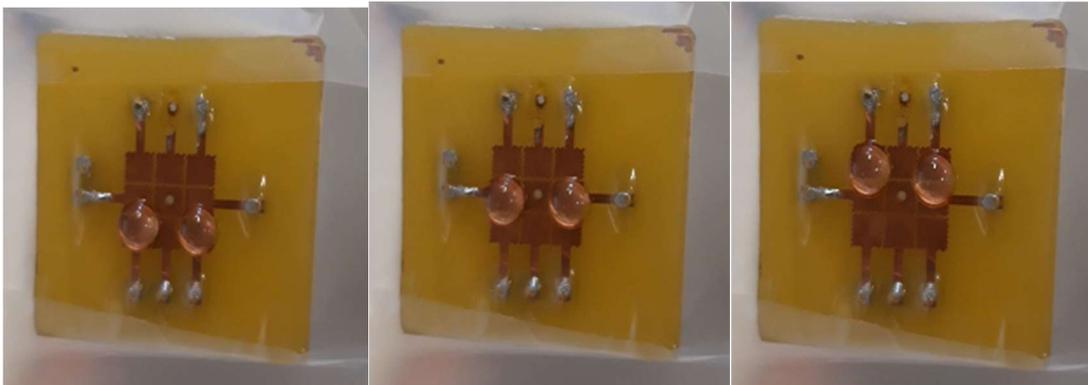


Figura 4-21. Gotas sincronizadas.



Figura 4-22. Gotas desplazándose en sentido contrario.

La última configuración que se ha probado es en la que se mezclan dos gotas independientes. Para ello, se han colocado las gotas en partes diferentes de la matriz y, mientras una se mueve, la otra permanece quieta hasta que es absorbida. Después se siguen moviendo juntas.

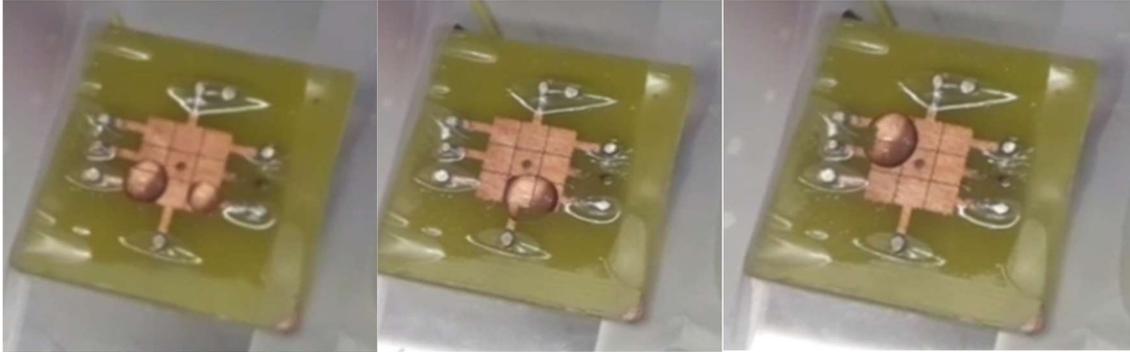


Figura 4-23. Gotas mezclándose.

Con los resultados de la figura 4-23 se puede dar por concluido el proyecto. Para muchas aplicaciones del electrowetting, con el movimiento de las gotas y la posibilidad de mezclar dos líquidos es suficiente. Hay otra técnica, valiosa para aplicaciones como los Lab-on-a-Chip, que podría haber funcionado, pero no lo ha hecho. Nos referimos a la posibilidad de separar líquidos. Se ha intentado conseguir colocando la gota en un electrodo con tensión y dejando los vecinos a tierra. Recordamos que estamos utilizando el reversed electrowetting. Aún aumentando la tensión y disminuyendo el volumen de la gota no se ha logrado separar. De todas formas, ya se han cumplido todos los objetivos y requisitos propuestos en la introducción del documento, por lo que las posibles mejoras se dejan para líneas futuras. Los programas de Arduino ejecutados en cada prueba se incluyen en el anexo.

5 CONCLUSIONES

Formación es eso que rodea cualquier vida y le da cierto sentido, lo que te libera del destino o de la maldita voluntad divina y te convierte en hombre capaz de decidir por ti mismo. Con ella eres responsable de hacer contigo lo mejor que sepas hacer con los materiales que la naturaleza te ha regalado, no estás obligado a más, pero tampoco a menos.

