



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Grado en Óptica y Optometría

MEMORIA TRABAJO FIN DE GRADO TITULADO

ELECTROWETTING Y LENTES LÍQUIDAS

Presentado por Andrea González Riveras
Tutelado por: Pablo García Sánchez e Irene Sánchez Pavón
Tipo de TFG: Revisión Investigación

En Valladolid a, 16 de Noviembre de 2020

1. Introducción
2. Fundamentos de la tensión superficial y el electrowetting
3. Aplicaciones electrowetting: lentes líquidas
 - 3.1. Primeras aplicaciones
 - 3.2. Nuevos usos
 - 3.2.1. Prismas líquidos
 - 3.2.2. Pantallas electrónicas
 - 3.2.3. Nuevos estudios
 - 3.2.4. Estudio de la funcionalidad ocular
 - 3.3. El electrowetting en la actualidad
3. Conclusión
4. Bibliografía

RESUMEN

El electrowetting, es una tecnología que consiste en la variación del ángulo de contacto de una gota mediante la aplicación de un voltaje. Con ello se puede modificar la curvatura de la gota, y así variar su poder dióptrico.

El objetivo del trabajo, es hacer una revisión de las lentes líquidas y de todas las posibles aplicaciones que presenta.

Las primeras referencias que se tienen acerca del electrowetting, se remontan a finales del siglo XIX con los primeros estudios de Lippmann, posteriormente de Frounkin y ya en el siglo XX con Berni y Hackwood, que fue lo que propició que actualmente cada vez se utilice más en distintos campos.

Esta técnica, se ha ido desarrollando y perfeccionando hasta conseguir aplicarlo tanto en el mundo de la óptica, como en la biomedicina.

Se han estudiado diferentes utilidades de las cuales algunas no se han continuado investigando por falta de resultados y otras se han seguido desarrollando hasta su fabricación y comercialización. Debido a las múltiples características que ofrece, las demandas de mercado en la actualidad han hecho que en los últimos años se numerosas empresas muestren su interés por esta tecnología.

Hay cierta controversia con lo que puede ofrecer el electrowetting, ya que tiene ciertas limitaciones, pero se continúa investigando para tratar de mejorarlo.

Palabras clave: electrowetting, ángulo de contacto y lentes.

1. INTRODUCCION

Los fluidos ópticos, son una rama de la óptica que se encuentra en constante expansión y que permite una gran cantidad de aplicaciones. La micro óptica está muy presente en la industria y tiene numerosas utilidades como por ejemplo las cámaras de los teléfonos móviles, la fibra óptica, equipamiento médico...

Sin embargo, su funcionalidad, está limitada por la distancia focal fija. La mayoría de los estudios realizados, se basan en el uso de lentes esféricas para desarrollar este tipo de sistemas ópticos, sin embargo, estudios recientes han determinado que las lentes esféricas tienen un mayor potencial y que presentan numerosas ventajas frente a este tipo de lentes. (Zhang W. et al, 2013)

Este trabajo comienza con una breve revisión de los fundamentos de tensión superficial, ángulo de contacto y electrowetting. Se lleva a cabo además, un análisis de los estudios y avances que se han desarrollado a lo largo de los años acerca de esta técnica. Se exponen los usos que tiene actualmente el electrowetting y las posibles utilidades que se están estudiando.

Lentes líquidas

Estas lentes, tiene su origen en los primeros trabajos de Lippmann, que están considerados como la base del electrowetting y por tanto de las lentes líquidas de potencia variable. Lippmann, fue el primero en estudiar el fenómeno del electrowetting observando los cambios que se producían en una gota cuando se le aplica un voltaje a través de una interfase. (Lippmann G., 1875).

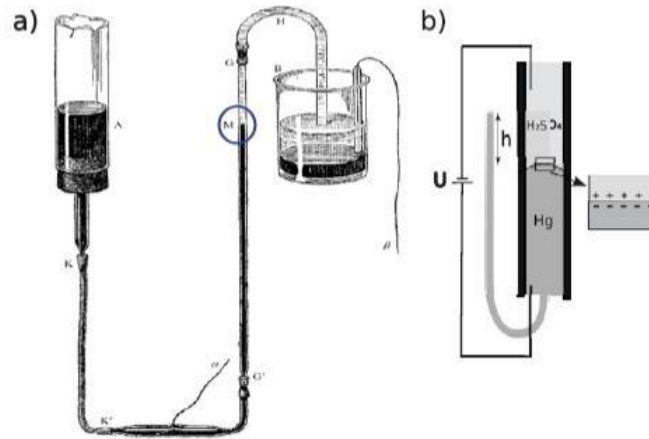


Figura 1. Experimento de Lippmann, donde se muestra la configuración experimental (a) utilizada donde aplicando una diferencia de voltaje entre los alambres se conseguía variar el menisco y una representación esquemática (b) donde se muestra que las cargas eléctricas se acumulan en la solución produciendo un cambio en la tensión superficial (García- Sánchez y Mugele, 2011)

A partir de esta primera investigación de Lippmann y hasta la actualidad, se han llevado a cabo numerosos avances para tratar de mejorar y buscar nuevas aplicaciones a esta tecnología.

Los líquidos debido a sus propiedades se han usado para lograr distintos fenómenos ópticos. El electrowetting es un fenómeno muy atractivo para manipular gotas de agua. Se han fabricado varios dispositivos ópticos basados en esta tecnología, como son lentes ajustables, dispositivos de dirección del haz, pantallas... (Murade et al,2011)

En los últimos años, las necesidades de las empresas por obtener diseños más pequeños de sus lentes y así mejorar su funcionalidad, para poder aplicarlos a distintos campos ha hecho que se consigan grandes avances sobre todo en el campo de la óptica.

2. Fundamentos de la tensión superficial y el electrowetting

Los líquidos, están formados por moléculas que presentan fuerzas de atracción entre ellas. Para una molécula en el interior del líquido, la fuerza de atracción es en todas las direcciones, sin embargo, en la superficie la atracción solo es hacia el interior, por lo que la atracción entre moléculas será más fuerte (Fig.2). El líquido, por lo tanto, adquiere la forma del área que menor superficie tenga, es decir forma de esfera. (Torres JP, 2007)

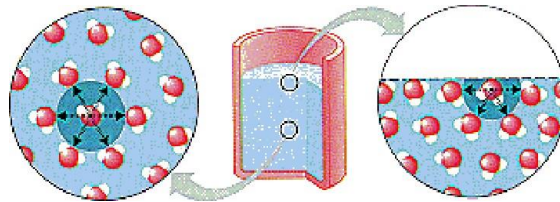


Fig.2: Cohesión entre partículas con fuerzas de atracción en todas las direcciones en el interior del líquido (izq.) y hacia el interior cuando se encuentra en la superficie (dcha.) (Torres JP, 2007)

La tensión superficial, es la tendencia de una interfase a reducir su superficie, siendo muy importante cuando se trabaja con gotas. La ecuación de Young- Dupré (Ecuación 3.1), relaciona el ángulo de contacto de una gota, con la tensión superficial de las interfases sólido - líquido (γ_{sl}), líquido- vapor (γ_{lv}) y sólido- vapor (γ_{sv}). Para una gota, cuando hay ausencia de campo eléctrico, el ángulo que presenta, es denominado θ_y (Ecuación 3.2) (Garcia-Sanchez y Mugele , 2011)

$$\cos \theta_y = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (3.1)$$

El ángulo de contacto de un sólido es una propiedad por la que se puede medir la tendencia que tienen a ser hidrofóbicos, es decir su capacidad para repeler el agua. Es un parámetro importante a la hora de medir los mecanismos de interacción entre interfases sólidas. (Fig. 3).

