



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## Práctica: Introducción a los materiales nemáticos: el cristal líquido

<b>Apellidos, nombre</b>	Bachiller Martín, Carmen (mabacmar@dcom.upv.es)
<b>Departamento</b>	Departamento de Comunicaciones
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación



## 1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presenta una introducción práctica a los materiales nemáticos, en concreto el cristal líquido, su estructura molecular, sus principales propiedades y cómo desarrollar estructuras para poder utilizarlo. El artículo está estructurado como sigue:

Contenidos de este artículo
1. Introducción.
2. Objetivos.
3. Introducción Teórica.
4. Trabajo del alumno.
5. Cierre.

Tabla 1. Contenidos del artículo.

## 2 Introducción

Los cristales líquidos (CL) nemáticos son una clase de materiales conocidos por sus propiedades anisotrópicas, que los hacen altamente sensibles a los campos eléctricos o magnéticos externos. Esta sensibilidad es crucial porque permite que los cristales líquidos alteren sus propiedades electromagnéticas (u ópticas, entendiendo la luz como una radiación electromagnética más), como la permitividad (constante dieléctrica) y la tangente de pérdida (disipación de energía), en función de la orientación de las moléculas. En los cristales líquidos nemáticos, las moléculas pueden alinearse en una configuración paralela (longitudinal) o perpendicular (transversal) cuando se someten a un campo externo.

El concepto de cristal líquido se descubrió durante el siglo XIX, pero no fue hasta el siglo XX que no se comenzó con su aplicación en dispositivos tecnológicos [1]. La capacidad de estos cristales para cambiar su orientación (y por tanto sus características ópticas) a través de campos eléctricos se empezó a explotar en el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos, destacando especialmente en la fabricación de pantallas LCD [2].

De la misma forma, el distinto alineamiento de las moléculas de CL conduce a diferentes comportamientos electromagnéticos, lo que las hace muy adecuadas para dispositivos electromagnéticos reconfigurables.

En aplicaciones electromagnéticas de alta frecuencia, estas propiedades son particularmente valiosas para alterar dinámicamente las respuestas de los dispositivos. Por ejemplo, un dispositivo basado en cristal líquido podría cambiar su impedancia, resonancia o patrón de radiación simplemente aplicando un voltaje de control, lo que lo hace adaptable a diversas condiciones operativas.

## 3 Objetivos

El objetivo es que el alumno conozca las propiedades y aplicaciones de los materiales nemáticos. Asimismo, se pretende un primer acercamiento a la preparación de dispositivos que contengan dichos materiales.

## 4 Desarrollo

El trabajo tiene dos partes, la primera se corresponde con una introducción teórica a los cristales líquidos. Esta viene dada por el profesor y apoyada con diferente material. La segunda parte corresponde al trabajo que el alumno debe realizar y comprende una serie de actividades que



debe resolver. Al término de la práctica, el estudiante debe tener un conocimiento más claro sobre el cristal líquido, sus capacidades, aplicaciones y uso.

## 4.1 Introducción Teórica

### 4.1.1 El cristal líquido.

El cristal líquido es un material líquido anisotrópico que presenta un estado de materia intermedio entre sólidos cristalinos y líquidos isotrópicos, llamado mesofase. En este estado, las mezclas de CL diseñadas para el sector de las telecomunicaciones presentan una serie de propiedades de movilidad molecular. Estas propiedades, junto con su anisotropía dieléctrica, permiten ajustar su permitividad dieléctrica dentro de un rango de valores continuos, mediante el uso de una señal de polarización eléctrica o magnética. La razón de estas propiedades se debe a la construcción interna de las moléculas de CL, en particular a su gran forma asimétrica [3]. Estas moléculas orgánicas presentan asimetría entre sus dos ejes principales, teniendo forma de varilla (CL calamítico) o de disco (CL discótico), como se muestra en la Imagen 1.

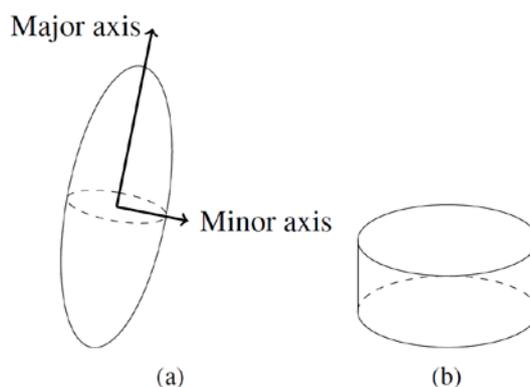


Imagen 1. Moléculas de los dos tipos principales de LC utilizadas en aplicaciones de telecomunicaciones. (a) CL calamítico. (b) CL discótico.

