



***UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE MARINGÁ***

PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

THIAGO MARQUES DE ANDRADE

**DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO UTILIZANDO FASE
NEMÁTICA**

Orientador: Prof. Dr. Antônio José Palangana

Maringá, março de 2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

THIAGO MARQUES DE ANDRADE

DISPOSITIVO ELETRO-ÓPTICO UTILIZANDO FASE NEMÁTICA

Orientador: Prof. Dr. Antônio José Palangana

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Física (PFI) da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Física.

Maringá, março de 2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me conceder o dom da vida.

Aos meus pais, Pedro e Terezinha, pelo incentivo e apoio nas minhas decisões.

A equipe do pesquisador Thebano Emilio Almeida Santos do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) em Campinas-SP, em especial ao Marcelo e o Mamoru, por cederem seu tempo e paciência para me ajudar a confeccionar as amostras de CL.

Ao Prof. Dr. Antônio José Palangana pela orientação e incentivo para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Evangelista pelas conversas e esclarecimentos das minhas dúvidas.

Ao Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira por ter me dado a chance de fazer o estágio docência.

Ao grupo de Cristais Líquido DFI-UEM, em especial o Prof. Dr. Newller Marcelo Kimura, pelo apoio para a realização deste trabalho.

Aos professores do DFI-UEM por me darem a base necessária para conseguir entrar no programa de Pós-graduação em Física.

Ao programada de pós-graduação em Física PFI-UEM, juntamente com o CNPq, CAPES e Fundação Araucária pela ajuda financeira.

A minha noiva Natália por todo carinho e paciência.

A minha prima Cristiane pela correção ortográfica desta dissertação.

Resumo

O presente trabalho estuda três sistemas eletrônicos para controlar a transmissão de luz que atravessa um dispositivo eletro-óptico, tal dispositivo é preenchido com cristal líquido na fase nemática (CLN), e foi construído com características semelhantes aos dos mostradores de CLN (*displays*) usados nas tecnologias de mostradores atuais. Os mostradores de cristal líquido tem como princípio de funcionamento o fenômeno físico conhecido como Transição de Fréedericksz, que é a mudança na orientação do vetor diretor da fase nemática de um cristal líquido na presença de um campo magnético ou elétrico. O dispositivo usado neste trabalho é constituído por dois substratos de vidro, quais as superfícies foram devidamente tratadas e coladas, o espaço entre os substratos de vidro foi preenchido com cristal líquido termotrópico (CLT) na fase nemática.

Os sistemas eletrônicos utilizados no controle da intensidade do sinal óptico foram o *Pulse Width Modulation* (PWM, que quer dizer modulação da largura do pulso), variação da amplitude de tensão e variação de frequência, sendo essa última a mais utilizada no controle de contraste de *displays* de cristal líquido. O sistema de PWM foi obtido com um circuito baseado no micro controlador PIC 16F628A, ao passo que o controle por variação de amplitude de tensão e frequência foi realizado com um gerador de funções.

As medidas experimentais utilizadas para fazer a comparação dos sistemas de controle foram realizadas em um espectrofotômetro, configurado para medir a transmitância de luz que atravessava o dispositivo com cristal líquido.

Abstract

The present work studies three electronic systems to control the transmission of light that passes through an electro-optical device, such device is filled with liquid crystal in the nematic phase (CLN), and was constructed with characteristics similar to those of a cell of the CLN used in current technologies. The operating principle of the LCDs is based on the physical phenomenon known as Fréedericksz's transition, which is the change in orientation of the director vector of the nematic phase of the liquid crystal in the presence of an electric or magnetic field. The device used in this work consists of two glass substrates from which the surfaces were properly treated and glued, the space between the glass substrates is filled with liquid crystal thermotropic (CLT) in the nematic phase.

The electronic systems used to control the intensity of the optical signal were the Pulse Width Modulation (PWM), Amplitude variation of voltage and frequency variation, the latter being the most used in contrast control liquid crystal displays. The PWM system was obtained with a circuit based on a microcontroller PIC 16F628A, whereas the varying the control voltage amplitude and frequency was performed with a function generator.

