

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE FISICA



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**

TESIS

Confirmación de la biaxialidad para una mezcla de cristales
líquidos nemáticos en presencia de colorantes

Sometida para obtener el título de:
Licenciada en Física

Presenta:

Reyna Cornelio de Jesús

Directora:

Dra. Paola Ma. Mercedes Castro Garay

Hermosillo, Sonora
29 Abril, 2021

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Dedicatoria

*En diversas ocasiones he perdido el rumbo del camino que me he trazado, sin embargo, de alguna u otra manera te encuentras a mi lado. Recordándome que aunque el camino sea difícil o pierda la confianza en mí, estarás a mi lado para apoyarme, porque no hay tormenta que me pueda derribar.
Para tí con todo mi cariño.*

AGRADECIMIENTOS

*"Puedes hacer todo, incluso si te pierdes
 si sigues creyendo definitivamente se hará realidad
 Encuentra tu 'cualquiera', No hay forma de hacerlo...
 Cuanto más te pierdes, más caminos tienes
 entonces, ya sea para recordar u olvidar el camino...
 Puedes hacer todo, incluso si te pierdes
 Si sigues creyendo que definitivamente se hará realidad..."*
 Takahiro Morita, **Everything**

De una manera especial, agradezco a cada una de las personas que estuvieron a lo largo de mi estancia en la carrera. Dándome apoyo tanto académicamente como emocionalmente. De cada uno me llevo la experiencia que me dejaron.

A todos mis maestros, por todos los conocimientos brindados así como la calidez y la dedicación hacia su trabajo.

De igual manera agradezco a la **Mtra. María del Rocío Gómez Colín** por fungir como mi guía y apoyo en mi formación académica, además de depositar su confianza en mí a lo largo de estos años. Gracias por ser una gran maestra.

Agradezco el apoyo brindado por la **Dra. Paola Ma. Mercedes Castro Garay** por su disposición de tiempo en la realización de esta tesis, de igual manera agradezco su amistad.

Gracias a la institución que me brindó grandes oportunidades a lo largo de la carrera. De igual manera agradezco al comité de tesis. Así también a los encargados de los laboratorios de Polímeros así como al laboratorio de Termodinámica.

Agradezco al **Dr. Rodrigo Arturo Rosas Burgos** por el apoyo económico otorgado por medio de **CONACYT** mediante el proyecto de Cristales Fotónicos y Fonónicos no lineales con el número CB2015-258366-F.

Resumen

En el presente trabajo se ha realizado la caracterización óptica de una muestra compuesta de dos cristales líquidos nemáticos: uno de ellos con apariencia líquida y con propiedades ópticas uniaxiales; el otro posee propiedades ópticas biaxiales con apariencia en polvo. La mezcla de ambos cristales ha adquirido propiedades de biaxialidad al momento de haber sido dopada con colorante láser DCM(4-(Dicianometileno)-2-metil-6-(4-dimetilaminoestiril)-4H-pirano). El uso del colorante láser en CL es importante en los dispositivos ópticos, tales como pantallas de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés), y esto implicaría reducir el costo de operación y el tamaño de los dispositivos basados en esta tecnología. De igual manera, se realiza la caracterización electro-óptica de dicha muestra; la cual tiene aplicación mas común en la industria de las pantallas LCD, a pesar de que su uso presenta algunas dificultades. Una de ellas tiene que ver con la radiación del cristal líquido en la pantalla, la cual no es uniforme en todos los ángulos de visión a través del observador debido a que no se abarcan todos los ángulos. Otra dificultad que se presenta dentro de dichos materiales es la lenta respuesta, la cual disminuye la calidad de la imagen en movimiento. Es por ello, que en esta tesis se propone el uso de CL biaxiales, debido a que tienen una velocidad de respuesta 100 veces mayor en comparación con los CL ordinarios.

Se determinó de forma experimental la biaxialidad de las muestras, así como la anisotropía óptica.

Palabras clave: Cristal líquido, nemático, biaxial, mesofases.

Índice general

1. Introducción	7
2. Tipos de cristales	11
2.1. Cristales líquidos liotrópicos	12
2.2. Cristales líquidos poliméricos	12
2.3. Cristales líquidos termotrópicos	12
2.3.1. Cristales líquidos nemáticos	13
3. Características físicas	15
3.1. Eje director	15
3.2. Anisotropía óptica	16
3.2.1. Birrefringencia en cristales líquidos	17
3.3. Parámetro de orden	19
4. Uniaxialidad y biaxialidad	21
4.1. Polarización	22
5. Efecto de colorantes en nemáticos	27
6. Propiedades dieléctricas de los cristales líquidos	29
6.1. Campo eléctrico de baja frecuencia	30
7. Desarrollo experimental	33
7.1. Síntesis del cristal líquido nemático	33
7.2. Construcción de una celda de cristal líquido	33
8. Resultados	37
9. Conclusiones	41

Capítulo 1

Introducción

Antecedentes

Durante años nos enseñaron que solo existen tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Sin embargo, eso no es del todo correcto. Algunos materiales orgánicos no muestran una transición cuando pasan de sólido a líquido o viceversa, sino más bien pasan por una serie de transiciones que implican nuevas fases. En estas nuevas fases la estructura molecular posee varias propiedades físicas tanto de sólidos, debido a que muestra comportamiento anisotrópico dentro de las propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas, y la propiedad en los líquidos por ejemplo, la fluidez, por esta razón se le llama cristales líquidos (CL).

Desde su descubrimiento, los CL han representado un papel importante en la comprensión científica, ya que nos lleva a romper con la visión clásica de los estados de la materia.

Las moléculas de un cristal líquido presentan un orden direccional y tienen propiedades anisotrópicas que cambian bajo la influencia de campos externos que pueden ser eléctricos o magnéticos.

Los CL debido a sus propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas, han sido de interés fundamental y tecnológico; las investigaciones sobre sus propiedades dieléctricas proporcionan una herramienta poderosa para comprender la relación estructura-propiedad, que es esencial no solo para avanzar en el aspecto tecnológico, sino también para comprender la ciencia básica.

Algunas de las aplicaciones de los CL han ayudado al desarrollo de diversas tecnologías, tales como, ventanas inteligentes, fibras poliméricas, pantallas, etc., lo cual ha permitido tener un gran avance tecnológico en la industria. Una de las aplicaciones se encuentra en las pantallas de CL (Liquid Crystal Displays, LCDs) que se han utilizado en dispositivos que van desde los teléfonos celulares hasta las TVs. Debido a las propiedades ópticas que poseen los CL, se puede manipular el estado de polarización de la luz incidente para obtener la respuesta esperada.

Debido a las diversas aplicaciones, las pantallas LCDs requieren de una mi-

nuciosa caracterización, ya que se encuentran en la mayoría de los componentes electrónicos. Otra de las aplicaciones se puede observar en los moduladores espaciales de luz (SLM), sensores de temperatura y algunos láseres de CL[1].

De igual manera los CL poseen diversas fases que interactúan con la luz visible, entre ellas la fase nemática; en esta fase las moléculas sólo tienen orden de orientación, pero no de posición.

Debido a que algunos CL poseen la propiedad de birrefringencia, se puede manipular la luz de incidencia, así como la amplitud y la fase de dicho material.

Una de las aplicaciones más comunes en la industria se encuentra en las pantallas LCD, a pesar de que su uso presenta algunas dificultades. Una de ellas tiene que ver con la radiación del cristal líquido en la pantalla, la cual no es uniforme en todos los ángulos de visión a través del observador debido a que no se abarcan todos los ángulos. Otra dificultad que se presenta dentro de dichos materiales es la lenta respuesta, la cual disminuye la calidad de la imagen en movimiento. Es por ello que en esta tesis se propone el uso de CL biaxiales, porque tienen una velocidad de respuesta 100 veces mayor en comparación con los CL ordinarios.

El objetivo de este trabajo es caracterizar un cristal líquido nemático con diferentes tipos de dopantes, con los cuales se busca mejorar las propiedades ópticas y eléctricas del material y evaluar cuál es más eficiente al momento de aplicarle un campo eléctrico o magnético.

En el capítulo 2, se realiza una introducción a los conceptos involucrados en los CL y así tener una idea de que mesofase es más conveniente utilizar dependiendo de las propiedades que poseen, para así poder tener la aplicación que se les debe de dar.

En el capítulo 3, se analizarán las características físicas de un cristal líquido, las cuales son importantes conocer, debido a que nos serán de utilidad al momento de revisar las muestras y obtener los resultados.