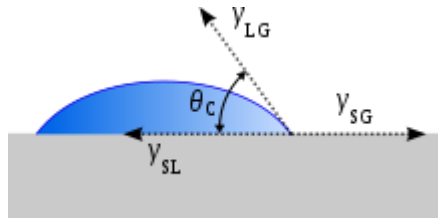


Fig. 3: Ángulo de contacto de una gota según la interacción entre las interfases sólido- líquido, líquido- vapor y sólido- vapor. (Chen y Bonnaccurso, 2014)

Si el ángulo de contacto es $<90^\circ$ el sistema se denomina hidrofílico, mientras que si el ángulo es $>90^\circ$ el sistema será hidrofóbico.

Si colocamos una gota de agua sobre un sustrato metálico cubierto por un fino repelente al agua, debido a las fuerzas de tensión superficial, el líquido va a adquirir una forma esférica. Cuando se le aplica un voltaje entre la gota del líquido y la superficie sobre la que se encuentra podemos variar el ángulo de contacto de la gota. (Chen y Bonnaccurso, 2014)

El electrowetting, consiste en la variación del ángulo de contacto mediante la aplicación de un campo eléctrico (Fig.4). Mediante la ecuación del electrowetting (Ecuación 3.3), donde tenemos que ϵ , es la constante dieléctrica de la capa aislante, d es el espesor de dicha capa y se va a poder relacionar el ángulo de contacto de la gota, con el voltaje aplicado.

$$\cos\theta = \cos(\theta_0) + \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 U^2}{d \gamma_{lv}} \quad (3.3)$$

De esta ecuación podemos deducir que el ángulo de contacto dependerá del voltaje que se aplica a los electrodos (U^2). La figura 5, muestra la variación del ángulo de contacto de una gota para distintos valores del voltaje aplicado.

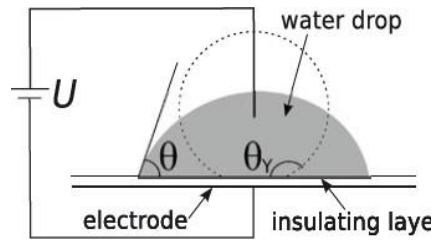


Fig.4: Representación de una gota de líquido conductor en una situación de electrowetting. Presenta una carga en un lateral que cuando se aplica un voltaje y gracias a la tensión superficial modifica la forma de la gota.(García- Sánchez y Mugele, 2011)



Fig.5.Variación de la forma de una gota al aplicar diferentes voltajes (Corning Technology Center)

3. Aplicaciones del Electrowetting: lentes líquidas

Los estudios sobre el electrowetting comienzan con Lippmann en 1875 cuando estudió las variaciones que sufría una gota de mercurio sumergida en un electrolito cuando se le aplicaba un voltaje a través de la interfase líquida (Fig.1) (Lippmann G,1875). Posteriormente Froumkine desarrollo la misma idea de cómo las cargas de una interfase pueden modificar el ángulo de contacto de una gota en una superficie metálica (Berge y Peseux, 2000)

En 1981, se describe el electrowetting convencional por Beni y Hackwood, sin embargo, sus avances no fueron lo suficientemente significativos para el momento y no tuvieron éxito (Beni y Hackwood, 1981)

Sería a comienzos de los años 90, cuando comenzaría a tomar importancia, al agregar una capa dieléctrica a una superficie metálica, lo que permitía aplicar grandes voltajes. Esto se denominaría EWOD, que son las siglas de electrowetting on dielectric. (Li jia y Kim, 2020)

Los efectos del electrowetting se aplicaron a una gota de agua y se observó que mediante la variación del ángulo de contacto se podía obtener una lente de focal variable debido a los cambios en la curvatura de una interfase. Esta utilidad puede servir para múltiples fines siendo el más característico de todos las lentes de focal variable.

Para formar una lente de focal variable, tenemos una cápsula que contiene dos tipos de líquidos, siendo uno de ellos aislante y apolar y el otro es un líquido de una solución acuosa conductora (Fig.6). Estos líquidos, tienen un índice de refracción distinto entre ellos, pero la misma densidad por lo que no van a sufrir deformaciones por la gravedad en la interfase.

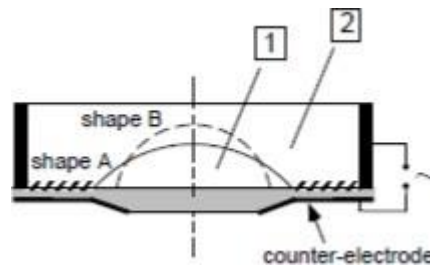


Fig.6: Representación de la célula formada por un líquido aislante y uno conductor, donde se observa la variación de la forma de la gota al aplicar un voltaje (Berge y Peseux, 2000)

Se deposita un electrodo a un lado de la ventana, y mediante la aplicación de un voltaje entre el líquido conductor y el aislante, podemos modificar la humectabilidad de la superficie.

Al aplicar un voltaje, se produce una deformación en la forma de la gota que es lo que nos permitirá obtener una lente de focal variable.

El líquido aislante tiene forma de una gota, que se encuentra en contacto con una fina ventana aislante. La superficie de la ventana aislante es hidrofóbica, de forma que hace que el líquido se asiente sobre ella. Si no fuera hidrofóbica la gota se expandiría cuando el voltaje es 0 .

Un electrodo transparente se deposita en la pared externa de la venta y se llama contraelectrodo. Si aplicamos un voltaje entre el contraelectrodo y el líquido conductor, vamos a favorecer la humectabilidad de la superficie. Esto va a producir una deformación en la interfase, haciendo que cambie la curvatura y con ello la distancia focal.

Esta técnica tiene que cumplir dos requisitos:

- 1- Para mantener la gota en una forma determinada cuando no se aplica voltaje, la pared en contacto con la gota tiene que ser hidrofóbica.

2- Cuando se aplica el voltaje la gota debe permanecer centrada en el eje óptico. Para ello usaremos una película aislante de espesor variable.

Del trabajo de Berge y Peseux (Berge y Peseux, 2000), se determinó que el espesor de la capa aislante va a introducir un gradiente de humectabilidad de la superficie por efecto del electrowetting. Y dicho gradiente va a tener ciertos beneficios, como va a ser que proporciona una base circular para la gota y así evita que haya distorsiones ópticas y además va a centrar la gota en el eje óptico.

Para llevar a cabo esta técnica vamos a usar un sistema formado por una lente de focal variable como sistema de magnificación, mediante el cual ampliando un objeto que en nuestro caso será una cuadrícula, podemos deducir su distancia focal (Fig.7).

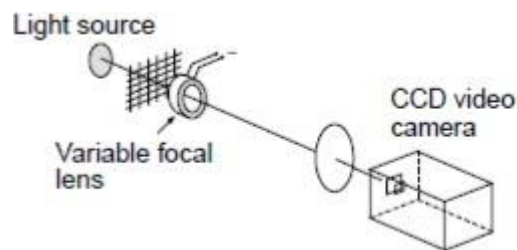


Fig.7: Dibujo del experimento de una lente de focal variable, mediante la magnificación. (Berge y Peseux, 2000)

De este experimento se obtuvo que mediante la aplicación de voltajes la forma de la gota puede modificarse y producir una variación de la distancia focal y amplificando por lo tanto la imagen (Fig.8).