The experimental measurements used to compare the control systems were performed in a spectrophotometer set to measure the transmittance of light that passed through the device with liquid crystal.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Orientação molecular dos cristais líquidos.	11
Figura 1.2 – Orientação das moléculas de CL.	11
Figura 1.3 – Representação de uma micela (a); fórmula química do laurato de potássio (b) . .	12
Figura 1.4 – Componentes de um mostrador de CL.	13
Figura 1.5 – Funcionamento de um <i>display</i> de CLNT e a orientação das moléculas.	14
Figura 2.1 – Representação da orientação de uma única molécula em relação ao referencial cartesiano.	17
Figura 2.2 – Representação das distorções (a) <i>splay</i> , (b) <i>twist</i> e (c) <i>bend</i>	23
Figura 2.3 – Geometria escolhida para a confecção das células de Cl.	28
Figura 2.4 – Ilustração das condições de contorno para transição de Fréedericksz	32
Figura 2.5 – Representação de como o diretor muda na presença do campo elétrico.	36
Figura 2.6 – Célula de cristal líquido nemático torcido.	37
Figura 2.7 – Célula de cristal líquido com $V < V_C$ em (a) e $V > V_C$ em (b).	38
Figura 3.1 – Estrutura molecular dos componentes que constituem o E7.	39
Figura 3.2 – Montagem experimental para medir o espaçamento no interior da célula de CL.	43
Figura 3.3 – As amostras montadas pelos métodos experimentais descritos nessa seção	43
Figura 3.4 – Circuito de uma fonte ligada uma carga através de uma chave.	44
Figura 3.5 – Gráfico da tensão em função do tempo aplicado a carga.	45
Figura 3.6 – Potência média aplicada a carga com a variação do ciclo ativo.	46
Figura 3.7 – Diagrama elétrico do circuito de ação PWM.	47
Figura 3.8 – Esquema de um espectrofotômetro.	48
Figura 3.9 – Ilustração do interior do espectrofotômetro usado no trabalho.	49
Figura 3.10 – Montagem experimental para medir o tempo de resposta das células de CL. . .	50

Figura 4.1 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 01.	52
Figura 4.2 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 02.	53
Figura 4.3 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 03.	54
Figura 4.4 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 04.	54
Figura 4.5 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 05.	55
Figura 4.6 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 06.	55
Figura 4.7 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 01.	56
Figura 4.8 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 02.	57
Figura 4.9 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 03.	57
Figura 4.10 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 04.	58
Figura 4.11 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 05.	59
Figura 4.12 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 06.	59
Figura 4.13 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 01.	60
Figura 4.14 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 02.	61
Figura 4.15 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 03.	61
Figura 4.16 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 04.	62
Figura 4.17 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 05.	63
Figura 4.18 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 06.	63
Figura 4.19 – Tempo de acionamento. Amostra comercial versus amostra 06.	64

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.	9
1.1 – Cristais Líquidos.	9
1.2 – Tipos de Cristais Líquidos.	10
1.2.1 – Cristais Líquidos Termotrópicos.	10
1.2.2 – Cristais Líquidos Liotrópicos.	12
1.3 – Mostrador de Cristal Líquido Nemático Torcido.	12
1.4 – Objetivos.	15
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica.	16
2.1 – Parâmetro de Ordem.	16
2.1.1 – Densidade de Energia Livre de Frank.	18
2.1.2 – Campo Elétrico.	23
2.1.3 – Campo Magnético.	26
2.2 – Condição de Contorno.	27
2.3 – Transição de Fréedericksz.	31
Capítulo 3 – Procedimento Experimental.	39
3.1 – Construção das Células de Cristal Líquido Nemático Torcido.	40
3.2 – Circuito de Ação PWM.	44