En el capítulo 4, se abordarán los conceptos que involucran la uniaxialidad y biaxialidad, enfocándonos más en esta última debido a que es parte importante para deducir si nuestra muestra cuenta con esta propiedad.

En el capítulo 5, se presentan los antecedentes de los colorantes láser, así como los efectos que pueden llegar a presentarse al momento de mezclarse con un nemático.

En el capítulo 6, se estudian las características dieléctricas de los CL.

En el capítulo 7, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para elaborar las celdas que se utilizaron en este trabajo, de igual manera se presenta el arreglo que se utilizó para poder caracterizar las propiedades.

En el capítulo 8 se muestran los resultados obtenidos con las diferentes mezclas de un cristal líquido nemático dopado con (4-(dicianometileno)-2-metil-6-(4-dimetilaminoestiril)-4H-pirano) (DCM).

En el capítulo 9 se presentan las conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Tipos de cristales

En este capítulo se muestran los antecedentes de los diferentes tipos de CL y se describe como están conformados, para describir en que consisten, para posteriormente mostrar las características físicas que posee cada tipo de cristal así como su clasificación de acuerdo a su estado.

Las primeras observaciones sobre los CL, fueron realizadas por Reinitzer y Lehmann en 1888[2]. Lehmann observó esta fase intermedia en otras sustancias y fue el primero que le dio el nombre de *fliebende Kristalle*[3], el cual más adelante sería conocido como cristal líquido.

Los CL poseen varias características en común: su estructura molecular está representada por largas cadenas de moléculas orgánicas en forma de bastoncillos, son rígidas a lo largo de su eje y se polarizan fácilmente.

Este tipo de materiales, bajo ciertas condiciones presentan, fases intermedias en las que fluyen como líquidos, pero de igual manera, poseen propiedades de sólidos cristalinos; dentro de estas transiciones se encuentran fases intermedias conocidas como mesofases. El incremento de la temperatura es un factor importante en el comportamiento de los CL, alterando las propiedades físicas de dichos materiales.

Dentro de estas mesofases se puede observar el parecido que tienen con los sólidos, tal como el orden orientacional de las moléculas, ya sea bajo la acción de un campo magnético o eléctrico, o en el caso de un líquido, la libertad de moverse a través del medio donde se encuentre. Este tipo de cambios en las fases ocurren al momento de agregarle o quitarle energía, lo cual provoca cambios en el orden molecular.

Existen diversas maneras de clasificar a los CL, sin embargo, la más utilizada es la que se basa en las mesofases, las cuales son estados de equilibrio donde se puede medir la energía libre de Gibbs o la transición de Fredericks.

Una de las clasificaciones de los CL, está relacionada con los parámetros físicos de acuerdo a sus fases líquido-cristalinas [4]; estas mesofases están compuestas de mesógenos que pueden ser orgánicos. Se tienen tres tipos distintos

de cristales: liotrópicos, poliméricos, y termotrópicos. De igual manera existen inorgánicos (óxidos metálicos formados en la fase liótropica).

Estos se encuentran en función de la temperatura, o dependiendo de los constituyentes o la concentración. Los CL existen en las denominadas mesofases nemáticas, colestéricas, esmétricas y ferroeléctricas. [4, 5]

2.1. Cristales líquidos liotrópicos

Este tipo de cristales se obtienen a partir de la concentración de un material disuelto en algún solvente orgánico. Es importante destacar que las moléculas que intervienen en la mezcla son de tipo anfífilico, es decir, parte de las moléculas poseen un parte hidrofílica que interacciona con el agua, mientras que la otra parte es hidrofóbica. Ejemplos de donde se pueden encontrar son los jabones, detergentes y líquidos.

Las mesofases que ocurren en este tipo de cristales dependen de la concentración y de la temperatura. De igual forma, su estructura molecular puede ser hexagonal, cúbica o laminar. Sin embargo, las formas de sus micelas pueden ser esféricas o cilíndricas. Este tipo de cristales son más estudiados en la rama de la biología.

2.2. Cristales líquidos poliméricos

Los CL poliméricos son materiales que incorporan grupos mesógenos en las cadenas poliméricas que poseen una estructura única de moléculas largas en forma de varilla. Este material tiene un alto rendimiento respecto a sus propiedades químicas, mecánicas, térmicas y eléctricas.

Una de las propiedades de este cristal líquido tiene que ver con el poco entrelazamiento que existe entre las moléculas. Al momento de aplicarle una fuerza de cizalladura las orienta en una dirección. Existen tres tipos de polímeros que se caracterizan por su grado de flexibilidad: el tipo vinilo, el cual es el más flexible, el polímero Kevlar que es semirígido y, por último la cadena polipeptídica que es la más rígida [4].

Este tipo de materiales se caracteriza por la alta viscosidad que posee, también por la aplicación de almacenamiento óptico.

2.3. Cristales líquidos termotrópicos

Los CL termotrópicos, son los mas utilizados y estudiados debido a sus propiedades ópticas lineales y no lineales. Para obtener esta mesofase, se puede elevar la temperatura de un sólido o disminuyendo la temperatura de un líquido.

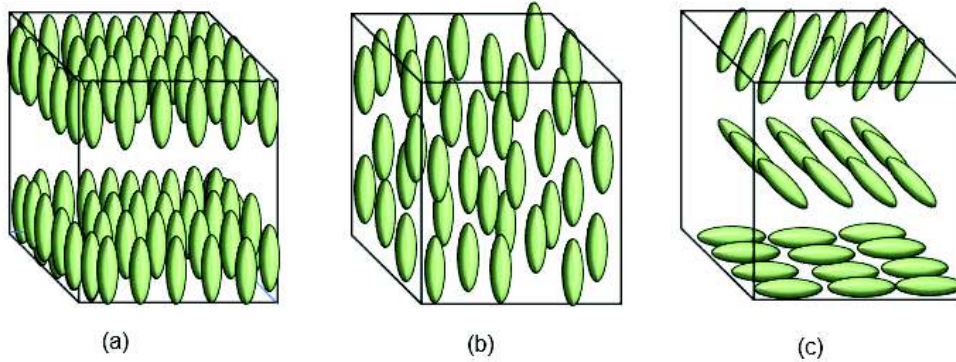


Figura 2.1: Representación esquemática de las mesofases: (a) Esmético, (b) Nemático y (c) Colésterico

Existen tres clases de mesofases de los CL termotrópicos: nemática, colestérica y esméctica [4].

Estas mesofases se caracterizan por sus parámetros físicos, tales como, el rango de orden o la función de distribución orientacional.

2.3.1. Cristales líquidos nemáticos

La fase nemática usualmente se obtiene cuando se tiene un cambio en la temperatura, es por ello que pertenece a los CL termotrópicos. Dependiendo de la estructura química, existe un rango de temperatura donde se produce esta fase. La forma líquido-cristalina de esta fase nemática usualmente toma la forma de una varilla, la cual está compuesta por moléculas orgánicas.

Los CL nemáticos por lo general son anisotrópicos, los cuales poseen solo un orden de orientación, más no de posición. Debido a que las moléculas tienen una forma alargada, éstas, a su vez, poseen una perfecta simetría rotacional, presentan simetría cuadrupolar y son indistinguibles (esto significa que un nemático es considerado centrosimétrico), por lo cual se genera un buen acoplamiento al aplicar campos eléctricos y magnéticos pequeños ya que la molécula tiene una parte rígida y otra flexible; de igual manera, para que sea útil, debe tener un dipolo permanente.

Capítulo 3

Características físicas

El comportamiento de los CL depende principalmente de las propiedades de las moléculas individuales. En este capítulo se discuten algunas de las propiedades físicas que caracterizan a los CL, tales como su eje director y su anisotropía óptica.

3.1. Eje director

Los CL termotrópicos se caracterizan por el orden de orientación de largo alcance y la disposición aleatoria del centro de gravedad de las moléculas individuales, usualmente las moléculas se representan en forma de elipse. El orden de un cristal líquido confinado puede ser fuertemente influenciado por las interfases sólido-cristal líquido, aire-cristal líquido, y líquido-cristal líquido[1].

En la fase nematica las formas fundamentales en las que se puede observar son en forma de varilla o disco. Este tipo de moléculas tiende a alinearse hacia el eje óptico Z , el cual coincide con el vector director \hat{n} que determina la orientación de las moléculas, además posee un plano que es perpendicular a Z .