En este apartado se presentan las propiedades fundamentales del CL en forma de varilla o calamítico, ya que son las más utilizadas en aplicaciones de telecomunicaciones.

Como se mencionó anteriormente, las características del estado de mesofase proporcionan múltiples propiedades para implementar dispositivos ópticos o de microondas reconfigurables, ya que este estado tiene ciertas características de los estados sólido y líquido. Por un lado, en el estado sólido cristalino, las moléculas presentan grandes fuerzas intermoleculares que las mantienen unidas en una posición bien definida (orden posicional) y tienen tendencia a mantener una orientación (orden orientacional). Por otro lado, cuando la temperatura aumenta, la materia se transforma en un estado líquido, donde las moléculas pueden moverse libremente, por lo que no presentan orden posicional ni de orientación.

El CL presenta, dentro de un cierto rango de temperatura, un estado intermedio en el que las moléculas todavía tienen orden de orientación, pero no de posición. Gracias a la asimetría de las moléculas, la materia presenta fuerzas intermoleculares no homogéneas en todas las direcciones del espacio. Esto permite que las moléculas se muevan libremente en ciertas dimensiones como un líquido, pero evita su rotación en ciertos ejes, ya que las moléculas se acuestan unas sobre otras, limitando el movimiento y provocando una orientación en una dirección específica como en el estado sólido cristalino.



Dado que las propiedades de este tipo de material se deben principalmente a las características de sus moléculas, es interesante conocer sus partes y su implicación en las diferentes propiedades. Las moléculas de un CL de tipo calamítico están formadas por tres partes bien diferenciadas (ver Imagen 2), lo que permite obtener los órdenes orientacional y posicional, a la vez que posibilita la orientación con un campo electromagnético.

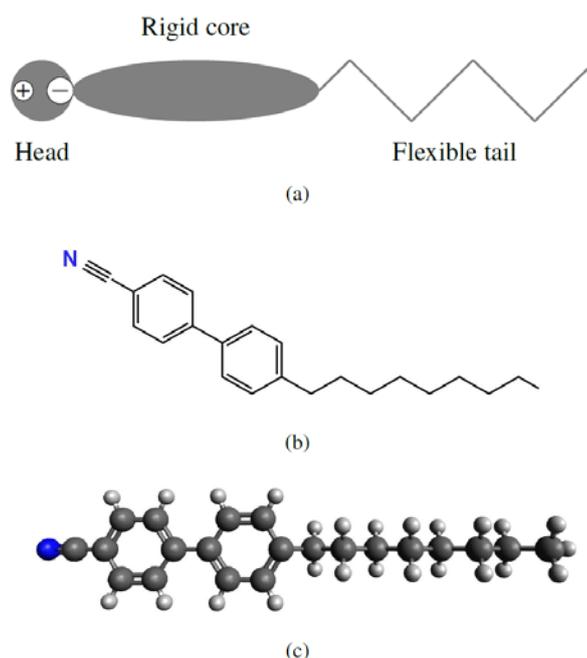


Imagen 2. Molécula de CL calamítico. a) Esquema de las tres partes de la molécula. b) Formulación esquemática. (c) Representación 3D de la molécula.

- **Cabeza:** la molécula tiene un dipolo permanente en su parte superior. Esto permite la inducción de una fuerza electrostática que puede rotar las moléculas de una masa de CL en la dirección de este campo. En resumen, este cabezal da la capacidad de controlar la dirección de apuntamiento de las moléculas de un volumen de CL mediante la aplicación de un campo eléctrico o magnético.
- **Núcleo:** la cabeza está unida a un núcleo rígido de forma cilíndrica, lo que proporciona un alto orden de orientación. Las moléculas, minimizando la energía total de la materia, tienden a apilarse en paralelo, aunque pueden rotar y moverse a lo largo de la dirección de su eje largo.
- **Cola:** la molécula tiene una cola flexible que disminuye las fuerzas intermoleculares en ciertas direcciones, aumentando así la libertad de moverse en diferentes direcciones. Esto proporciona un orden posicional bajo a la materia. Sin esta parte, la materia simplemente se transformaría de sólido cristalino a líquido isotrópico sin el estado de mesofase.