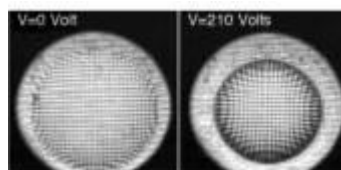


Fig. 8: Imágenes del experimento, antes de aplicar un voltaje (izda) y tras la aplicación de un voltaje de 210V (dcha), donde se observa la amplificación de la imagen.(Berge y Peseux, 2000)

Se determinó por tanto que la variación en dioptrías experimentaba un aumento según el voltaje (Fig.9). Sin embargo, las mediciones realizadas, tenían un límite que era para un ángulo de contacto de 90°, dependiendo el tamaño de la gota.

Se cree también que usar lentes con un voltaje mayor no va a resultar útiles, ya que van a producir una gran cantidad de aberraciones (Berge y Peseux, 2000).

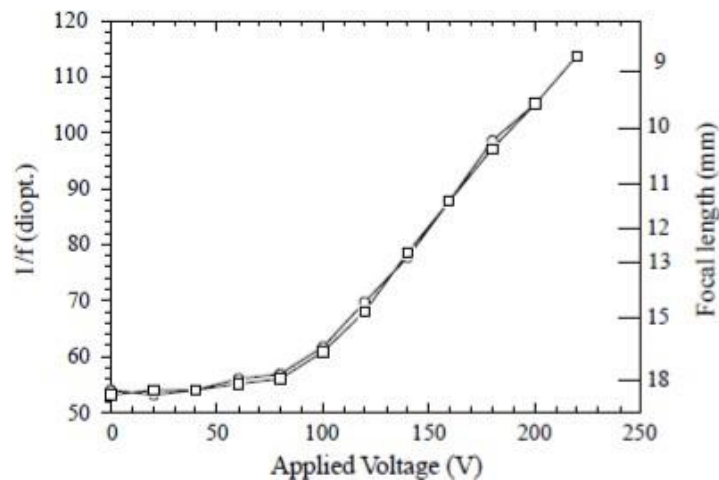


Fig.9: Variación de la distancia focal en dioptrías según el voltaje que se le aplica. La variación de la focal inversa, varía entre 30-100D para un voltaje aplicado de 200V. (Berge y Peseux, 2000)

Aunque los voltajes que se aplican van a ser muy altos, la energía disipada en el sistema es muy pequeña, por lo que es posible usar suministros de energía más pequeños lo que será más seguro para la salud.

Es difícil predecir la distancia focal según el voltaje ya que va a depender del material de la lente que utilizemos, por ejemplo, para las lentes de epoxi va a ser muy sensible.

¿Por qué funciona bien?

Los fenómenos de humectación son técnicas histeréticas, lo que quiere decir que conservan sus propiedades siendo muy difícil por lo tanto conseguir superficies con ángulos menores de 5°. Por ello en los primeros experimentos de electrowetting realizados se midió casi sin histéresis (Berge y Peseux, 2000), obteniéndose un pequeño gradiente de humectabilidad que proporcionó a la gota una forma estable, circular y centrada en el eje óptico.

Hay sin embargo ciertas restricciones, ya que debido a los grandes esfuerzos para obtener superficies con ángulos menores de 5° y que el costo energético depende también de dicho ángulo no será favorable trabajar con ángulos pequeños.

Casi siempre se va a comenzar con ángulos mayores de $\Theta=45^\circ$, a voltaje 0 y el ángulo se ira ajustando según el volumen de aceite inyectado en la gota.

Otro obstáculo serán las gotas de gran tamaño, ya que si la densidad es insuficiente por acción de la gravedad se producirán aberraciones. Dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar tendrá un límite de tamaño u otro, aunque se cree que se podría aumentar el diámetro de la lente hasta 20-30mm sin dificultad. Sin embargo, al aumentar el tamaño, la vibración de la gota será mayor por lo que puede resultar un problema grave.

El concepto explicado, por tanto, abre la posibilidad a múltiples diseños. Los gradientes de humectabilidad pueden usarse para adaptar lentes cilíndricas o primas de desviación variable. También podría usarse para sistemas de imagen que requieran un enfoque rápido, para endoscopios...(Berge y Peseux, 2000)

3.1. Primeras aplicaciones

Una de las primeras utilizations que se dieron a la tecnología del electrowetting es la de lentes en miniatura. Al principio de aparecer esta tecnología, se determinó que había una importante necesidad en la industria de fabricar sistemas con lentes en tamaño más

reducido, ya que no siempre era posible reducir sus componentes. Esto podría ser utilizado para las cámaras de los teléfonos móviles.

Se observó que la variación del menisco formado entre dos líquidos inmiscibles se podía formar una lente óptica de potencia variable ya que se modificaba su distancia focal. Está demostrado que los líquidos que se encuentran en el tubo forman una lente autocentrada con una calidad óptica muy alta.

Este tipo de lentes por lo tanto, se demostró que es ideal para su utilización en aplicaciones portátiles. (Kuiper y Hendriks, 2004).

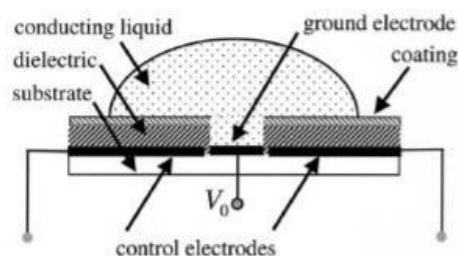


Fig.10: Representación de una microlente cuyo poder dióptrico está condicionado por el ángulo de contacto y los índices de refracción de los líquidos. (Krupenkin T et al.,2003)

Se formó un sistema compuesto por un aislante y un conductor (Krupenkin T et al.,2003), de forma que cuando se aplicaba un voltaje se reducía la tensión superficial entre ambos (Fig.10). El ángulo de contacto obtenido dependía del voltaje aplicado y de la tensión superficial de los medios utilizados.

De esta forma podíamos variar la curvatura del menisco que forma la gota y así modificar su poder dióptrico.

En la conclusión del estudio, se obtiene que se pueden crear lentes de focal variable para distintos usos en el mundo de la óptica, teniendo en cuenta sin embargo que el ángulo de contacto tiene sus limitaciones y que la cantidad de voltaje aplicado es también limitada, ya que a voltajes mayores de 80V se satura condicionando el poder dióptrico que se puede alcanzar. (Krupenkin T et al.,2003)

El electrowetting, por lo tanto, ha surgido como una gran herramienta para manipular la interfaz liquido- liquido, siendo explorado para producir lentes liquidas de distinta morfología.

Sin embargo, presenta un problema principal y es que el rendimiento de las lentes liquidas moduladas por electrowetting, está determinado por las oscilaciones de su superficie. Cuando se crearon las primeras lentes al cambiar la distancia focal demasiado rápido la inercia de los líquidos evita que su superficie siga el cambio de forma instantánea creándose olas. Estas desviaciones incontroladas de la interfase son la causa de que presenten aberraciones que limitan la velocidad operativa de las lentes.