Parte interesante de los CL involucra la geometría y la dinámica del eje pre-

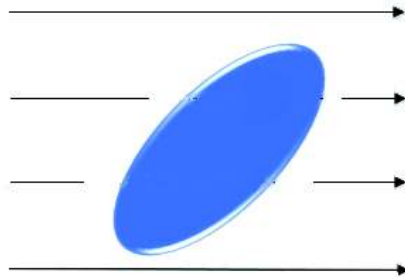


Figura 3.1: Representación de la molécula del cristal líquido

ferido, por lo que es útil definir un campo vectorial $\hat{\mathbf{n}}(r)$ que dé su orientación local.

El tipo de tratamiento de superficie también controla la dirección preferencial de las moléculas en la capa de la superficie. El anclaje paralelo puede ser monostable si únicamente una dirección paralela a la superficie es inducida por el sustrato, o es multiestable si varias direcciones son permitidas, y degeneradas si la superficie es suave.

El campo vectorial $\hat{\mathbf{n}}(r)$ se distorsiona fácilmente y puede alinearse a través de campos magnéticos y eléctricos, y mediante superficies que se han preparado adecuadamente. La dirección preferencial puede variar en el medio que se encuentre.

3.2. Anisotropía óptica

La anisotropía dentro de los CL, tiene un papel importante debido a que es la que determina las características de cómo se lleva a cabo la reorientación de las moléculas. Sin embargo, este tipo de comportamiento también depende del voltaje que se le aplique a la muestra; de forma experimental en un cristal líquido se puede observar si la anisotropía es negativa o positiva, esto depende de la estructura química.

Una onda electromagnética que se propaga a través de un medio en dirección del eje z , se puede representar de forma general como una onda de campo eléctrico, de la siguiente manera:

$$\mathbf{E} = E_0 e^{-i(\omega t - kz)} \quad (3.1)$$

Donde \vec{E}_0 es el vector que representa la magnitud y polarización de la onda, ω la frecuencia angular de la onda y k es la magnitud del vector de propagación.

Debido a su naturaleza anisotrópica, la luz polarizada de forma paralela al vector director, tiene un índice de refracción diferente que el de la luz polarizada de forma perpendicular a dicho vector.

Cuando la luz pasa por el cristal líquido nemático, el proceso se puede representar mediante la descomposición del haz en dos rayos, uno de ellos llamado haz ordinario, el cual se propaga más rápido, mientras que el haz lento es conocido como haz extraordinario.

El índice de refracción está directamente relacionado con la permitividad dieléctrica, dada por $n = \sqrt{\epsilon}$, la cual depende del material. Es importante mencionar que la propagación de la onda electromagnética así como el índice de refracción dependen de la orientación del campo eléctrico. Este fenómeno es conocido como anisotropía óptica y se debe a que el índice de refracción toma valores distintos, dependiendo de que el campo eléctrico E vibre paralela o per-

pendicularmente al vector director.

Este efecto generalmente no se presenta en los líquidos debido a que las moléculas no cuentan con una orientación determinada. Sin embargo, en los CL, el orden de las moléculas está dado por la anisotropía óptica, la cual se manifiesta en la fase líquida de éste.

De igual manera, en el caso de la anisotropía dieléctrica en los materiales uniaxiales, ésta puede ser negativa, si el campo eléctrico no tiene una reorientación con el vector director, o en el caso de que rote en la misma dirección del vector director, se dice que la anisotropía es positiva.

En este caso, en un medio anisotrópico podría calcularse la polarización eléctrica \vec{P} dada por la expresión:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \overleftrightarrow{\chi}_e \vec{E} \quad (3.2)$$

donde $\overleftrightarrow{\chi}_e$ es el tensor de susceptibilidad eléctrica y ϵ_0 es la permitividad eléctrica.

Si los campos eléctricos son muy pequeños, la polarización eléctrica \vec{P} será proporcional al campo eléctrico.

El campo eléctrico tiene un papel importante debido a que existe una magnitud crítica E_F en la que ocurre la denominada transición de Fredericks, la cual se verá más a fondo en el capítulo 5.

3.2.1. Birrefringencia en cristales líquidos

Los cristales anisotrópicos, pueden ser uniaxiales o biaxiales; es decir, pueden tener uno o dos ejes ópticos. Para la mayoría de los CL, uno de los índices de refracción se encuentra a través del eje director óptico \hat{n} , el cual se denota como n_e y el otro en el eje corto, el cual es perpendicular a esta dirección y se denota como n_o . La diferencia de los dos índices de refracción da como resultado la birrefringencia[1].

$$\Delta n = n_e - n_o \quad (3.3)$$

La birrefringencia ocurre en medios ópticamente anisotrópicos, es decir, con propiedades ópticas que dependen de la dirección cristalina. El término “bi” se refiere al efecto de las dos diferentes direcciones de propagación que un rayo incidente puede tener en tal medio.

Si se considera un modelo simple de cristal líquido homogéneo, con el director paralelo al sustrato de la superficie, la luz que incidente, entrará de forma perpendicular a la superficie. Considerando en general que existe un campo eléctrico a lo largo de la componente perpendicular al vector director. Debido

a que las dos velocidades de propagación n_e y n_o son diferentes, y las ondas se desfasan. Cuando los dos haces se recombinan al salir del material birrefringente, la polarización se ve afectada por dicho desfase.

Esta diferencia de fases, se puede representar de la siguiente manera:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_e Z}{\lambda} - \frac{2\pi n_o Z}{\lambda} = 2\pi \frac{\Delta n Z}{\lambda} \quad (3.4)$$

La birrefringencia en los materiales uniaxiales, se incrementa continuamente en la dirección del eje óptico. Esta birrefringencia la podemos expresar como la diferencia entre los índices de refracción, paralelo $n_{\parallel} (= n_3)$ y perpendicular $n_{\perp} (= n_1 = n_2)$.

En cambio en los materiales biaxiales, se mide como una diferencia numérica entre el eje mayor y el eje menor de estos índices[15].

Si $n_3 > n_1, n_2$ el cristal será referido como positivo uniaxial o biaxial, en cambio si $n_3 < n_1, n_2$ el cristal será referido como negativo uniaxial o biaxial.

La representación matemática tiene la forma de una elipse, por lo que es llamado método de elipsoide de índice, el cual tiene la siguiente forma

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (3.5)$$

considerando que la luz se propaga en dirección k haciendo el ángulo θ con el eje z , como se muestra en la figura.

Considerando los índices de refracción de los CL es posible determinar su elipsoide de índices de refracción [4].

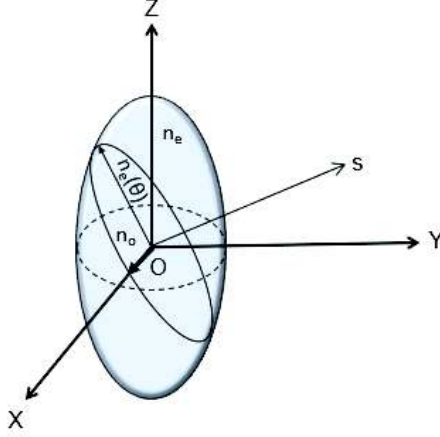


Figura 3.2: Elipsoide de índices de refracción

3.3. Parámetro de orden

Uno de los parámetros más importantes de los CL es el parámetro de orden, ya que junto con el índice de refracción controla casi todas las propiedades físicas que poseen dichos cristales. El parámetro de orden puede ser usado para calcular las propiedades de sustancias como los CL, tal como la anisotropía y la polarizabilidad molecular. El parámetro de orden macroscópico está dado en términos del índice de refracción ordinario y extraordinario en el cristal líquido, n_e y n_o , respectivamente [16, 17, 18]:

$$Q = \frac{(n_e - n_o)}{\Delta n_o} \quad (3.6)$$

donde Δn_o es la birrefringencia del cristal líquido correspondiente al alineamiento completo de dicho cristal.

El parámetro de orden microscópico fue introducido por primera vez por Tsetkov[16]:

$$S = \frac{1}{2} \langle 3\cos^2\theta - 1 \rangle, \quad (3.7)$$

donde θ es el ángulo entre el eje óptico y el eje molecular del CL.

Para encontrar la expresión matemática del parámetro de orden molecular es necesario considerar que las moléculas se encuentran en una vecindad cuando ocurren las transiciones, para ello es necesario considerar la densidad de energía, es decir la energía por unidad de volumen para el sistema de CL. Dicha energía se puede expresar mediante una serie de potencias del parámetro de orden molecular y su derivada[6].