En conclusión, las partes rígidas favorecen tanto el orden de orientación como el posicional, mientras que las partes flexibles no. Con partes rígidas y flexibles equilibradas, la molécula exhibe fases de CL.



La Imagen 2 muestra una molécula típica de CL calamítico: las tres partes de la molécula, la formulación química y una representación gráfica de la molécula de CL 4-Octil-4-bifenil-carbonitrilo o  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{C}_6\text{H}_4\text{C}_6\text{H}_4\text{CN}$ . El bifenilo es el núcleo rígido y la cadena de hidrocarburos es la cola flexible.

Cada parte de la molécula es esencial para alcanzar el estado de mesofase. Por un lado, un núcleo asimétrico alto resultaría en un aumento significativo en el orden posicional (restringiendo la orientación de la molécula), y un núcleo simétrico alto resultaría en una disminución en el orden orientacional. Por otro lado, una cola demasiado flexible disminuye el orden de orientación, pero una rígida aumenta el orden posicional.

El mismo CL presenta diferentes distribuciones de fuerzas intermoleculares en función de la temperatura. Estos estados se consideran subfases dentro de la mesofase. En el caso concreto de los CL calamíticos existen dos fases: esmética y nemática. La fase esmética aparece a una temperatura más baja que la nemática y, las partículas están orientadas por dominios o zonas. La fase nemática es la fase LC común y más simple. En este caso, a escala macroscópica, los ejes largos de todas las moléculas están orientados en una dirección, designada por un vector llamado director  $\vec{n}$ .

En la práctica, se utilizan CL nemáticos, ya que es posible controlar la orientación del conjunto total de sus moléculas. Sin embargo, tanto la mesofase como su subfase nemática están limitadas en temperatura, de ahí que una característica importante a tener en cuenta en la elección de un CL sea precisamente su rango de temperatura en la fase nemática.

#### 4.1.2 Polarización y anisotropía dieléctrica

La forma de las moléculas del CL no solo les permite tener un estado de mesofase, sino también tener diferentes valores de permitividad en función de su orientación. Esta anisotropía del material se puede explicar de una manera muy gráfica en cuanto a la distribución de cargas que se inducen en las moléculas CL bajo la presencia de un campo eléctrico, ya que el mecanismo de polarización dieléctrica que predomina en las frecuencias de microondas es la polarización por alineamiento de dipolos.

Como se ilustra en la Imagen 3, la aplicación de un campo eléctrico a dos moléculas LC orientadas perpendicularmente, provocaría el movimiento de las cargas libres de su núcleo. Este movimiento excitará un momento dipolar en oposición al campo que ha creado las cargas.

En un volumen LC, como se muestra en la Imagen 4, la interacción de la suma de cada momento dipolar con el campo electromagnético que los ha creado se modela en las ecuaciones de Maxwell como permitividad dieléctrica. Como se puede ver en la Imagen 3, estos momentos dipolares son claramente diferentes en las dos orientaciones de la molécula. El momento dipolar excitado en una molécula orientada paralelamente al campo eléctrico es mayor que el excitado en una molécula orientada perpendicular al campo eléctrico [4]. Esta diferencia en los momentos dipolares (orientación relativa entre la molécula y el campo eléctrico) se traduce en diferentes valores de permitividad dieléctrica y, por tanto, en la anisotropía dieléctrica.

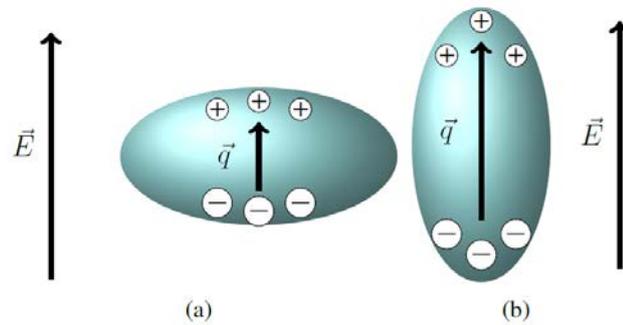


Imagen 3. Distribución de cargas inducidas en una molécula LC por la presencia de un campo eléctrico en su eje principal. a) Eje menor. b) Eje mayor.