Este tipo de mecanismos de conducción retienen el carácter esférico de la lente haciendo que sea propensa a las aberraciones esféricas lo que obstaculiza la calidad de las imágenes afectando negativamente a su rendimiento, por lo que es deseable utilizar formas no esféricas para minimizar aberraciones y mejorar la resolución de la imagen.

La aberración esférica es la más difícil de eliminar. Debido a la curvatura variable que presentan las lentes esféricas pueden superar este tipo de aberración (Fig.11) , además, son un tipo de lentes que también presentan una distancia focal variable (Mishra et al,2016).

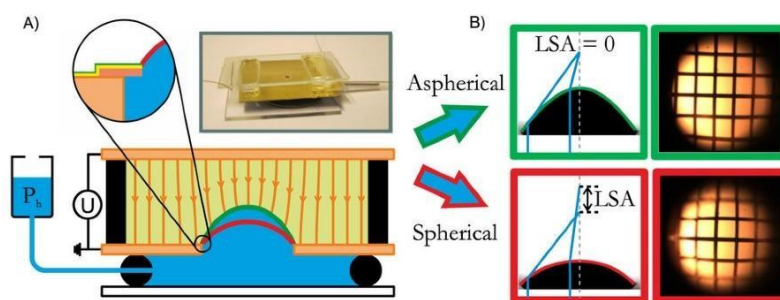


Fig.11: (A) Esquema del sistema que forma la lente esférica con una fotografía del dispositivo real en la parte superior. (B) Comparativa de los perfiles de una gota asférica (verde) y una gota esférica (rojo) que demuestra como disminuye la aberración esférica en las lentes asféricas. (Mishra et al, 2016)

Las primeras investigaciones sobre este tipo de lentes (Oh et al,2011), mostraron que el campo eléctrico es una herramienta potente para variar el menisco en una apertura circular. Cuando se aplica un voltaje entre la gota y el electrodo, la gota puede llegar a

adquirir diferentes configuraciones esféricas. El menisco adquiere formas esféricas de excentricidades variables a medida que va aumentando el voltaje.

Recientemente (Mishra et al, 2016) se expusieron los resultados obtenidos acerca de este tipo de lentes según estudios experimentales, demostrando que se pueden obtener lentes líquidas con longitud focal variable y asfericidad. Los investigadores mostraron que a través de dos parámetros como son el campo eléctrico y la presión hidrostática se puede ajustar la asfericidad y la distancia focal de forma independiente.

Estos trabajos cambiaron el enfoque hacia este problema optimizando los líquidos y la mecánica de las superficies para minimizar el tiempo de respuesta. Como consecuencia se han desarrollado lentes nuevas para crear lentes esféricas que solucionen el problema de las aberraciones (Strauch et al, 2018).

3.2. Nuevos usos

3.2.1. Prismas líquidos

Los avances en el campo de los microfluidos especialmente a pequeña escala y la idea de usarlos para controlar la luz, ha despertado grandes intereses los últimos años. El uso de microfluidos proporciona múltiples beneficios respecto a los sólidos, ya que los líquidos tienen una tendencia a reducir la tensión superficial, lo que hace que su superficie sea más suave, eliminando los procesos de pulido que se necesitan con los sólidos. Otra de las grandes ventajas, es que esta tecnología EWOD permite fabricar instrumentos con un tamaño más reducido, ya que no se requieren piezas grandes y complejas, lo que hace que los dispositivos sean más versátiles.

Se ha hablado ya del uso de las lentes, que son dispositivos que mediante la tecnología EWOD funcionan como una lente óptica donde se controla la curvatura con la aplicación de voltajes.

Otra variante de esta tecnología, serían los prismas líquidos que consisten en un prisma con dos líquidos inmiscibles dentro que poseen distintos índices de refracción (Fig.12). Por efecto del electrowetting se puede controlar el ángulo del prisma y así modificar la trayectoria del haz (Clement et al, 2017). Sin embargo, los trabajos que se han realizado anteriormente con prismas líquidos no han alcanzado el rendimiento suficiente.

Se han seguido realizando estudios para tratar de mejorar estos prismas, y se ha descubierto que se aumentaba su rendimiento si se usaba una combinación de agua con un aceite de alto índice de refracción. Además, se observó que si utilizábamos un prisma doble permitía una mayor desviación, teniendo como resultado el haz mayor que se ha obtenido hasta el momento. Todo esto ha sido gracias a la tecnología EWOD.

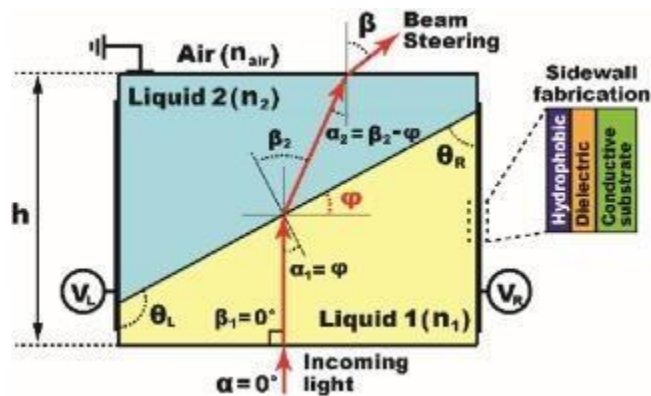


Fig.12: Representación de un prisma formado por 4 paredes y 2 líquidos inmiscibles, que mediante el electrowetting se puede ajustar el ángulo por aplicación de voltajes. (Clement et al, 2017)

En este estudio (Clement et al, 2017), se lograba obtener una lente de Fresnel organizando estos prismas líquidos en matrices donde cada uno de ellos va a sustituir a los elementos que forman las lentes de Fresnel sólidas. El rendimiento por tanto de estas lentes va a estar determinado por la dirección del haz que pueda alcanzar cada prima, lo que a su vez va a influir en la capacidad de ajuste de la focal de una lente de Fresnel.

Se ha determinado por tanto que las lentes de Fresnel con tecnología EWOD pueden lograr áreas de apertura grandes y que el poder controlar el ángulo de los prismas hace que sea una tecnología con mucho potencial haciendo posible poder sustituir lentes voluminosas por este tipo de lentes. (Smith et al, 2006)

3.2.2. Pantallas electrónicas

Las pantallas son un componente muy importante en móviles y ordenadores y numerosas empresas se han propuesto implantar pantallas reflectantes. Sin embargo, la mayoría de ellas carece de una rápida respuesta en cuando a la muestra de contenido. En los últimos años se han propuesto numerosas tecnologías para aplicarlas en pantallas reflectantes.

Una de las que más llama la atención, es su utilización en papeles electrónico que combina las características del papel impreso convencional y la capacidad para manipular la información electrónica. La primera pantalla electrónica modulada por electrowetting, fue presentada en 2003 por Hayes en un estudio para los laboratorios de investigación Phillips (Hayes y Feenstra, 2003).