El grado de orden orientacional de las moléculas en forma de varilla en un cristal líquido nemático en su fase líquida y cristalina, está determinada por el

parámetro de orden nemático molecular S ; el cual, es importante al momento de estudiar el comportamiento físico del cristal líquido, ya que nos permite detectar los cambios físicos o de orientación después de la absorción de fotones cuando un colorante laser ha sido introducido al afectar la orientación del cristal líquido en el que se albergan, dando lugar a un efecto óptico no lineal o de almacenamiento

El parámetro de orden molecular en CL introducido por Tsetkov se deduce al definir la distribución angular de las moléculas con una función g . Para obtener la dirección promedio, definimos el vector unitario \hat{n} . Debido al sistema con el que cuenta, g dependerá del ángulo formado entre \hat{n} , \vec{u} y θ .

Para ello se utilizará la función $g(\theta)$ expresada como un desarrollo en serie de polinomios de Legendre, la cual nos dará como resultado una aproximación teórica para el parámetro de orden molecular de los CL. Dicha serie tiene la siguiente forma:

$$g(\theta) = g_0 P_0(\cos \theta) + \frac{3}{2} g_1 P_1(\cos \theta) + \frac{5}{2} g_2 P_2(\cos \theta) \dots \quad (3.8)$$

Tomando en cuenta que $g(\theta) = g(-\theta)$ tenemos $g_1 = 0$; por lo que g_2 describe la distribución de orientación la cual tiene la forma de los polinomios de Legendre de segundo grado:

$$g_2 = \int_{-1}^1 g(\theta) P_2(\cos \theta) d(\cos \theta) = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle = S \quad (3.9)$$

Los brackets, denotan el tiempo espacial en el ángulo θ sobre el conjunto de moléculas.

De acuerdo a De Gennes, cualquiera de las propiedades generales tales como la constante elástica, las susceptibilidades eléctrica y magnética, así como los índices de refracción (ordinario y extraordinario) se pueden utilizar para determinar el parámetro de orden macroscópico.

Dada la importancia de este parámetro se han desarrollado diversos métodos para poder determinar el orden de éste, puesto que de esta manera se pueden comprender las diversas propiedades de los mesógenos. De acuerdo a los múltiples estudios que se han realizado la mayoría coincide en que los datos obtenidos por mediciones ópticas son más exactos y precisos, es por ello que es común utilizar métodos ópticos para determinar el parámetro de orden.

Capítulo 4

Uniaxialidad y biaxialidad

En este capítulo se dará un breve repaso sobre los conceptos de uniaxialidad y biaxialidad en los CL nemáticos.

Todos los cristales están hechos de muchos átomos y moléculas que se encuentran ensambladas en planos cristalinos simétricos; como tal son ópticamente anisotrópicos [7].

Si el cristal líquido nemático es uniaxial, se sabe que cuenta con un único vector director $\hat{\mathbf{n}}$ el cual se encuentra paralelo al eje Z; estos tipos de materiales no presenta birrefringencia de la luz a través de este eje, es por ello que se le denomina eje óptico.

Desde la predicción teórica de la biaxialidad en la fase nemática por Freiser en 1970 [8], la fase se denominó como N_b para poder indicar los dos ejes que presenta. La luz polarizada en el plano seleccionado puede viajar sin un cambio en el estado de polarización. A la biaxialidad se le ha puesto una atención importante debido a la simetría que presenta. Una de las primeras observaciones fue realizada a través de un liotrópico, la cual fue reportada por Yu y Saupé; sin embargo, en los CL termotrópicos es difícil observar este comportamiento biaxial.

De igual manera, Freiser predijo que a medida en que aumenta la biaxialidad molecular, la estabilidad de la biaxialidad con respecto a la fase nemática uniaxial, ésta aumentaba hasta un valor único de la biaxialidad; además la fase isotrópica experimentaba una transición de segundo orden directamente a la fase nemática biaxial. A este valor se le conoce como punto de Landau [9].

Debido al incremento de las aplicaciones que se tiene en el campo industrial, se han estudiado este tipo de materiales a temperatura ambiente, ya que en los nemáticos se presenta la biaxialidad. De igual forma, es importante controlar la alineación de la superficie donde se coloca el material nemático; ésta tiene que estar alineada al eje vector director $\hat{\mathbf{n}}$ y ser transversal a los ejes directores $\hat{\mathbf{l}}$ y $\hat{\mathbf{m}}$. A través del campo eléctrico se seleccionará la dirección a lo largo del eje.

Desde un enfoque clásico, la biaxialidad en un nemático termotrópico está

basada en la predicción teórica en donde existe un parámetro óptimo de biaxialidad molecular; sin embargo, este modelo solamente aplica en las fases isotrópicas y nemáticas, lo cual a su vez restringe la posibilidad de que ocurra en la formación de la fase esméctica, columnar o sólida a altas temperaturas.

Sin embargo, existe una gran variedad de técnicas para poder determinar la biaxialidad dentro de la fase nemática; entre éstas se encuentran las que se basan en la observación de la textura óptica a través de un microscopio. En estas observaciones, se pueden determinar de forma significativa la biaxialidad en las propiedades tensoriales, tales como el índice de refracción o la permitividad dieléctrica.

Para el caso del índice de refracción, la conosocopia nos proporciona un método extremadamente sensible para poder determinar la biaxialidad [13]

4.1. Polarización

Para la gran mayoría de los materiales fotónicos, la polarización juega un papel importante, ya que el funcionamiento del dispositivo que se llegue a elaborar dependerá del manejo de dicha polarización. Uno de los primeros científicos que describió los efectos de la polarización fue Huygens, quién, a través de un experimento donde hacía pasar luz entre dos cristales, pudo observar que al momento de rotar los cristales uno respecto al otro, para algunas orientaciones del segundo cristal, no se veía la doble imagen del primer cristal, esto significaba que cada uno de los dos haces eran, de alguna manera, diferentes a la luz ordinaria.

A lo largo de los años se han desarrollado diferentes métodos para explicar el comportamiento de la luz, entre esos estudios se encuentran la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria de la luz. Esta última es la es de nuestro interés debido a que trata a la luz como una onda.

La luz es una onda transversal que puede ser modelada a través de las componentes del campo eléctrico \vec{E} y el campo magnético \vec{H} . Los cuales oscilan de forma perpendicular a la dirección de propagación de la luz, la onda resultante puede o no ser linealmente polarizada[15]. Una de las características de esta onda transversal es que puede vibrar en alguna componente seleccionada en un plano determinado el cual, en consecuencia, nos dará una luz polarizada. Por lo general, la dirección de polarización se determina según el vector \vec{E} .

Para poder saber acerca de que tipo de polarización de la onda, se trata es necesario analizar el campo \vec{E} el cual tiene la forma:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega \cdot t + \delta)} \quad (4.1)$$

o

$$E_x = E_{0x} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega t + \delta); E_y = E_{0y} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega t + \delta) \quad (4.2)$$

Considerando

$$\tau = (\vec{k} \cdot \vec{r} \mp \omega t) \quad (4.3)$$

Reescribimos las ecuaciones anteriores como:

$$E_x = E_{0x} \cos(\tau + \delta_x); E_y = E_{0y} \cos(\tau + \delta_y) \quad (4.4)$$

$$\frac{E_x}{E_{0x}} = \cos(\tau) \cos(\delta_x) - \sin(\tau) \sin(\delta_x); \frac{E_y}{E_{0y}} = \cos(\tau) \cos(\delta_y) - \sin(\tau) \sin(\delta_y) \quad (4.5)$$

Multiplicamos las ecuación 4.5 por $\cos \delta_y$ y $\cos \delta_x$ respectivamente.

$$\cos \delta_y \left[\frac{E_x}{E_{0x}} \right] = \cos \delta_y [\cos(\tau) \cos(\delta_x) - \sin(\tau) \sin(\delta_x)]; \quad (4.6)$$

$$\cos \delta_x \left[\frac{E_y}{E_{0y}} \right] = \cos \delta_x [\cos(\tau) \cos(\delta_y) - \sin(\tau) \sin(\delta_y)]; \quad (4.7)$$

Nuevamente multiplicamos las ecuaciones 4.5 por $\sin \delta_y$ y $\sin \delta_x$ respectivamente.

$$\sin \delta_y \left[\frac{E_x}{E_{0x}} \right] = \sin \delta_y [\cos(\tau) \cos(\delta_x) - \sin(\tau) \sin(\delta_x)]; \quad (4.8)$$

$$\sin \delta_x \left[\frac{E_y}{E_{0y}} \right] = \sin \delta_x [\cos(\tau) \cos(\delta_y) - \sin(\tau) \sin(\delta_y)]; \quad (4.9)$$