3.3 – Espectrofotometria.	47
3.4 – Tempo de Acionamento.	50
Capítulo 4 – Resultados Experimentais.	51
4.1 – Espessura Interna das amostras.	51
4.2 – Espectrofotometria.	51
4.2.1 – Transmitância Versus Ciclo Ativo (PWM).	51
4.2.2 – Transmitância Versus Amplitude de Tensão.	56
4.2.3 – Transmitância Versus Frequência.	60
4.3 – Tempo de Acionamento.	64
Capítulo 5 – Conclusões.	66
Bibliografia.	68

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Cristais Líquidos

O cristal líquido foi descoberto em 1888 por Friedrich Reinitzer [1], um bioquímico austríaco que estudava o colesterol extraído de cenouras [2]. Em sua pesquisa, observou alguns fenômenos físicos particulares do benzoato de colesterila ($C_{27}H_{45}C_7H_5O_2$), sendo que tal composto apresentava dois pontos de fusão distintos: 1) a $145,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o sólido tornava-se um líquido turvo; 2) continuando com o aquecimento da amostra, o líquido turvo tornava-se transparente a temperatura de $178,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sem saber do que se tratava tal fenômeno, Reinitzer pediu ajuda do físico Otto Lehmann [3], que na época estudava cristais. Lehmann colocou o composto cedido por Reinitzer em um microscópio de luz polarizada, e verificou que o líquido turvo apresentava birrefringência, propriedade apresentada por alguns tipos de cristais. Com base nesse fenômeno, Lehmann chamou o composto de: cristal que flui ou Cristal Líquido [2].

Cristal Líquido (CL) é um material que possui propriedades físicas intermediárias de um sólido cristalino e um líquido isotrópico. De forma prática, o cristal líquido apresenta a fluidez de um líquido e uma organização orientacional média de suas moléculas ou micelas (dependendo o tipo de CL empregado), como em um sólido cristalino.

Georges Friedel [4], no ano de 1922, em seu artigo *Os Estados Mesomorfos da Matéria*, introduziu uma nova terminologia para os CL referente as fases que podem ser encontrados na natureza. Os cristais líquidos viscosos passaram a chamar-se *esmético*, devido a predominância desse tipo de compostos nessa categoria. Os cristais líquidos que se apresentam em uma aparência turva são os *nemáticos* (filamento), pois quando observados em um microscópio apresentam filamentos. Já a variante quiral de um nemático é conhecida como *colestérico* [2].

1.2 – Classificação dos Cristais Líquidos

Existem duas classes de cristais líquidos: os termotrópicos e os liotrópicos. Estes são classificados de acordo com os parâmetros físicos que controlam a existência de suas fases líquido-cristalinas, tais como pressão e temperatura (termotrópico), e concentração efetiva e temperatura (liotrópico) [5]. Estas classes serão descritas a seguir.

1.2.1 – Cristais Líquidos Termotrópicos

As moléculas dos cristais líquidos termotrópicos (CLT) são, em geral, frequentemente representadas por “bastões rígidos” ou pequenos discos, dependendo do tipo de cristal líquido.

Neste trabalho, o cristal líquido usado é do tipo de bastões rígidos, que interagem entre si formando estruturas ordenadas distintas. Essa configuração das moléculas de CL é denominada de calamítica (cilindro) e, suas três principais mesofases são: nemático, colestérico e esmétrico. Existem, também, classificações para o cristal líquido esmétrico de acordo com o arranjo posicional e orientacional de suas moléculas.

Na fase nemática, as moléculas estão aleatoriamente posicionadas como em muitos líquidos, porém, essas moléculas estão direcionalmente correlacionadas, ou seja, estão alinhadas em uma direção preferencial, definida por um vetor unitário \vec{n} , conhecido como diretor. A figura 1.1 (a) representa o arranjo coletivo das moléculas do tipo bastão de um CL na fase nemática. Em geral, as moléculas nemáticas possuem simetria central, ou seja, suas propriedades físicas são as mesmas nas direções $+\vec{n}$ e $-\vec{n}$.