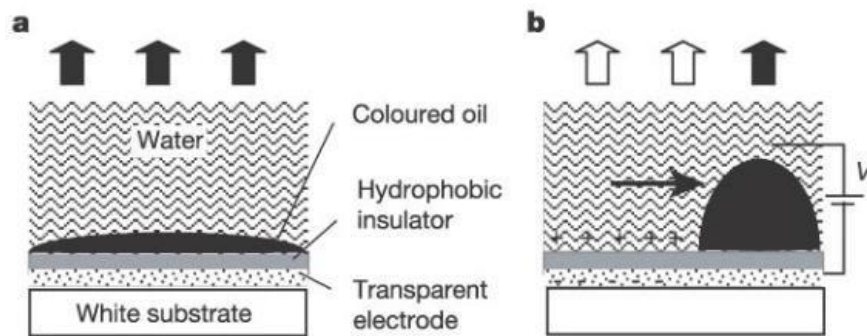


Fig.: 13. Representación de la idea original de Hayes para pantallas electrónicas moduladas por electrowetting). A la izquierda cuando no hay voltaje aplicado y a la derecha tras la aplicación de voltaje. (Hayes y Feenstra, 2003)

Para desarrollar esta aplicación, se formó una interfaz agua- aceite. En equilibrio una capa de aceite coloreado se encuentra entre el agua y la capa hidrofóbica (Fig.13). Debido a la tensión superficial que es más fuerte que la gravedad, la película de aceite es estable en todas las orientaciones. Sin embargo, al aplicar un voltaje, se produce un desplazamiento de energía siendo el sistema ahora energéticamente desfavorable y para reducir su energía necesita mover el agua desplazando a su vez el aceite también.

Como resultado, se obtuvo una pantalla, cuya reflectividad y contraste eran muy próximos al papel normal además el color que se obtenía era mucho más brillante que el obtenido por otras técnicas emergentes (Hayes y Feenstra, 2003).

Se continuó perfeccionando la técnica, y en 2009, Heikenfeld obtuvo un modelo muy avanzado de pantalla por electrowetting (Heikenfeld et al, 2009), en el que las dispersiones del pigmento se movían verticalmente entre dos capas en una estructura multicapa. Se observó también que, si se coloca una superficie blanca además debajo de este elemento, se obtiene un interruptor óptico de alto brillo y contraste que puede usarse como pantalla reflectante. (Kim y Steckl, 2010)

Obtenemos de esta forma un interruptor óptico simple y reversible en un píxel conducido por electrowetting. Esta técnica se ha ido perfeccionando con los años, de forma que los últimos estudios han permitido obtener pantallas con una mayor calidad visual.

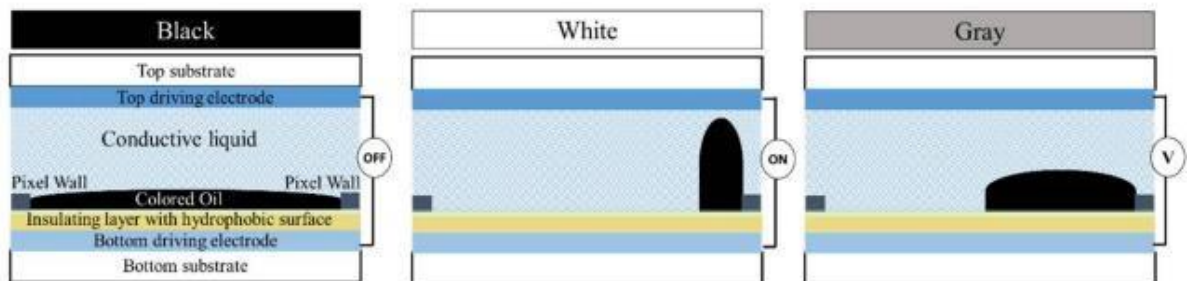


Fig.14: Representación de la estructura de una pantalla que trabaja mediante electrowetting donde se muestra como varía la escala de grises en un píxel cuando se le aplica un voltaje (Jin et al, 2018)

En posteriores estudios (Jin et al, 2018), se continuó perfeccionando esta tecnología y se consiguió obtener una amplia gama de grises mediante la variación del voltaje. Esta escala de grises por lo tanto dependía de la cobertura de la película de aceite sobre el píxel al aplicar el voltaje, obteniéndose así un interruptor óptico simple y altamente reversible modulado por electrowetting. (Fig.14)

El contraste se puede controlar debido a que se usa un tinte determinado que solo va a absorber una parte del espectro. La reflectividad y contraste alcanzados se acercan a la del papel.

Por lo tanto, podemos deducir que esta tecnología tiene unas características potenciales como son una rápida respuesta, un buen rendimiento óptico, un bajo consumo energético y la posibilidad de fabricar pantallas flexibles, que la distinguen frente a otras tecnologías emergentes en esta área. (Jin et al, 2018)

Una variación de las pantallas electrónicas es la fabricación de lentes, para su utilización en pantallas convertibles 2D o 3D. Recientemente se desarrolló una lente planoconvexa

con propiedades multifocales mediante el fenómeno de electrowetting, sin embargo, aunque su estructura era muy similar a la de una lente 3D el rendimiento no era adecuado, ya que la diferencia de los índices de refracción entre los líquidos no era muy grande.

Se siguieron realizando estudios para tratar de mejorarlo y como resultado, se obtuvo una estructura biconvexa que poseía muchas mejoras en comparación con la estructura planoconvexa, lo que permitió una mejora de la imagen 3D. Este diseño tiene la ventaja de poder proporcionar una imagen 2D sin necesidad de aplicar un voltaje. (Sim et al, 2018)

3.2.3. Lentes Flexibles

Para incrementar las posibles aplicaciones que tiene el EWOD, se desarrolló un substrato de polimetilsiloxano (PDMS). Se fabricaron una serie de celdas controladas de forma individual para manipular el aceite de silicona por EWOD (Fig.15).

En este proceso se utilizaron materiales exclusivamente flexibles para así conseguir mejorar la robustez del dispositivo. Los dispositivos que se fabricaron se probaron con una gota de aceite y se le aplicó un voltaje hasta 100V mediante electrodos subyacentes.

El diseño que se eligió está basado en la manipulación de una gota de aceite que se encuentra en una solución acuosa para variar el ángulo de contacto y centrar la gota de aceite gracias a los electrodos. La matriz de este sistema está fabricada en PDMS únicamente.

Los electrodos están aislados por una capa dieléctrica con una región hidrofóbica sobre ellos y un anillo de PDMS creando un pozo donde se encuentran los 2 líquidos inmiscibles que serán manipulados por electrowetting. Una gota de aceite de silicona se

coloca encima de los electrodos y se rodea de agua que es un líquido conductor por lo que va a actuar de electrodo flotante (Fig.14).



Fig. 15: Representación de la estructura de la celda que se encuentra fijada sobre una superficie flexible con una gota de aceite colocada sobre ella. (Van Grinsven et al, 2017)

Como conclusión al estudio, se determinó que la matriz EWOD, era capaz de actuar y que el electrodo centraba la gota de aceite como se esperaba. Se observó también que a medida que se aumentaba el voltaje aplicado, el área que cubría la gota de aceite era menor, lo que va a corresponder al aumento del ángulo de contacto. (Van Grinsven et al, 2017).

Se ha demostrado por tanto la posibilidad de fabricar matrices por electrowetting que estén compuestas por materiales flexibles. Este diseño, incluye también una mejora en la robustez del sistema a la vez que se mejora la flexibilidad. Sin embargo, aunque los resultados de la simulación demostraron su efectividad, aún hay cosas que mejorar ya que presenta una serie de discrepancias que es necesario solucionar.

Se continuó mejorando esta técnica y se observó que podía ser utilizado también para la fabricación de microlentes flexibles en las que cada lente líquida en la matriz se puede ajustar de forma individual por electrowetting, ya que están situadas sobre un sustrato de PDMS que hace que la matriz con las lentes funcione como un sistema óptico variable.