Restando las ecuaciones 4,6 menos la ecuación 4,7

$$\begin{aligned} [\cos(\delta_y) \left[\frac{E_x}{E_{0x}} \right] - [\cos(\delta_x) \left[\frac{E_y}{E_{0y}} \right]] &= \\ &= \cos(\tau) [\cos(\delta_y) - (\delta_x)] \\ &= \sin(\tau) [\sin(\delta_y) - (\delta_x)] \end{aligned} \quad (4.10)$$

y finalmente elevamos al cuadrado

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right) \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right) \cos(\delta_y - \delta_x) = \sin^2(\delta_y - \delta_x) \quad (4.11)$$

donde E_x es el estado de polarización lineal ortogonal en dirección del eje x y E_y es el estado de polarización lineal ortogonal en dirección del eje y, δ_x y δ_y corresponden a las fases de los campos, E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes de los campos, estas últimas se relacionan como:

$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \quad (4.12)$$

De esta manera se distinguen los estados de polarización lineales, circulares o en general elípticos. Como podemos observar, la ecuación (4.3) nos da la ecuación de una elipse de forma paramétrica, la cual muestra que en cualquier instante de tiempo el lugar geométrico que describe la propagación del campo eléctrico está representado por la elipse de polarización, como se muestra en la figura 4.1 Esta ecuación muestra de una forma general la luz elípticamente polarizada, sin embargo, bajo ciertas condiciones puede tomar una forma circular o lineal lo cual nos indica que el vector de campo \vec{E} girará cambiando también su magnitud. A continuación se muestran estos casos especiales:

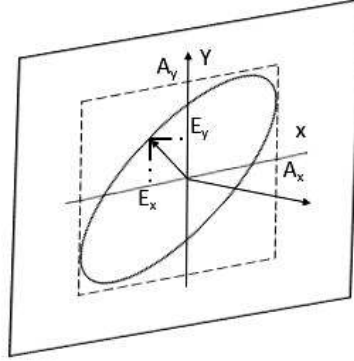


Figura 4.1: Elipse de polarización

- [i)] Para el primer caso, las componentes ortogonales del campo tienen un desfase $\delta = \pm \frac{\pi}{2}, \pm \frac{3\pi}{2}, \pm \frac{5\pi}{2} \dots$

$$\frac{E_y^2}{E_{0y}^2} + \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} = 1 \quad (4.13)$$

Si consideramos

$$E_{0x}^2 = E_{0y}^2$$

se reduce a:

$$E_y^2 + E_x^2 = a^2 \quad (4.14)$$

Lo cual nos da la ecuación de un círculo; ésta nos puede dar dos tipos de polarización circular, izquierda o derecha, dependiendo del sentido en que giren las componentes.

- [ii)] Para el segundo caso, si δ es múltiplo de π es decir $\delta = m\pi$, con $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, la ecuación (4.3) resulta:

$$E_y = \pm \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x \quad (4.15)$$

y nos da como resultado líneas rectas con pendiente $\pm \frac{E_{0y}}{E_{0x}}$, con la cual tenemos luz polarizada linealmente.

Como se ha podido observar, los CL tienen propiedades anisotrópicas, cuya consecuencia tiene el efecto de que si la luz se propaga en diferentes direcciones, esta a su vez propagará con diferentes velocidades, lo cual provoca un cambio

en el índice de refracción.

Los polarizadores lineales generalmente están hechos de materiales absorbentes anisotrópicos [4]. En los CL nemáticos, el índice de refracción cambia de acuerdo a la reorientación del eje director. Muchos de los CL utilizan la birrefringencia que presenta el cristal en combinación de múltiples elementos ópticos para controlar, modular o manejar la luz. En este caso, la luz polarizada puede ser: elíptica, circular o lineal, dependiendo de las características de las componentes, algunos ejemplos se muestran en la figura 4.2.

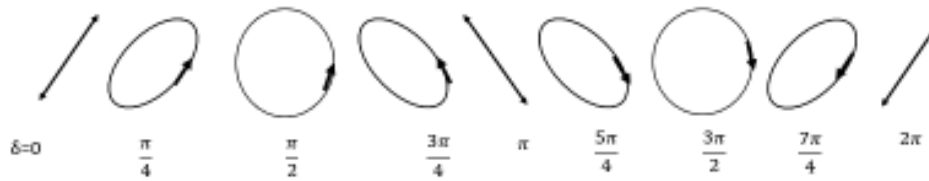


Figura 4.2: Estados de polarización

Capítulo 5

Efecto de colorantes en nemáticos

En este capítulo se presentan los antecedentes de los colorantes láser, así como los efectos que pueden llegar a presentarse al momento de mezclarse con un nemático.

La posibilidad de utilizar tintes en dispositivos de cristal líquido surgió a partir de la primera observación informada de la alineación del tinte o colorante en un anfitrión nemático [10].

La presencia de distintos colorantes dentro de un cristal líquido nemático, al momento de mezclarse genera que las moléculas anisotrópicas del tinte tiendan a alinearse a lo largo del eje director del cristal líquido; de igual manera, provoca un cambio en el rango de fase nematica. Sin embargo, también puede llegar a cambiar el parámetro de orden, la permitividad eléctrica, la transmitancia óptica, etc.

Sin embargo, para poder obtener buenos resultados al momento de llevarlo a una forma práctica, se debe de tomar en cuenta que el sistema sobre el cual se realiza el estudio sea fotoquímica, electroquímica y térmicamente estable. De manera que es de suma importancia elegir un colorante o tinte que sea soluble con el otro componente.

En general, el rango de temperatura en varias mesofases de un CL puro es bastante limitada [4]. Es por ello, que se ha implementado el dopaje con diversos colorantes debido a su largo alcance en la aplicación industrial. Existen diversas formas de modificar las propiedades físicas del CL. Una de ellas sería a través de sus grupos químicos, así como los enlaces que puede llegar a tener. Un buen ejemplo sería el cianobifenilo en la serie homóloga nCB(n = 1, 2, 3,...)[4].

Uno de los efectos que tiene el colorante láser en los cristales es en el incremento de la absorción en ciertas longitudes de onda y depende del colorante que se utilice, dado que la eficacia del sistema es fundamentalmente de la absorción de moléculas que se encuentran alineadas dentro del dispositivo.

Por lo general se utilizan tintes dicroico constituidos por moléculas orgánicas que tienen forma de varilla y muestran una anisotropía única con propiedades de absorción de la luz que dependen de las direcciones paralela y perpendicular a la molécula, siendo esta caracterizada por la proporción dicroica.

La principal característica es que poseen obligatoriamente orden de posición. La

mayoría de los CL son derivados del benceno. Puesto que la mayoría de los CL son compuestos aromáticos, los niveles de energía u orbitales desempeñan un papel importante

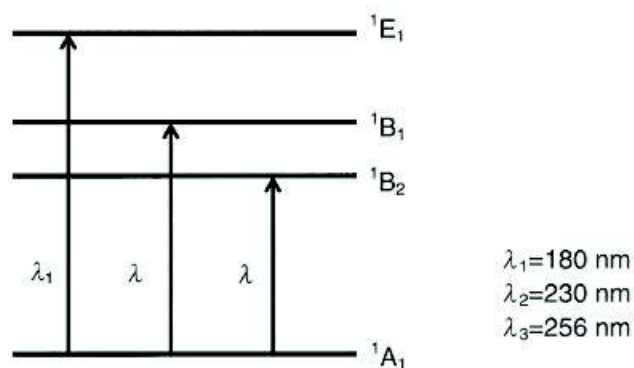
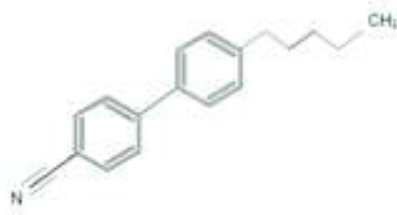


Figura 5.1: Transiciones electrónicas de la molécula de benceno[4].

Otros CL son derivados a partir del colesterol, los cuales son los más comunes que se utilizan, debido a que exhiben la fase colestérica o quiral nemática.

El efecto electro-óptico implica ajustar el dicroísmo para adaptarse a una polarización de luz específica mediante la rotación de las moléculas de colorante dicroico dentro de una celda de cristal líquido controlable por voltaje, tal como se muestra en la figura 5.3.