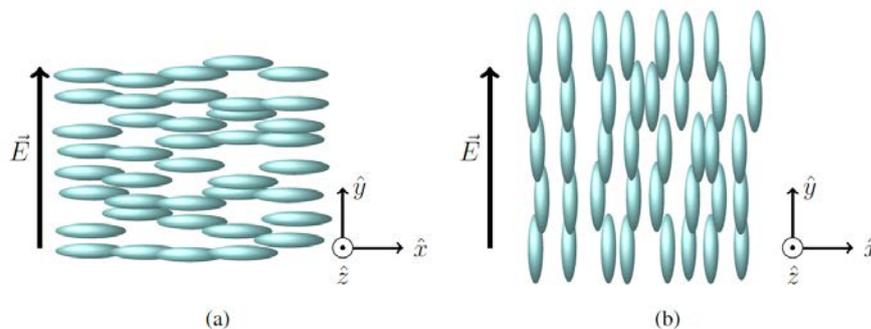


Imagen 4. Masa de LC en sus dos estados extremos de polarización o permitividad dieléctrica. (a) Permitividad dieléctrica perpendicular ( $\epsilon_{r\perp}$ ). b) Permitividad dieléctrica paralela ( $\epsilon_{r\parallel}$ ).

Dado que la permitividad de un material LC depende de la orientación de sus moléculas con respecto al campo eléctrico, se pueden definir dos valores extremos de permitividad.

Por un lado, la propagación de una onda cuyo campo eléctrico  $\vec{E}$  es ortogonal al director  $\vec{n}$  (ver Imagen 4 (a)) dará como resultado la permitividad extrema más baja. Esta es la permitividad dieléctrica ortogonal relativa,  $\epsilon_{r\perp}$ .

Por otro lado, una onda con una polarización del campo eléctrico  $\vec{E}$  paralelo al director  $\vec{n}$  (ver Imagen 4(b)) dará como resultado un valor de permitividad más alto. Esta es la permitividad dieléctrica paralela relativa,  $\epsilon_{r\parallel}$ .

Cualquier cambio en la dirección de propagación o polarización del campo dará lugar a un valor intermedio relativo entre los dos extremos. Con estos parámetros, la anisotropía dieléctrica del material se define en (1) como la variación máxima de la permitividad dieléctrica.

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{r\parallel} - \epsilon_{r\perp} \quad (1)$$

Esta propiedad, junto con los órdenes posicionales y orientativos de las moléculas del CL en mesofase, proporciona un material con permitividad sintonizable.

### 4.1.3 Métodos de alineamiento

Como se mencionó anteriormente, la permitividad dieléctrica depende del ángulo entre el director  $\vec{n}$  y el campo eléctrico  $\vec{E}$ . Por esa razón, es necesario tener un mecanismo para controlar la dirección de  $\vec{n}$ , es decir, las moléculas de CL deben estar

correctamente orientadas para obtener un material dieléctrico sintonizable. Para ilustrar los métodos para alinear las moléculas de LC para lograr diferentes estados, se utiliza una célula de CL formada por dos placas paralelas [5]. El esquema se muestra en la Imagen 5.

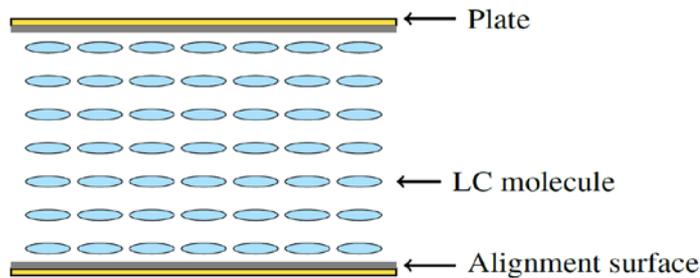


Imagen 5. Esquema de una célula de cristal líquido.

Existen dos métodos de Alineamiento:

- **Alineamiento por anclaje de superficie.** El anclaje superficial consiste en un conjunto de surcos microscópicos realizados en las paredes interiores del contenedor de un volumen de CL. Si estos surcos tienen el tamaño, la distribución y la dirección óptimos, las moléculas de CL tenderán a apilarse en estos surcos para disminuir su energía libre, induciendo una fuerza de anclaje que permite una orientación uniforme en todo el volumen de CL.

Existen dos tipos de alineamiento por anclaje superficial, ya sea paralelo (alineamiento homogéneo) u ortogonal (alineamiento homeotrópico) a la superficie. La elección depende de los requisitos. En el ámbito de esta práctica, se utilizará el primero.