Os colestéricos assemelham-se aos cristais líquidos nemáticos em todas as propriedades físicas, exceto pelo fato de que as moléculas tendem a se orientar de modo helicoidal, como aparece na figura 1.1 (b). Por esta razão os colestéricos são conhecidos como cristais líquidos nemáticos quirais.

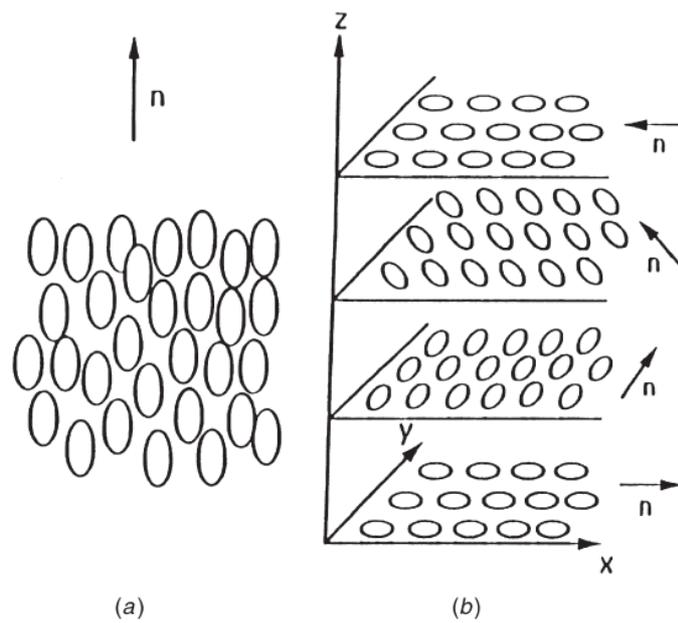


Figura 1.1 – Orientação molecular dos cristais líquidos: (a) nemático e (b) colestérico [5].

Cristais líquidos esméticos, diferentes dos nemáticos, possuem ordem translacional, isto é, a posição das moléculas está correlacionada em um mesmo padrão ordenado. Existem várias fases esméticas, porém as mais conhecidas e estudadas são a esmética A e a esmética C. A figura 1.2 ilustra a orientação das moléculas de CL dos tipos esmética A em (a) e esmética C em (b) [5].

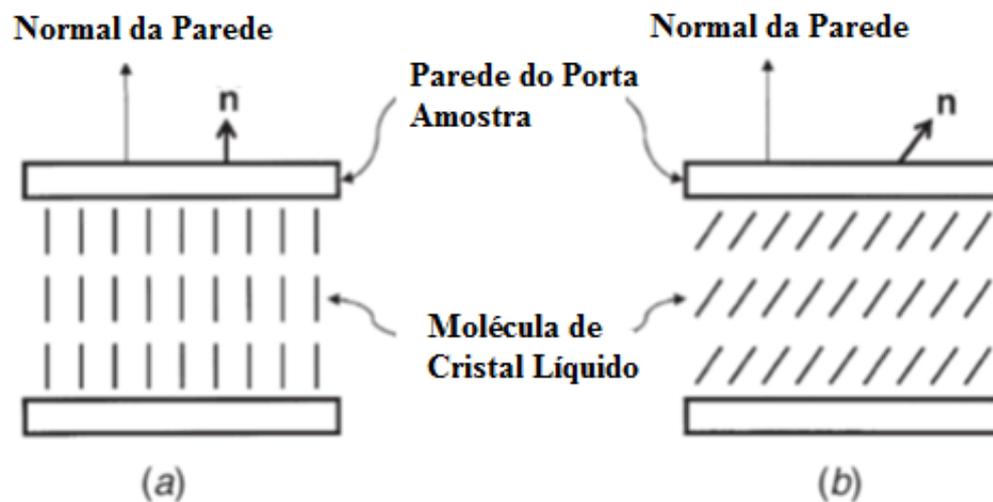


Figura 1.2 – Orientação das moléculas de CL: (a) esmético-A e (b) esmético-C [5].