Created in BioRender.com 

Figura 5.2: Estructura molecular del 5CB

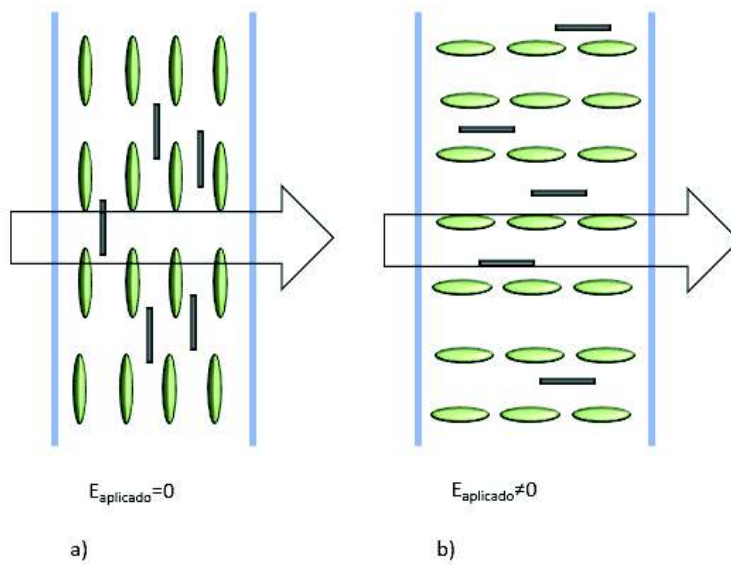


Figura 5.3: Celda nemática con colorante a) sin campo eléctrico, b) con campo eléctrico

Capítulo 6

Propiedades dieléctricas de los cristales líquidos

6.1. Campo eléctrico de baja frecuencia

El campo eléctrico es el agente externo más usado para reorientar los CL, debido a que se pone en manifiesto la respuesta uniaxial de los CL (respuesta anisotrópica).

Como resultado, hay anisotropía en las propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas y ópticas. Aunque los CL, o mesofases, combinan las propiedades de un sólido y un líquido isotrópico, exhiben fenómenos electro-ópticos muy específicos.

Debido a la anisotropía de las moléculas su tensor dieléctrico tiene componentes anisotrópicas. Vale ϵ_{\parallel} a lo largo del director y ϵ_{\perp} en la dirección perpendicular.

Al momento de aplicarle \vec{E} se induce un momento dipolar por unidad de volumen, para ello obtenemos la polarización \vec{P} a partir de la ecuación constitutiva.

$$\vec{P} = \epsilon_0 \overleftrightarrow{\chi}_e \vec{E} \quad (6.1)$$

$$\overleftrightarrow{\chi}_e = \begin{bmatrix} \chi_{e_{\perp}} & 0 & 0 \\ 0 & \chi_{e_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{e_{\parallel}} \end{bmatrix}$$

donde $\overleftrightarrow{\chi}_e$ es el tensor con componentes anisotrópicas..

Por otro lado el desplazamiento eléctrico se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (6.2)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \overleftrightarrow{\epsilon} \vec{E} \quad (6.3)$$

donde $\overleftrightarrow{\epsilon} = 1 + \overleftrightarrow{\chi}_e$ es el tensor dieléctrico.

$$\overleftrightarrow{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{bmatrix}$$

en el cual

$$\epsilon_{\parallel} = 1 + \chi_{e\parallel}, \quad (6.4)$$

y

$$\epsilon_{\perp} = 1 + \chi_{e\perp} \quad (6.5)$$

en términos del vector director el desplazamiento eléctrico queda de la forma:
 $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_{\perp} \vec{E} + \epsilon_0 \epsilon_a (\hat{n} \cdot \vec{E}) \hat{n}$

La anisotropía de la constante dieléctrica está dada por la diferencia entre la constante dieléctrica paralela y perpendicular respecto al director.

$$\epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} \quad (6.6)$$

ϵ_a : Puede ser positiva o negativa (depende de los constituyentes moleculares del nemático).

En el caso del campo eléctrico produce momentos dipolares inducidos en las moléculas las cuales contribuyen en la polarización.

En términos de la susceptibilidad eléctrica

$$\epsilon_a = \chi_{e\parallel} - \chi_{e\perp} \quad (6.7)$$

Además,

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{\perp} \delta_{ij} + \epsilon_a n_i n_j \quad (6.8)$$

$\epsilon_a > 0$: el vector director tiende a alinearse con el campo.

$\epsilon_a < 0$: el vector director tiende a orientarse perpendicular a el campo.

Sin embargo, es importante observar que la velocidad de la fase depende de la dirección de propagación y del estado de polarización de la muestra. Debido a la anisotropía que presenta la polarización de la onda plana, va variando al propagarse por el medio. A partir de esta propagación, se pueden definir dos modos normales en los que la velocidad de fase y el estado de polarización se mantienen fijos, es decir, una onda plana con una polarización paralela a una de estas direcciones no variaría su estado al propagarse a través del medio.

La densidad libre de Helmholtz asociada a la interacción del CL con el campo

\vec{E} es

$$f_e = -\frac{1}{2}\vec{D} \cdot \vec{E} \quad (6.9)$$

$$f_e = -\frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon_{\perp}\vec{E}^2 - \frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon_a(\hat{n} \cdot \vec{E})^2 \quad (6.10)$$

debido a que el primer término no depende de la orientación de \hat{n} no se toma en cuenta.

La forma más común utilizada para la densidad de energía eléctrica

$$F_e = -\frac{1}{2}\epsilon_a(\hat{n} \cdot \vec{E})^2 \quad (6.11)$$

Capítulo 7

Desarrollo experimental

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental del trabajo. Se muestra paso a paso la fabricación de las celdas de cristal líquido utilizadas, así como la metodología para la caracterización del material.

7.1. Síntesis del cristal líquido nemático

La estructura y propiedades de los CL nemáticos se han estudiado extensamente durante mucho tiempo [4].

Para la preparación de las muestras se han utilizado los siguientes materiales: los cristales líquidos 4-ciano-4'-pentilbifenilo(5CB) y 4'-n-Pentiloxi-4-Bifenilcarbonitrilo (5OCB); clorobenceno, S-1-Bromo-2 metilbutano y 4-(dicianometileno)-2-metil-6-(4-dimetilaminoestiril)-4H-pirano(DCM), los cuales fueron adquiridos a Sigma Aldrich. A continuación se realizará una descripción breve de la preparación de la muestra.

Para la preparación de la primera muestra nemática se utilizó 5CB (67%), 5OCB (27%) y clorobenceno (6%), el cual se usa como agente reductor de viscosidad. De igual manera, para la síntesis del cristal líquido, se agrega el agente quiral S-1-Bromo-2-metilbutano al (30%), la cual fungirá como muestra base. Una vez obtenida la muestra base, para la segunda muestra se realiza el mismo procedimiento anteriormente mencionado pero ahora agregándole el colorante láser DCM (0,1%), el cual es un colorante láser rojo que consiste en dicianometileno como un aceptor de electrones y el grupo de dimetilanilina como un donador de electrones. Tiene un 4H-piran-4-ilidieno conjugado con π que une ambos grupos aceptores-donantes; en este caso, la función del colorante es dopar el CL y así obtener una absorción significativa dentro del rango visible.

7.2. Construcción de una celda de cristal líquido

Para el proceso de fabricación de las celdas de cristal líquido nemático, es necesario contar con dos piezas de sustrato de vidrio, las cuales están cubiertas por el material conductor conocido como óxido de estaño-indio(ITO), esto debido a que es un material que tiene buena respuesta al momento de aplicarle

voltaje; los sustratos se recubrieron con una capa de acetato de polivinilo (PVA por sus siglas en inglés) para poder tener una alineación óptima.

De igual manera, fue necesario realizar alineación planar, la cual se obtiene mediante un proceso de frotación en una misma dirección en cada una de las placas del sustrato. Para ello, se utilizó el método de tallado conocido como *rubbing*, el cual tiene como función orientar las moléculas en una sola dirección paralela al sustrato como se muestra en la figura 7.1

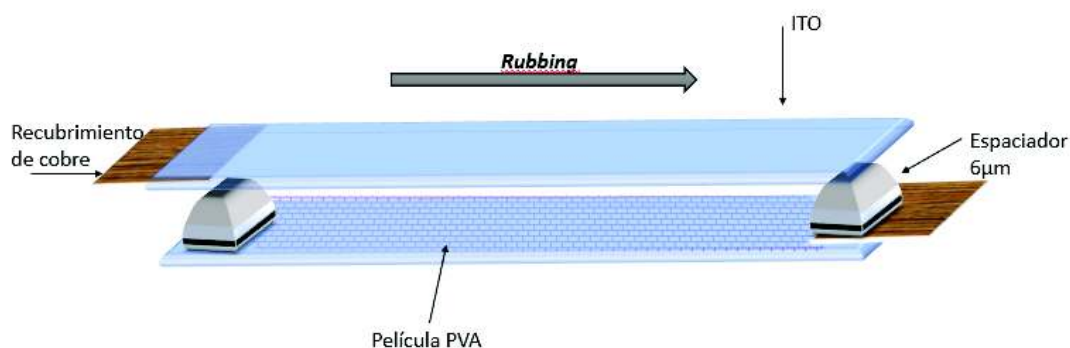


Figura 7.1: Esquema de cristal líquido con alineación planar

Debido a que existen diversos tipos de alineación, la forma más común en la que se suele orientar a las moléculas de la fase nemática es de forma paralela a las placas, debido a que la viscosidad es menor en esta dirección. Sin embargo, la alineación no se logra de manera uniforme sobre toda la placa, sino más bien en pequeñas regiones, lo cual ocasiona que el material muestre un color opaco, pero al momento de aplicar un campo magnético o eléctrico, estos generan un cambio en la anisotropía, lo cual provoca que las moléculas se orienten en una misma dirección, tal y como se muestra en la figura 7.2.