- Rafael Chirbes. "En la orilla."-

La finalidad de este proyecto ha sido la de diseñar y construir un sistema capaz de controlar fluidos mediante Electrowetting on Dielectric en PCB. Para alcanzar este propósito, ha sido necesario cumplir una serie de requisitos y objetivos. Ya que se ha terminado el proyecto, vamos a analizar el resultado final al que hemos llegado y cómo hemos efectuado lo que se proponía en la introducción.

En el esquema de los objetivos marcados, figura 1-6 de la sección 1.2, dividimos el problema en varias partes. Como se ha visto en el capítulo anterior se ha logrado cumplir todos los objetivos, pero ahora se van a ver más en detalle:

- **Electrodos:** Durante el proyecto se han diseñado, construido y probado varias configuraciones de electrodos. También se han considerado distintos materiales dieléctricos. Al final, se ha conseguido obtener una matriz 3x3 en la que las gotas se desplazan sin problema y que deja libertad a la hora de programar el movimiento deseado. Aún así, no se ha logrado separar una gota en dos y, al no mandar a construir el circuito, no se ha podido dar uso al electrodo central.
- **Fuente de alimentación:** Se ha diseñado una fuente de alimentación con 3 posibles tensiones de salida. Puesto que es un rectificador de onda completa con puente de diodos, su circuito es simple y con pocos elementos. El resultado que dio antes de que se produjera el cortocircuito fue bastante bueno.
- **Programa de Arduino:** Los programas que se han realizado para las diferentes pruebas han funcionado correctamente. El lenguaje Arduino es muy cómodo y sencillo, por lo que es ideal para la aplicación que se le ha dado en este trabajo.
- **Circuito de activación de electrodos:** Se han fabricado varios tipos de circuitos con y sin electrodos incluidos. Para el sistema final, se ha elegido separar el circuito de los electrodos por versatilidad, comodidad y tamaño.

Aparte de haber llevado a cabo todas las partes del proyecto con éxito, también se ha conseguido cumplir el requisito que requería crear un sistema de bajo coste. Esto es gracias a que los materiales y procedimientos que se han utilizado son económicos. A continuación, se va a calcular el precio aproximado del sistema. Aunque los componentes se venden en paquetes, solo se tendrá en cuenta la cantidad utilizada en la elaboración de un sistema.

Componente	Precio	Cantidad usada	Precio total
PCB	2 €/ud.	3	6 €
Parafilm-M	5 €/m (se estira hasta 3m)	2.7 cm	0.045 €
Resistencias ¼ W	0.2 €/ud. (10 uds.)	9	1.8 €

Resistencias 1W	0.084 €/ud. (10 uds.)	12	1.008 €
LEDs	0.524 €/ud. (10 uds.)	9	4.716 €
Transistores	1.696 €/ud. (5 uds.)	9	15.264€
Pines	2.69 €/tira (36 pines)	39	2.914 €
Cables Arduino	7.64 € (120 uds.)	22	1.4 €
Arduino Mega	49€	1	49 €
Resistencia 10 W	4.2 €/ud.	2	8.4 €
Puente de diodos	2.265 €/ud. (15 uds.)	1	2.265 €
Condensador	5 €/ud.	1	5 €
TOTAL			97,812 €

Tabla 5–1. Precio del sistema final.

Realizar varios sistemas minimizará los costes. Por ejemplo, el Parafilm-M puede estirarse hasta llegar al triple de su tamaño original. Esto hace que por 5 € poseamos 3 metros de Parafilm estirado, que es el que colocamos encima de los electrodos. Como cada matriz de electrodos mide 2.7 cm, con 5 € tendremos para el dieléctrico de 111 matrices. Para reducir aún más el precio, podría utilizarse un Arduino Nano, en vez del Mega, disminuyendo en 30 € el precio final.

Por último, el desarrollo de este trabajo no solo ha servido para obtener un sistema práctico de electrowetting, sino para entender cómo funciona desde un punto de vista físico. Además, al realizar el estado del arte, se ha mostrado la importancia y el potencial que tiene esta técnica para desarrollar aplicaciones de múltiples ámbitos.