Esto se ha demostrado que permite un aumento del campo de visión significativo en comparación de otras matrices más planas, además de proporcionar una distancia de enfoque mayor.

Las microlentes normalmente se fabrican en estructuras rígidas, pero estos últimos años se ha tratado de trabajar en el desarrollo de lentes en sustrato flexible. Sin embargo, se

ha observado que no se puede variar la distancia focal de una lente en una matriz de forma individual respecto a las demás.

Al tratar de crear una serie de lentes moduladas por electrowetting en un sustrato flexible (Fig.16), se intentó conseguir una plataforma de imagen altamente configurable que fuera capaz de proporcionar una alta calidad en la visión de campo. Para ello se fusionaron las imágenes de las lentes de la matriz en 1 sola.

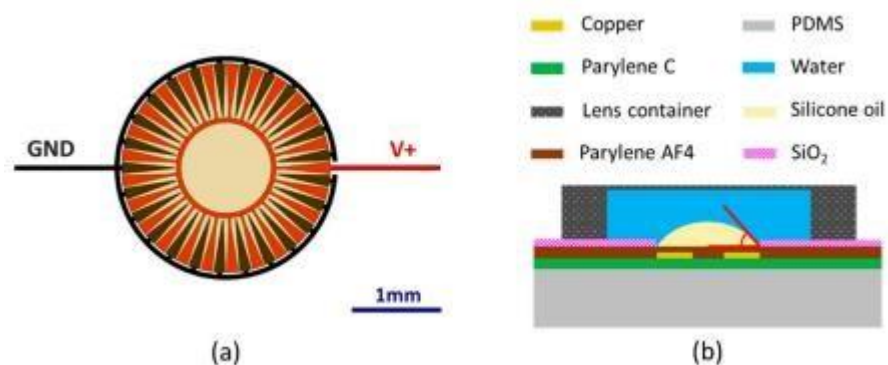


Fig.16: Representación del diseño del electrodo donde muestra la gota de aceite que cuando se aplica el voltaje será exprimida por el agua que la rodea (Van Grinsven et al, 2019)

La extensión del campo visual, por lo tanto, va a depender del radio de curvatura de la superficie adyacente. Otro factor importante a tener en cuenta es que las lentes de forma individual pueden girar, lo que va a proporcionar una mayor profundidad de campo (Van Grinsven et al, 2019).

Se finalizó el estudio con este método como una técnica exitosa para fabricar microlentes de EWOD en láminas flexibles. Esta técnica mejoró respecto a estudios anteriores (Van Grinsven et al, 2017) permitiendo una mayor calidad de actuación respecto a los voltajes aplicados y la calidad de la capa dieléctrica proporcionó una estructura más robusta a las lentes frente a altos voltajes.

Las aberraciones esféricas que suelen ser un problema en las lentes se minimizaron debido a que únicamente la sección central de la lente líquida es la que se utiliza para obtener las imágenes.

3.2.4. Estudio de la funcionalidad ocular

Los sistemas ópticos que imitan las funciones oculares son de una gran importancia en el mundo de la óptica. Ofrecen una gran cantidad de ventajas respecto a las tecnologías ópticas tradicionales como pueden ser una mayor adaptación a los cambios y una amplia gama de características funcionales en tamaños en miniatura.

Los requisitos que deben cumplir estos sistemas son que sean compactos con un alto grado de funcionalidad, la capacidad para reconfigurarse a tiempo real para así poder completar cualquier tarea y una rápida adaptación a los cambios ambientales.

Sin embargo, los sistemas ópticos convencionales no son tan flexibles y móviles actualmente, por lo que la miniaturización de los sistemas ópticos sólidos produce una reducción de su calidad y de su rendimiento. La solución a este problema está en buscar sistemas ópticos alternativos que imiten las funciones de los órganos visuales, y se ha tratado de imitar las características del ojo humano como pueden ser la capacidad para ajustar la distancia focal y la función de acomodación lo que se va a conseguir mediante el uso de lentes líquidas.

Actualmente hay dos posibilidades para la creación de lentes líquidas que imiten la estructura del ojo humano:

- 1- Una gota de líquido conductor rodeada de aire (Fig.17)

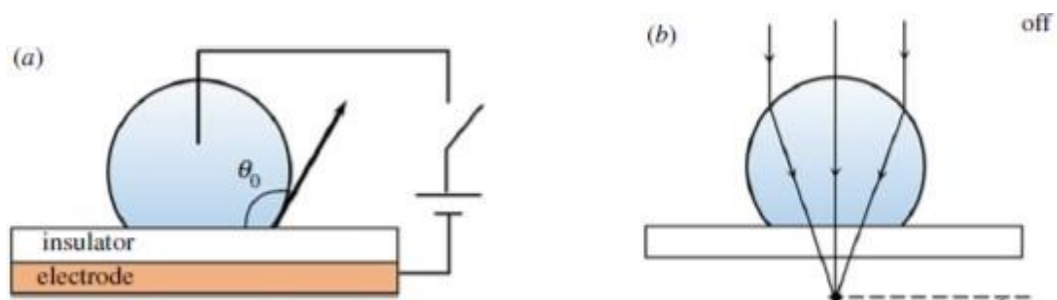


Fig.17: Representación de una gota recubierta de aire en la que cuando no se aplica voltaje el ángulo de contacto es $\theta > 90$ (a), mientras que cuando se aplica voltaje el ángulo de contacto cambia provocando una variación en la distancia focal (b) (Ivanova N.,2020)

En este caso, obtendremos una lente planoconvexa con focal variable en un rango pequeño. Este diseño presenta desventajas como por ejemplo la sensibilidad a la gravedad lo que va a producir una limitación en la orientación espacial y en el tamaño de la lente. Además, dado que los electrodos se encuentran depositados en el sustrato, pueden producir dispersión de la luz y como consecuencia una baja calidad de la imagen.

2- Dos líquidos inmiscibles colocados en una carcasa en miniatura, donde uno de los líquidos es conductor y el otro es aislante. (Fig.18)

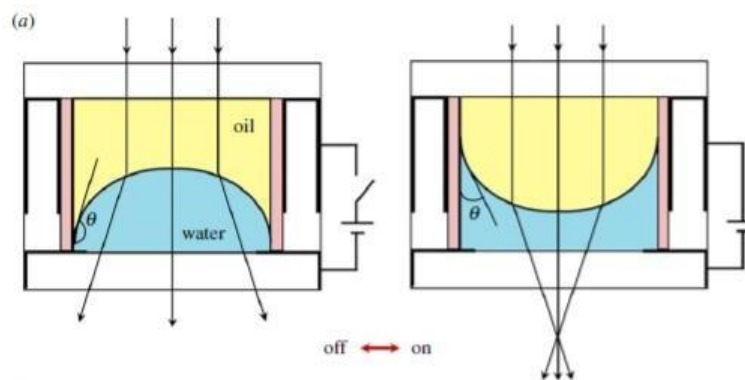


Fig.18: Lente modulada por electrowetting formada por 2 líquidos inmiscibles, donde en ausencia de voltaje el ángulo es $\theta > 90$, obteniendo una lente divergente, mientras que cuando se aplica voltaje el ángulo es $\theta < 90$, formando una lente convergente. (Ivanova N.,2020)

Este diseño por otra parte evita los problemas causados por la lente anterior ya que los dos líquidos que la forman están elegidos para presentar la misma densidad eliminando el problema relativo a la gravedad. Los electrodos se colocan en la pared de la carcasa por lo que tampoco van a interferir en la dirección de la luz.