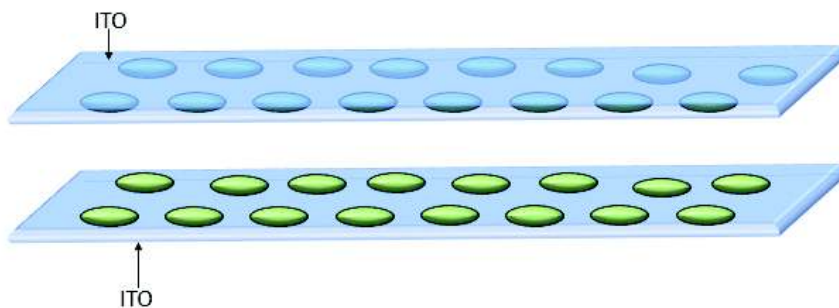


Figura 7.2: Alineación planar

Al momento de tener la alineación planar en ambos sustratos, el siguiente paso a seguir es el pegado de los dos ITOS para así dar forma a la celda. El espacio de separación entre las placas se logra colocando espaciadores Mylar ($6\mu\text{m}$).

Para el proceso de llenado de las celdas con las mezclas de nemáticos realizadas se recurre a la técnica de capilaridad. Para ello es importante dejar reposar las muestras colocándolas de manera vertical para que la mezcla vaya cayendo lentamente hasta cubrir en su totalidad la celda, el método utilizado es algo tardado debido a la densidad del CL.

Una vez terminada la celda se realizan pruebas con dos polarizadores cruzados, los cuales nos van a indicar los estados de apagado y encendido de la celda. Para poder indentificar el estado de apagado, notamos que en las moléculas deben de rotar 90° por lo cual la celda se torna oscura; mientras que, cuando se encuentra encendido, la celda se torna claro esto debido a que las moléculas se encuentran en el mismo estado de polarización. Para ello se realizó el arreglo experimental mostrado en la figura 7.3

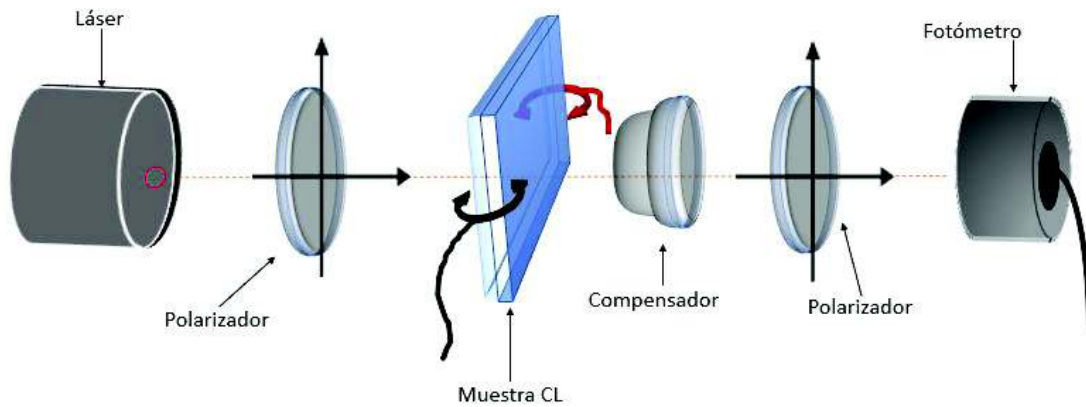


Figura 7.3: Representación esquemática del arreglo experimental

Para medir la transmisión de la luz, como fuente se utilizó un láser He-Ne con una longitud de onda de 632.8nm , dos polarizadores cruzados, un compensador Babinet-Soleil así como un fotómetro que nos da la información de la respuesta óptica.

Al aplicar un campo eléctrico en la celda por los lados laterales usando dos electrodos, con el *controlador de cristal líquido LCC25* se puede manipular el estado de orientación de las moléculas, las cuáles inducen un estado de polarización a la luz que pasa a través del cristal, como se muestra en la figura 7.4.

De esta forma, la polarización de la luz seguirá la orientación que tengan estas moléculas y variará de acuerdo a los cambios del voltaje que se le aplique. La respuesta que tienen la mayoría de estas celdas se da en tiempos de milisegundos [11]. Sin embargo, este cambio se puede observar con el fotómetro.

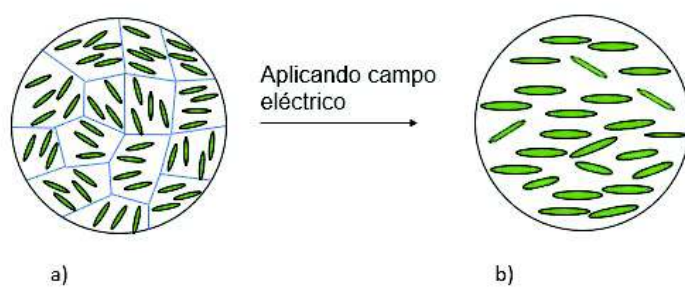


Figura 7.4: Estado de polarización: a) apagado, b) encendido

Capítulo 8

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la biaxialidad de la mezcla de los nemáticos, 5CB y 5OCB, con y sin colorante láser añadido. De igual manera, se presenta el análisis e interpretación de los datos obtenidos.

A través del arreglo experimental expuesto en el capítulo anterior, se observaron las propiedades electro-ópticas de la muestra, tales como la transmitancia y el plano de rotación de la luz a través de la muestra cuando se aplica un campo eléctrico.

Midiendo la transmitancia óptica, para una longitud de onda fija (632.8nm), se puede determinar la birrefringencia del material con la siguiente ecuación

$$B(\lambda) = \frac{N_{out} \cdot \lambda}{x_{out}} \quad (8.1)$$

donde N_{out} es la distancia retardada (diferencia entre el índice de refracción ordinario e índice de refracción extraordinario) y x_{out} el espesor de la placa.

De aquí se obtiene la biaxialidad de la muestra, una vez graficado los datos obtenidos.

Los resultados obtenidos en ambas celdas se muestran en la figuras 8.1a y 8.1b. Como se puede observar, ambas muestras presentan comportamientos similares, lo cual nos indica que son biaxiales, de acuerdo a lo reportado en la referencia [14].

En la referencia [14] se reporta la gráfica de una muestra que presenta una transición de las propiedades ópticas del CL, de uniaxial a biaxial. En esa gráfica se muestra la dependencia de la birrefringencia constante, respecto a variaciones del campo eléctrico, lo cual indica que el cristal líquido es de naturaleza uniaxial. Cuando la dependencia de la birrefringencia presenta variaciones con respecto al campo eléctrico aplicado, se dice que el cristal es de naturaleza biaxial.

Comparando las gráficas de los resultados obtenidos con las gráficas del artículo mencionado, se puede concluir que las muestras, 5CB y 5OCB con y sin colorante láser presentan comportamiento similar a las gráficas de biaxialidad. Esto debido a que, la mezcla de los dos CL nemáticos, uno de ellos con apariencia líquida y con propiedades ópticas uniaxiales, y el otro con apariencia en polvo y propiedades ópticas biaxiales, han adquirido propiedades de biaxialidad al momento de haber sido dopada con colorante láser DCM(4-(Dicianometileno)-2-metil-6-(4-dimetilaminoestiril)-4H-pirano).