5.1 Líneas futuras

Para final el documento, se van a comentar posibles mejoras que podrían ayudar a alcanzar un resultado mejor y más profesional:

- Mandar a construir los electrodos de forma industrial: Hay dos problemas a la hora de fabricar nosotros mismos los electrodos. El primero es que no se pueden hacer vías para comunicar los electrodos encerrados dentro de una matriz. Este inconveniente ya lo comentamos anteriormente. El segundo es que, al tener que utilizar un espesor de cobre muy fino, es muy común que se dañen pistas a la hora del revelado, por lo tanto, si se hace de forma profesional, se evitan estos desperfectos.
- Utilizar otro dieléctrico: El Parafilm-M funciona muy bien, es barato y fácil de colocar, pero es fácil que se despegue o quede desigual. Reemplazarlo por SU-8 o PDMS haría que quedase una capa fija. El inconveniente es que es más complicado de colocar debido a que se necesitarían más procesos y máquinas para extender y polimerizar estos materiales.
- Emplear componentes SMD para el circuito de activación de electrodos: No se ha podido llegar a fabricar un circuito de menos de 10x10 cm. En parte se debe a que los componentes THT que se han utilizado son demasiado grandes. Emplear la tecnología SMD reduciría bastante las dimensiones del circuito consiguiendo un diseño más compacto.
- Construir una carcasa: Conectar los electrodos al circuito y al Arduino es una tarea un poco aparatosa. Si se tuviera una estructura que permitiera dejarlo todo conectado no se tendría que montar y conectar todo cada vez que se le quisiera dar uso.

- Incluir en la misma placa la fuente de alimentación, la placa de transistores y el Arduino: De esta forma, podríamos conectar directamente la salida de la fuente de alimentación a la entrada del circuito de activación mediante pistas y pinchar en unos pines la placa de Arduino para realizar el control. Ahorrando el uso de cables y de su montaje.
- Estudiar la separación de gotas: Como se comentó en el capítulo anterior, una de las aplicaciones más interesantes del electrowetting es la capacidad de separar fluidos. Por lo que sería muy interesante conseguir que el sistema tenga esta característica.

ANEXO A: CÓDIGOS DE ARDUINO

Movimiento por electrodos	Movimiento sincronizado	Movimiento inverso
<pre>void setup() { pinMode(22, OUTPUT); pinMode(24, OUTPUT); pinMode(26, OUTPUT); pinMode(28, OUTPUT); pinMode(30, OUTPUT); pinMode(32, OUTPUT); pinMode(34, OUTPUT); pinMode(36, OUTPUT); pinMode(38, OUTPUT); Serial.begin(9600); } void loop() { digitalWrite(22, HIGH); delay(1000); digitalWrite(22, LOW); digitalWrite(24, HIGH); delay(1000); digitalWrite(24, LOW); digitalWrite(26, HIGH); delay(1000); digitalWrite(26, LOW); digitalWrite(28, HIGH); delay(1000); digitalWrite(28, LOW); digitalWrite(30, HIGH); delay(1000); digitalWrite(30, LOW); digitalWrite(32, HIGH); delay(1000); digitalWrite(32, LOW); digitalWrite(34, HIGH); delay(1000); }</pre>	<pre>void setup() { pinMode(22, OUTPUT); pinMode(24, OUTPUT); pinMode(26, OUTPUT); pinMode(28, OUTPUT); pinMode(30, OUTPUT); pinMode(32, OUTPUT); pinMode(34, OUTPUT); pinMode(36, OUTPUT); pinMode(38, OUTPUT); Serial.begin(9600); } void loop() { digitalWrite(22, HIGH); digitalWrite(34, HIGH); delay(1000); digitalWrite(22, LOW); digitalWrite(34, LOW); digitalWrite(24, HIGH); digitalWrite(32, HIGH); delay(1000); digitalWrite(24, LOW); digitalWrite(32, LOW); digitalWrite(26, HIGH); digitalWrite(30, HIGH); delay(1000); digitalWrite(30, LOW); digitalWrite(26, LOW); digitalWrite(24, HIGH); digitalWrite(32, HIGH); delay(1000); digitalWrite(24, LOW); }</pre>	<pre>void setup() { pinMode(22, OUTPUT); pinMode(24, OUTPUT); pinMode(26, OUTPUT); pinMode(28, OUTPUT); pinMode(30, OUTPUT); pinMode(32, OUTPUT); pinMode(34, OUTPUT); pinMode(36, OUTPUT); pinMode(38, OUTPUT); Serial.begin(9600); } void loop() { digitalWrite(22, HIGH); digitalWrite(30, HIGH); delay(1000); digitalWrite(22, LOW); digitalWrite(30, LOW); digitalWrite(24, HIGH); digitalWrite(32, HIGH); delay(1000); digitalWrite(24, LOW); digitalWrite(32, LOW); digitalWrite(26, HIGH); digitalWrite(34, HIGH); delay(1000); digitalWrite(34, LOW); digitalWrite(26, LOW); digitalWrite(24, HIGH); digitalWrite(32, HIGH); delay(1000); digitalWrite(24, LOW); }</pre>

```
digitalWrite(34, LOW);    digitalWrite(32, LOW);    digitalWrite(32, LOW);
digitalWrite(32, HIGH);  }                          }
delay(1000);
digitalWrite(32, LOW);
digitalWrite(30, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(30, LOW);
digitalWrite(28, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(28, LOW);
digitalWrite(26, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(26, LOW);
digitalWrite(24, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(24, LOW);
}
```