Para la construcción de esta capa de alineamiento, estos surcos se pueden realizar directamente sobre la superficie del material de soporte (vidrio, plástico, cobre...) frotando con algún tejido como el algodón. Sin embargo, esto genera una fuerza de anclaje demasiado débil ( $10^{-5}$  J/m<sup>2</sup>) para el volumen manejado [3]. Por lo tanto, el material generalmente se recubre de una fina capa de polímero, normalmente poliimida [6] y luego, la superficie de anclaje se crea sobre la poliimida frotando con terciopelo. Este material no solo es más resistente que el material de fondo, sino que el roce con terciopelo crea microsurcos muy efectivos y las cadenas de polímero se alinean aumentando la fuerza de anclaje en dos órdenes de magnitud [3]. El grosor de la capa de poliimida es muy importante, ya que una capa gruesa afectará la señal de RF y una delgada dará como resultado una fuerza de anclaje baja.

- **Alineamiento por campos electromagnéticos.** Esta técnica consiste en aplicar un campo eléctrico de muy baja frecuencia o un campo magnético estático para orientar las moléculas de CL. Estos campos deben ser lo suficientemente altos como para inducir fuerzas en el momento dipolar permanente de las moléculas para orientarlas. La amplitud del campo eléctrico necesaria para el alineamiento de un pequeño volumen de CL sería de alrededor de 30 kV/m [7]. El campo magnético rara vez se usa para dispositivos de CL, debido a la necesidad de imanes pesados y voluminosos.

Estas técnicas solo permiten orientar el CL en una única dirección, y no en un conjunto continuo de direcciones, para obtener una reconfiguración. Por esta razón, se suele emplear una combinación de ambos métodos. La Imagen 6 muestra una célula típica de CL formada por una capa de CL nemático, las moléculas se representan como

elipses y están confinadas entre dos placas paralelas conductoras separadas por una altura  $h$ . Teniendo en cuenta que las placas conductoras están perfectamente cubiertas con poliimida tratada, se puede suponer que el director  $\vec{n}$  se orienta en la dirección de las ranuras.

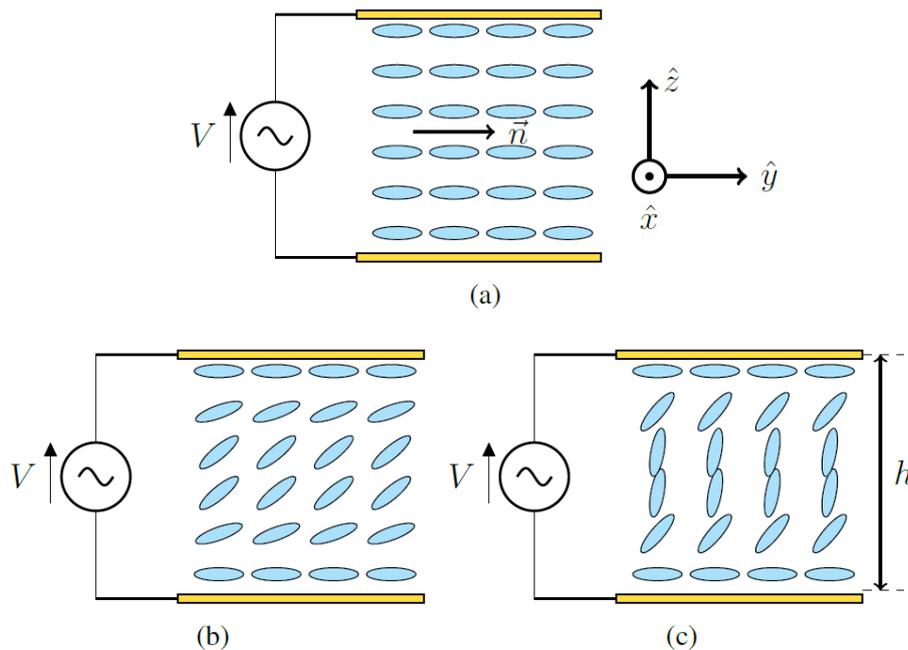


Imagen 6. Proceso del cambio en el alineamiento de las moléculas del CL utilizando un campo EM de polarización.