La presencia de dos líquidos de distinto índice de refracción va a permitir operar tanto como lente convergente como divergente y el rango de enfoque que puede alcanzar permite tener unas características ópticas muy próximas a las del ojo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la interfase refractiva es una lente esférica y por lo tanto va a producir aberraciones, por lo que para tratar de eliminar este problema habría que trabajar en el diseño de una lente asférica. (Ivanova N.,2020)

La utilización de líquidos como base para elementos ópticos, supone una gran cantidad de ventajas como fluidez, flexibilidad y el hecho de que proporciona una superficie lisa.

Además. los líquidos son materiales baratos y fáciles de encontrar. Sin embargo, como contrapunto tenemos el alto voltaje que hay que utilizar en estos sistemas.

Esto se encuentra aún en periodo de experimentación ya que antes de que sea aplicable a los distintos sistemas hay que solucionar una serie de problemas como la evaporación de los líquidos que afecta a la estabilidad y al rendimiento de la lente, la alta sensibilidad del sistema al inclinarse que limita su aplicabilidad, así como los elevados tiempos de respuesta a los cambios de potencia.

3.3. El electrowetting en la actualidad

La aparición del electrowetting a principios del siglo XX, ha provocado que en las últimas décadas se haya utilizado en numerosas ocasiones. Esta tecnología, ha dado lugar a microfluidos digitales que han servido a muchas empresas para ser la base de numerosos productos que comercializan.

Estos productos se han desarrollado principalmente en dos ámbitos: *la óptica*, con las lentes y las pantallas reflectantes y la *biomedicina*.

Los primeros estudios y los resultados obtenidos atrajeron el interés de numerosas empresas, aunque el éxito no fue instantáneo necesitando más tiempo y posteriores avances para determinar que el electrowetting es una gran herramienta que merece un reconocimiento mayor. Sin embargo, mientras los microfluidos actualmente generan millones, y gozan de gran reconocimiento, las gotas y los microfluidos digitales son considerados relativamente nuevos (Fig.19)

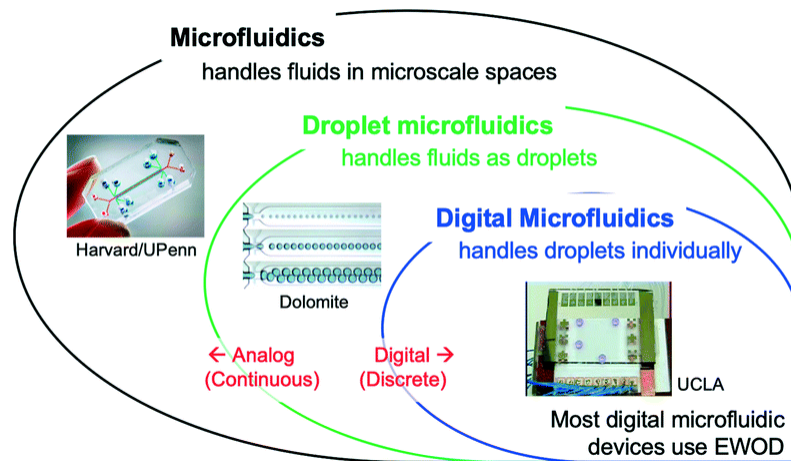


Fig. 19: comparativa de los ámbitos que engloban los microfluidos en comparación con las gotas y los microfluidos digitales (Li jia y Kim, 2020)

Conscientes de las posibilidades que ofrece el EWOD, las empresas comenzaron a interesarse sobre todo en el sector de la óptica y las aplicaciones biomédicas, mientras los investigadores continuaban explorando otras áreas de aplicación. Empresas como Varioptic, es pionera en este tipo de lentes y Liquavista realizó con éxito un prototipo de pantalla reflectante.

En el campo de la biomedicina, se han desarrollado instrumental para muestras de ADN, instrumentos de diagnóstico para ensayos moleculares durante los últimos años.

Los últimos éxitos atrajeron el interés de muchas empresas y las actividades comerciales definieron aún más las posibilidades de aplicación de esta tecnología. Sin embargo, aun hay problemas de confianza respecto a los dispositivos por electrowetting. Por esta razón aún queda esperar y perfeccionar la técnica para que los dispositivos que se fabriquen sean óptimos.

Estas lentes, tienen grandes ventajas respecto a las convencionales, como son su poco desgaste, el rápido accionamiento, la alta resistencia a impactos y el bajo consumo de energía. Empresas como Phillips y Varioptic, además de utilizar la tecnología EWOD para controlar la distancia focal, añadieron nuevas mejoras como por ejemplo inclinación variable y estabilización de la imagen. Además, observaron que añadiendo una capa resistente entre los dos aislantes se disminuía en gran cantidad las aberraciones.

Corning Varioptic

La empresa Corning Varioptic es actualmente la empresa que más ha desarrollado y comercializado las lentes para diferentes usos. Ha optado por esta técnica para desarrollar lentes que destina a la fabricación de instrumental como puede ser lectores de códigos de barras, aparatos oftalmológicos entre los que encontramos Biometros o dispositivos de baja visión...

Estas lentes presentan una serie de características que las hacen muy útiles, como son la velocidad, su robustez, lo que hace posible que resistan más a los golpes, tienen una gran capacidad de enfoque, ya que son capaces de ir desde el infinito hasta menos de 5 cm y además tienen un bajo consumo de energía.

Dentro de sus productos, podemos distinguir dos tipos de lentes líquidas: lentes de focal variable y módulos de enfoque automático. (Corning Technology Center, 2017)

- **Lentes de focal variable:** estas lentes permiten un enfoque variable cuando se diseñan en lentes de formación de imagen o haces y ofrecen un alto grado de variedad de diseños y de integración mecánica, eléctrica y óptica.

A-16F: es la lente más pequeña que fabrican y está destinada a instrumentos como cámaras compactas, lectores de códigos de barras, endoscopios...(Fig.21)

Tiene una apertura de 1.6mm y su capacidad de enfoque va desde (-5) a +15 dioptrías. Su transmisión es del 97%.

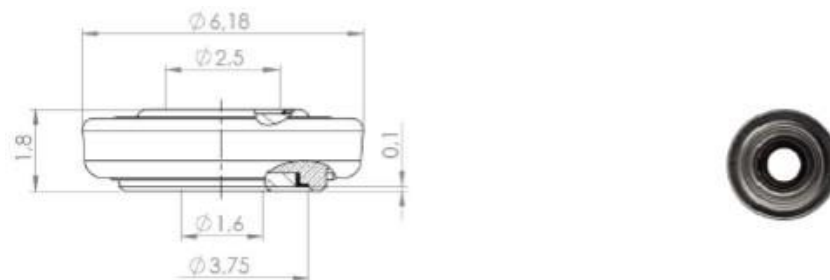


Fig.21: Estructura y dimensiones del modelo A-16F que fabrica Corning. (Corning Technology Center)

A-25H: es una lente destinada a sistemas ópticos más compactos como lectores de códigos de barras, cámaras industriales, imágenes médicas, biómetros... este tipo de lentes ofrece un amplio rango y un error frontal bajo ofreciendo un gran rendimiento. (Fig.22)

Tienen una apertura de 2.5mm y su poder refractivo va desde (-5) a +13 dioptrías.