REFERENCIAS

- [1] TABELING, P. *Introduction to Microfluidics*. Oxford, U.K. ;: Oxford University Press, 2005.
- [2] CRONE, Wendy C.; SHARPE, W. N. *A brief introduction to MEMS and NEMS*. New York: Springer, 2008. p. 203-228
- [3] MEIMANDI, A., SEYEDSADRKHANI, N., JAHANSHAHI, A. *Development of an Electrowetting Digital Microfluidics Platform using Low-cost Materials*. En: *27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2019)*
- [4] PERDIGONES, F. *Lab-on-PCB and Flow Driving: A Critical Review*. *Micromachines* 2021, 12, 175.
<https://doi.org/10.3390/mi12020175>
- [5] CONINCK, J., RUIJTER, M., VOUE, M. *Dynamics of wetting* *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Volume 6, Issue 1, 2001, Pages 49-53, ISSN 1359-0294, [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(00\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(00)00087-X).
- [6] MUGELE, F., BARET, J. *Electrowetting: from basics to applications* 2005 *J. Phys.: Condens. Matter* 17 R705
- [7] EUSTATHOPOULOS, N.; NICHOLAS, M.G., DREVET, B. *Wettability at high temperatures*. Pergamon, 1999, ISBN 0080421466.
- [8] CHAE, J., KWON, J., YANG, J., KIM, D., RHEE, K., CHUNG, S. *Optimum thickness of hydrophobic layer for operating voltage reduction in EWOD systems*. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 215, 2014, Pages 8-16, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.11.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424713005463>)
- [9] KLARMAN, D., ANDELMAN, D., URBACH, M. *A Model of Electrowetting, Reversed Electrowetting, and Contact Angle Saturation*. *Langmuir*, vol. 27, no. 10, 2011, pp. 6031-6041. DOI 10.1021/la2004326 <https://doi.org/10.1021/la2004326>
- [10] Energía libre <https://conceptoabc.com/energia-libre/>
- [11] Funcional <https://www.duhoctrungquoc.vn/wiki/es/Funcional>
- [12] Principio de energía mínima <https://artsandculture.google.com/entity/m09t0c4?hl=es>
- [13] CONVERY, N., GADEGAARD, N. *30 years of microfluidics*. *Micro and Nano Engineering*, Volume 2, 2019, Pages 76-91, ISSN 2590-0072, <https://doi.org/10.1016/j.mne.2019.01.003>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590007219300036>)
- [14] SWEET, R. *High Frequency Recording with Electrostatically Deflected Ink Jets*. *Review of Scientific Instruments*, Volume 36, 131, 1965, <https://doi.org/10.1063/1.1719502>
- [15] Esquema del cabezal de impresión de inyección de tinta https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-continuous-jet-printer-Ink-from-the-supply-is-pumped-to-the-drop_fig4_350702427
- [16] TERRY, S., JERMAN, J., ANGELL, J. *A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer*. *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 26, no. 12, pp. 1880-1886, Dec. 1979, doi: 10.1109/T-ED.1979.19791.