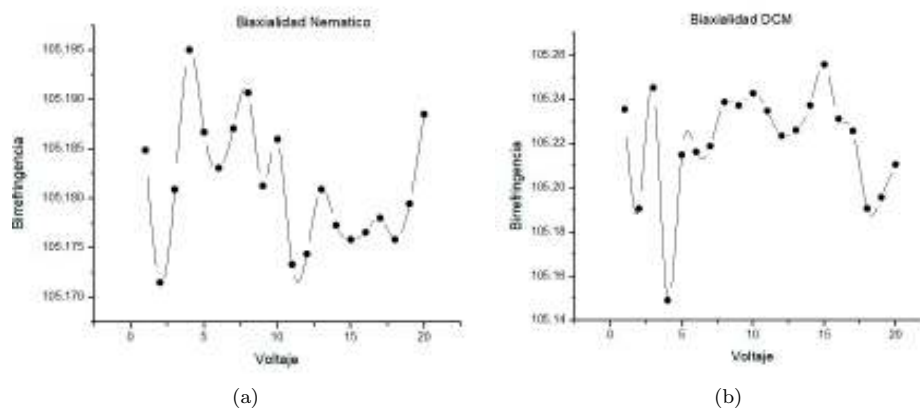


Figura 8.1: Biaxialidad en fase nemática bajo polarizadores cruzados para diferentes intensidades de campo eléctrico: a) nemático, b)DCM

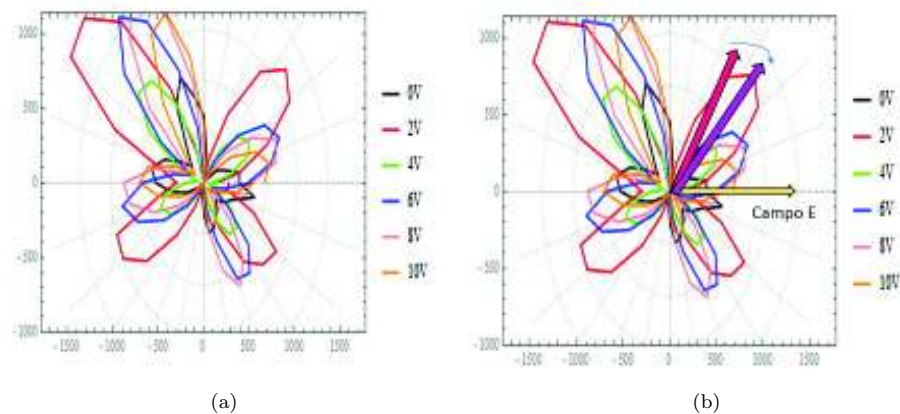


Figura 8.2: Confirmación de anisotropía dieléctrica desde la dirección de rotación del eje principal bajo un campo eléctrico aplicado: a)Anisotropía dieléctrica b)Anisotropía dieléctrica positiva.

Por otro lado, como se menciona en el Capítulo 3, la anisotropía óptica está relacionada con la reorientación de las moléculas cuando se aplica un campo eléctrico; de igual manera se relaciona con el índice de refracción, ya que la luz polarizada que atraviesa la muestra es paralela al vector director. Usualmente la luz blanca que pasa a través de un cristal anisotrópico se puede descomponer en dos rayos, uno de ellos es conocido como el haz de luz ordinario, el cual es el que a traviesa de forma rápida, mientras que el otro es más lento se conoce como haz extraordinario.

La anisotropía óptica se define como la diferencia de los índices de refracción del haz extraordinario y del haz ordinario.

$$\Delta n = (n_e)^2 - (n_o)^2 \quad (8.2)$$

Se ha determinado la dependencia del ángulo de rotación del plano de polarización de la muestra para determinar si la muestra contiene información de si la anisotropía es negativa o positiva. Para ello se midió la transmitancia a través de la celda de 5CB y 5OCB a temperatura ambiente en función del ángulo de rotación de los polarizadores cruzados, los resultados obtenidos se muestran en la figura 8.2a

Como se puede observar en la figura 8.2a, en la primera celda nemática (5CB y 5OCB) el eje director gira en el sentido de las manecillas del reloj conforme aumenta el voltaje aplicado, lo cual nos indica que la anisotropía dieléctrica es positiva, en caso de que el eje director vaya en contra de las manecillas del reloj se dice que tiene una anisotropía negativa.

De igual manera, conforme se va aumentando el voltaje, la gráfica muestra que se va ampliando el ángulo de visión de la muestra, lo cual no indica que este mismo se va mejorando, debido a que cubre más espacio de visión. En los nemáticos, la relación entre el desplazamiento eléctrico \vec{D} y el campo eléctrico \vec{E} tiene la forma:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_{\perp} \vec{E} + \epsilon_0 \epsilon_a (\hat{n} \cdot \vec{E}) \hat{n} \quad (8.3)$$

donde la anisotropía dieléctrica de un CL puede ser positiva o negativa y \hat{n}_{CL} corresponde a la dirección del eje largo [12].

Capítulo 9

Conclusiones

En el presente trabajo se expusieron algunos conceptos físicos y ópticos relacionados con los CL, tales como: anisotropía, biaxialidad, polarización, birrefringencia, propagación de campos electromagnéticos, plano de polarización, etc., los cuales facilitan la comprensión de las propiedades electro-ópticas que poseen las celdas descritas en el Capítulo 7.

De igual manera, se mencionaron las diversas mesofases y sus características para conocer el comportamiento que tienen y que permite elegir la más adecuada de acuerdo a la aplicación que se le desee dar.

Es importante destacar que para este trabajo se tomaron en cuenta los CL que funcionan a temperatura ambiente. Para ello, se buscó un cristal líquido con mejor respuesta óptica, como los CL biaxiales que son más rápidos que los CL uniaxiales, sabíamos que el cristal 5OCB es de naturaleza biaxial pero con apariencia en polvo, al momento de aumentar su temperatura se convertía en líquido conservando sus propiedades de biaxialidad; sin embargo, no resulta muy práctico en la aplicación de dispositivos ópticos que funcionan a temperatura ambiente, es por ello que se mezcló con el compuesto 5CB de naturaleza uniaxial para poder manejarlo a temperatura ambiente. Para ello se analizaron las muestras y se concluyó que la mezcla de ambos cristales tiene naturaleza biaxial como se puede observar en las figuras 8.1a y 8.1b.

Una característica importante que se pudo observar a través de las muestras con las que se trabajó está relacionada con la radiación del cristal líquido 5CB y 5OCB, ya que esta presenta una relación de voltaje con respecto al ángulo de rotación de los polarizadores como se muestra en la figura 8.2a, ya que en algunos voltajes el rango de visión era mayor, de igual manera se obtuvo el rango del ángulo de visión de la muestra nemática, esto nos indica que conforme se va aumentando el voltaje mayor ángulo de visión presenta, lo cual es importante en la aplicación de dispositivos ópticos. De igual manera, esta mezcla biaxial puede ser usada como retardador de fase, la cual se puede utilizar como elemento para realizar desplazamientos de fase en zonas localizadas de un interferograma.

Bibliografía

- [1] Blinov, L. (2014). Structure and properties of liquid crystals. Springer.
- [2] Reinitzer, F.: Beiträge zur Kenntniss des Cholesterins. Monatshefte für Chemie **9**, 421 (1888)
- [3] Lehmann, O.: Über fließende Kristalle. Zs. Phys. Chem. **4**, 510–514 (1889)
- [4] Khoo, I. (2007). Liquid Crystals (2nd ed.). WILEY,E.U
- [5] Chandrasekhar, S. 1992. Liquid Crystals. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- [6] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Course of Theoretical Physics, Statistical Physics (Butterworth & Heinemann, Oxford, 1999).
- [7] D. Demus, J. W. Goodby, G. W. Gray, H.-W. Spiess and V. Vill (ed.), Handbook of Liquid Crystals, Wiley-VCH, Weinheim, 1998.
- [8] M.J Freiser. Phys.Rev.Lett,1970,**24**,1041.
- [9] N. Boccara, R. Mejdani, L. de Seze, J. Phys. 1977, **38**, 149–151
- [10] GH, Zanoni LA. Appl. Phys. Lett. 1968;**13**:91–92
- [11] Haller: Appl. Phys. Lett., **24**, 349 (1974); t. Uchida et al., Mol. Cryst. Liq. Cryst., **60**, 37,(1980)
- [12] P.G. de Gennes and J. Prost. The Physics of Liquid Crystals. Clarendon Press, Oxford, UK, 1993.
- [13] Y. Galerne, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1998, **323**, 211–229
- [14] Mamatha Nagaraj, Applied Physics Letters **97**, 213505 (2010);
- [15] Eugene Hetch. (2000). Óptica. Madrid: ADDISSON WESLEY IBERO-AMERICANA.
- [16] M.S. Zakerhamidi and et al. J. Mol. Liq., 181:77, 2013.
- [17] Ara Majles and Z. Seidali. Optik, 126:297, 2015.
- [18] F. Araoka and et al. J. of Appl. Phys., 94:297, 2003.