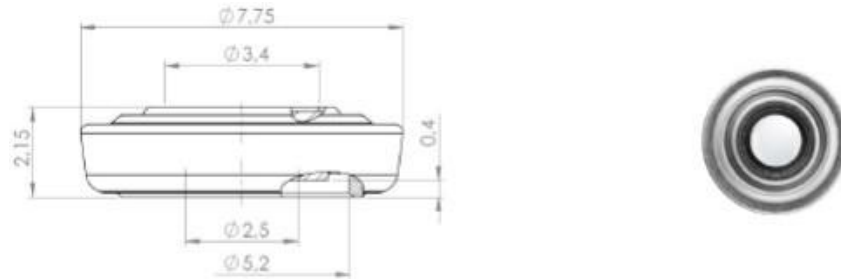


Fig.22: Estructura y dimensiones del modelo A-25H que fabrica Corning (Corning Technology Center)

A-39N: esta lente, está destinada para productos que necesitan una gran apertura como objetivos de distancia focal larga y aplicaciones para haces de láser. Su uso es perfecto para la industria de la visión, para cámaras de equipamientos médico, biómetros... (Fig.23)

Tiene una apertura, que va desde los 3.9mm a los 3.5mm dependiendo del ángulo del campo de visión. Su poder dióptrico va desde (-5) a +15 dioptrías.

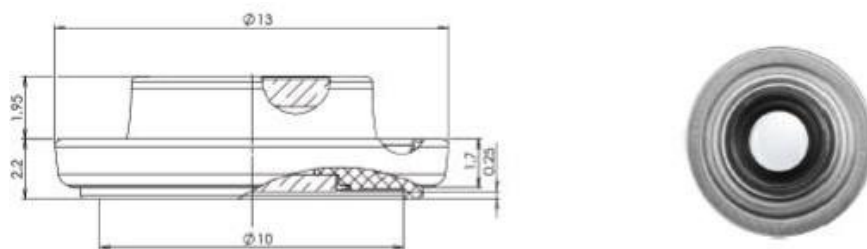


Fig.:23: Estructura y dimensiones del modelo A-39N que fabrica Corning.(Corning Technology Center)

- **Módulos autoenfocables:** se trata de un módulo con una lente fija y otra de enfoque variable que se van a integrar en un soporte. (Fig.24)



Fig. 24: Tipos de módulos autoenfocables que fabrica Corning (Corning Technology Center)

4. Conclusión

El electrowetting es una tecnología que proporciona numerosas propiedades a los productos que se aplica como son una gran velocidad, un gasto energético menor que con el uso de otras técnicas, y además permite reducir el tamaño de las lentes que se fabrican al no necesitar piezas grandes para ello.

Presenta un gran inconveniente por otro lado que es su limitación en cuanto al poder dióptrico que se puede conseguir, ya que para ángulos demasiado grandes se satura.

En el campo de las lentes líquidas cada vez hay más empresas que utilizan esta técnica. Sus utilidades en este sector son amplias debido a que permiten un tamaño pequeño lo que proporciona mayor versatilidad al producto. Aunque hay muchas empresas que comercializan productos que usan esta tecnología, sigue siendo novedosa frente a otros procedimientos más asentados en el mercado.

Se están haciendo estudios sobre aplicaciones novedosas de esta tecnología como es su uso para recrear el ojo humano, pero aún está en proceso de desarrollo ya que hay diversos problemas que solventar.

BIBLIOGRAFIA:

Berge B, Peseux J. Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting. *Eur Phys J E*. 2000;

Chen L, Bonaccorso E. Electrowetting - From statics to dynamics. Vol. 210, *Advances in Colloid and Interface Science*. Elsevier B.V.; 2014. p. 2–12.

Clement CE, Thio SK, Park SY. An optofluidic tunable Fresnel lens for spatial focal control based on electrowetting-on-dielectric (EWOD). *Sensors Actuators, B Chem*. 2017;

Corning Technology Center. Corning® Varioptic® Lenses. 2017;(November).

G. Beni and S. Hackwood, *Appl. Phys. Lett.* **38**, 207 (1981)

García-Sánchez P, Mugele F. Fundamentals of Electrowetting and Applications in Microsystems. In: *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*. 2011.

Hayes RA, Feenstra BJ. Video-speed electronic paper based on electrowetting. *Nature*. 2003;

Heikenfeld, J.; Zhou, K.; Kreit, E.; Raj, B.; Yang, S.; Sun, B.; Milarcik, A.; Schwartz, R. Electrofluidic displays using Young-Laplace transposition of brilliant pigment dispersions. *Nat. Photonics* 2009, 3, 292–296

Ivanova N. Biomimetic optics: Liquid-based optical elements imitating the eye functionality. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2020.

Jin M, Shen S, Yi Z, Zhou G, Shui L. Optofluid-based reflective displays. *Micromachines*. 2018;9(4):1–7.

Kim, D. Y., & Steckl, A. J. (2010). Electrowetting on paper for electronic paper display. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2(11), 3318–3323.

Krupenkin T, Yang S, Mach P. Tunable liquid microlens. *Appl Phys Lett*. 2003;

Kuiper S, Hendriks BHW. Variable-focus liquid lens for miniature cameras. *Appl Phys Lett*. 2004;

Lippmann G. Relations entre les phenomenes electriques et capillaires. *Ann. Chim. Phys.* 5, 494. 1875.

Li Jia, Kim C-J "CJ." Current commercialization status of electrowetting-on-dielectric (EWOD) digital microfluidics. *Lab Chip*. 2020;

Mishra K, van den Ende D, Mugele F. Recent developments in optofluidic lens technology. *Micromachines*. 2016.

Murade CU, Oh JM, van den Ende D, Mugele F. Electrowetting driven optical switch and tunable aperture. *Opt Express*. 2011;19(16):15525.

Oh JM, Manukyan G, Ende D Van Den, Mugele F. Electric-field-driven instabilities on superhydrophobic surfaces. *EPL*. 2011;

Sim JH, Kim J, Kim C, Shin D, Lee J, Koo G, et al. Novel biconvex structure electrowetting liquid lenticular lens for 2D/3D convertible display. *Sci Rep [Internet]*. 2018;8(1):2–11. 4

Smith NR, Abeysinghe DC, Haus JW, Heikenfeld J. Agile wide-angle beam steering with electrowetting microprisms. *Opt Express*. 2006;

Strauch M, Somers PAAM, Bociort F, Urbach HP. Creation of aspheric interfaces on an electrowetting liquid lens using surface oscillations. *AIP Adv*. 2018;

Torres JP. Tensión superficial. *División de Ciencias Naturales y Exactas de la unam*. 2007.

Van Grinsven KL, Ashtiani AO, Jiang H. Fabrication and actuation of an electrowetting droplet array on a flexible substrate. *Micromachines*. 2017

Van Grinsven KL, Ashtiani AO, Jiang H. Flexible electrowetting-on-dielectric microlens array sheet. *Micromachines*. 2019;10(7):1–13.

Zhang W, Li D, Guo X. Optical design and optimization of a micro zoom system with liquid lenses. *J Opt Soc Korea*. 2013;

Trabajo de fin de grado realizado dentro del programa Sicue en la Universidad de Sevilla