- [17] Cromatografía: <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/procedimientos-basicos-de-laboratorio/que-es-la-cromatografia.html>
- [18] MANZ, A., GRABER, N., WIDMER, H. *Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing*. Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 1, Issues 1–6, 1990, Pages 244-248, ISSN 0925-4005, [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(90\)80209-I](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)80209-I).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092540059080209I>)
- [19] BENI, G., HACKWOOD, S. *Electro-wetting displays*. Applied Physics Letters, Volume 38, Issue 4, 1981, Page 207, 10.1063/1.92322, <https://doi.org/10.1063/1.92322>.
<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.92322>
- [20] JACKEL, J., HACKWOOD, S., VESELKA, J., BENI, G. *Electrowetting switch for multimode optical fibers*. Appl. Opt. Volume 22, Issue 11, 1983, 1765-1770 <https://doi.org/10.1364/AO.22.001765>
- [21] GAUTHIER, R., PATON, B., CHROSTOWSKI, J., FONTAINE, M., CADA, M. *Integrated Optic Variable Polarizer*. Proc. SPIE 0835, Integrated Optical Circuit Engineering V, 10 March 1988, <https://doi.org/10.1117/12.942317>
- [22] COLGATE, E., MATSUMOTO, H. *An investigation of electrowetting-based microactuation*. Journal of Vacuum Science & Technology A, Volume 8, Issue 4, 1990, 10.1116/1.576516, <https://doi.org/10.1116/1.576516>
- [23] Berge, B. *Électrocapillarité et mouillage de films isolants par l'eau*. 1993. <https://www.semanticscholar.org/paper/%C3%89lectrocapillarit%C3%A9-et-mouillage-de-films-isolants-Berge/2c2cb8445fb8903c38610332df474499ded4c905#citing-papers>
- [24] PET <https://serveiestacio.com/blog/que-es-el-pet/>
- [25] VALLET, M., BERGE, B., VOVELLE, L. *Electrowetting of water and aqueous solutions on poly (ethylene terephthalate) insulating films*. Polymer, Volume 37, Issue 12, 1996, Pages 2465-2470, ISSN 0032-3861, [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)85360-2](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)85360-2).
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032386196853602>)
- [26] LEE, KIM, J. *Liquid micromotor driven by continuous electrowetting* Proceedings. MEMS 98. IEEE. Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, Cat. No.98CH36176, 1998, pp. 538-543, doi: 10.1109/MEMSYS.1998.659815.
- [27] BERGE, B. y PESEUX, J. *Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting*. The European physical journal. E, Soft matter and biological physics, vol. 3, no. 2, pp. 159-163., 2000, ISSN 1292-8941. DOI 10.1007/s101890070029
- [28] FEENSTRA, B., HAYES, R., DIJK, R., BOOM, R., WAGEMANS, M., CAMPS, I., GIRALDO, A., HEIJDEN, B. *Electrowetting-Based Displays: Bringing Microfluidics Alive On-Screen*. Proceedings of the IEEE International Conference on Micro ElectroMechanical Systems (MEMS). 2006. 48 - 53. DOI 10.1109/MEMSYS.2006.1627733.
- [29] BYUN, S.H., CHO, S.K. *Electrowetting-on-Dielectric by Wireless Powering*. Heat Transfer Engineering, 34:2-3, 140-150, 2013, DOI: 10.1080/01457632.2013.703102
- [30] TORABINIA, M., ASGARI, P., DAKARAPU, U.S., JEON, J., MOON, H. *On-chip organic synthesis enabled using an engine-and-cargo system in an electrowetting-on-dielectric digital microfluidic device*. The Royal Society of Chemistry, Lab Chip, Volume 19, Issue 18, 2019, Pages 3054-3064, doi: 10.1039/C9LC00428A
- [31] Síntesis Orgánica <https://www.quimicaorganica.org/30-indices/quimica-organica/89-sintesis-organica.html>
- [32] Solventes <https://www.quimica.es/enciclopedia/Disolvente.html>
- [33] FINDER Baebies https://www.youtube.com/watch?v=Y7Zzj_9xgF4

- [34] Total Bilirubin Test <https://www.portea.com/labs/diagnostic-tests/bilirubin-total-tbil-99/>
- [35] Prueba de albuma <https://medlineplus.gov/spanish/pruebas-de-laboratorio/prueba-de-albumina-en-la-sangre/>
- [36] Transcriptasa inversa <https://clinicalinfo.hiv.gov/es/glossary/transcriptasa-inversa>
- [37] HO, K.-L., LIAO, H.-Y., LIU, H.M., LU, Y.-W., YEH, P.-K., CHANG, J.Y. y FAN, S.-K. *Digital Microfluidic qPCR Cartridge for SARS-CoV-2 Detection. Micromachines* (Basel), vol. 13, no. 2, 2022, pp. 196-. ISSN 2072-666X. DOI 10.3390/mi13020196.
- [38] q-PCR <https://www.e-allscience.com/blogs/articulos/cuales-son-las-diferencias-entre-pcr-rt-pcr-qpcr-y-rt-qpcr>
- [39] Página oficial de KiCad <https://www.kicad.org/>
- [40] Archivos Gerber <https://www.surtel.es/blog/que-son-los-archivos-gerber/>
- [41] Archivos KiCad <https://docs.kicad.org/4.0/es/kicad/kicad.html>
- [42] Photoplotter <https://www.netinbag.com/es/manufacturing/what-is-a-photoplotter.html>
- [43] Parafilm M
<https://www.dilabsa.com/es/parafilm/#:~:text=El%20papel%20Parafilm%20es%20aquella,el%20cuidado%20de%20la%20salud.>
- [44] Arduino Mega 2560 <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>
- [45] Imagen Arduino Mega 2560
<https://docs.arduino.cc/static/e3926b6c0385d96083eb0db77bbb5e33/A000067-datasheet.pdf>