Al aplicar un campo eléctrico estático o de baja frecuencia a los planos conductores de la celda de la Imagen 6 (a), se induce una fuerza en las moléculas para rotarlas en la dirección del campo. Esta fuerza encuentra la resistencia de las interacciones intermoleculares dipolo-dipolo, que es fuerte. En otras palabras, el campo eléctrico local en una molécula es la suma del campo eléctrico aplicado externamente y el campo eléctrico producido por los momentos dipolares de otras moléculas [3]. Si el campo aplicado no es lo suficientemente alto, las moléculas mantendrán su posición inicial determinada por la fuerza de anclaje de la capa de alineamiento. El voltaje umbral se conoce como el voltaje umbral de Fréedericksz, y sigue la ecuación (2):

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon_{r1kHz}}} \quad (2)$$

donde  $K_{11}$  es la constante elástica de Frank [8] llamada *splay elastic constant* y depende de cada mezcla de CL,  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío y  $\Delta \epsilon_{r1kHz}$  es la anisotropía del CL a la frecuencia de 1kHz<sup>1</sup>.

Cuando el voltaje aplicado está por encima del umbral, las moléculas comienzan a girar en la dirección del voltaje aplicado hasta que la energía es mínima. Cuando se aumenta el voltaje de polarización aplicado, domina el alineamiento por el campo externo y el ángulo entre el director  $\vec{n}$  y el voltaje de polarización disminuye, alcanzando un estado de saturación (las moléculas son paralelas al campo eléctrico).

<sup>1</sup> Esta anisotropía no será la misma que el CL presente a la frecuencia de RF o a frecuencias ópticas, de hecho, tanto la  $\epsilon_{r\perp}$  como la  $\epsilon_{r\parallel}$  de un CL son diferentes en cada banda frecuencial y, por tanto, también su anisotropía dieléctrica.



Hay que tener en cuenta que la fuerza de anclaje que se opone al campo eléctrico no se distribuye uniformemente por toda la célula. Sin embargo, esta fuerza es más intensa cuanto más cerca están las moléculas de las capas de alineamiento. Esto hace que la orientación de las moléculas de la CL no sea homogénea en toda la altura de la célula, como se muestra en la Imagen 6 (b).

Con este mecanismo, una señal de RF con el campo eléctrico en la dirección  $\vec{n}$  encontrará, en ausencia de voltaje de polarización, el valor de permitividad más bajo, es decir, la permitividad ortogonal  $\epsilon_{r\perp}$  (Imagen 6 (a)). Cuando el voltaje de polarización aumenta (Imagen (b)), la onda de RF encontrará la permitividad más alta, alcanzando su valor máximo, permitividad paralela  $\epsilon_{r\parallel}$  (Imagen 6 (c)) cuando se alcance un voltaje de saturación. Esta función se puede utilizar para diseñar dispositivos con una respuesta reconfigurable.

#### 4.1.4 Referencias bibliográficas

- [1] S. W. Singer, Liquid Crystal Display Manufacturing: Processes and Materials, Nueva York, 2018.
- [2] L. Display, «Innovative Alignment Techniques for High-Resolution LCDs» LG Display Press Releases, 2020.
- [3] D. Yang and S.Wu, Fundamentals of Liquid Crystal Devices. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [4] C. V. Brown, Handbook of Visual Display Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, ch. Physical Properties of Nematic Liquid Crystals.
- [5] Y. W. y. K. Y. M. Kimura, «Alignment Technologies for Liquid Crystal Displays» Journal of the Society for Information Display, vol. 28, nº 3, pp. 201-213, 2020.
- [6] J. L. y. H. Yoshida, «Advanced Polymer Alignment Layers for Liquid Crystal Displays» Handbook of Liquid Crystals, vol. 3, nº 2, pp. 150-175, 2019.
- [7] C. C. Vela, "Diseño y fabricación de dispositivos basados en cristal líquido polimérico," Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2012.
- [8] R. G. Priest, "Theory of the Frank elastic constants of nematic liquid crystals," Phys. Rev. A, vol. 7, pp. 720-729, Feb 1973.

## 4.2 Trabajo del alumno

El alumno deberá proceder a la investigación sobre las aplicaciones, proveedores y retos tecnológicos del cristal líquido y preparar un breve informe.

El texto no debe ser inferior a los 1500 caracteres (sin espacios) ni superior a los 3000. El texto debe ser original y autocontenido. Las referencias bibliográficas deben seguir la norma IEEE.

## 5 Cierre

En este artículo se han dado a conocer los materiales nemáticos, en concreto los cristales líquidos, sus características y aplicaciones.