1.2.2 – Cristais Líquidos Liotrópicos

Os cristais líquidos liotrópicos (CLL) são obtidos em sistemas formados por dois ou mais componentes que participam da solução soluto-solvente. Geralmente esses sistemas são formados por água e moléculas anfifílicas (moléculas que possuem uma parte hidrofílica que interage fortemente com a água, e uma parte hidrofóbica que é insolúvel em água). Tais moléculas, na presença do solvente e acima de uma concentração micelar crítica, agregam-se de forma especial que é denominada de micelas. A figura 1.3 (a) ilustra uma micela de CLL e a figura 1.3 (b) mostra a fórmula química do Laurato de Potássio.

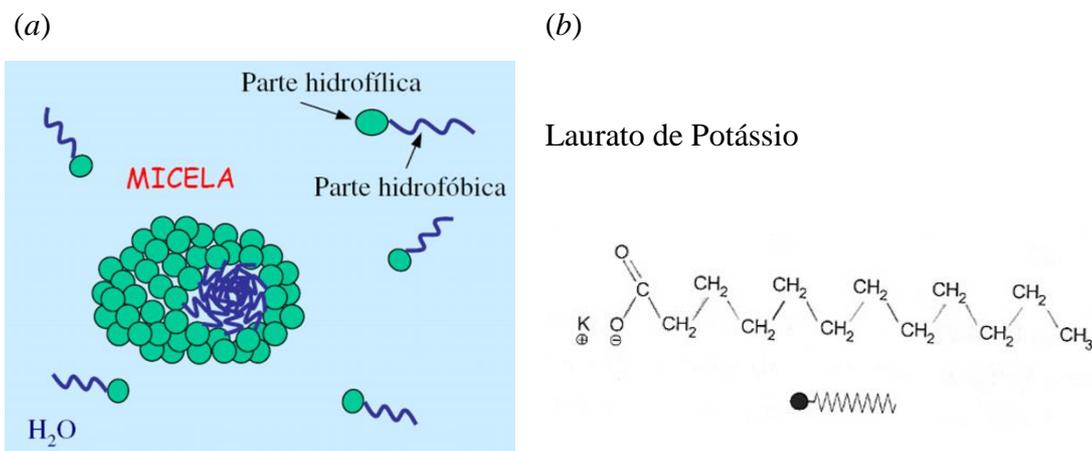


Figura 1.3 – Representação de uma micela (a); fórmula química do laurato de potássio (b).

1.3 – Mostrador de Cristal Líquido Nemático Torcido

Atualmente, atividades cotidianas exigem uma grande variedade de máquinas e equipamentos, facilitadores do trabalho humano. É importante haver a exibição de informações que auxiliam o uso desses equipamentos, e para tal fim, existem os mostradores (*displays*). Existem muitos tipos e modelos de mostradores, como LED (*Light Emissor Diode*), plasma e cristal líquido.

Neste trabalho, o princípio de funcionamento do *display* de CL com matriz passiva, o qual é usado em calculadoras, relógios e outros equipamentos, será descrito e analisado.

O princípio de funcionamento desse tipo de *display* está ligado a um fenômeno conhecido como Transição de Fréedericksz, que é o efeito pelo qual ocorre a mudança da orientação do diretor de um cristal líquido sob a ação de um determinado campo crítico, seja ele magnético ou elétrico. A priori, Fréedericksz descobriu esse fenômeno para o campo magnético, posteriormente outros pesquisadores observaram que o mesmo fenômeno ocorre com mais facilidade para o campo elétrico [5]. Tal fenômeno é relacionado com as constantes elásticas do material, com a espessura do mostrador de cristal líquido, com a intensidade do campo aplicado e a energia de ancoramento na superfície [6].

O *display* ou mostrador é constituído pelos seguintes materiais: dois polarizadores; dois substratos de vidro com uma camada de um óxido condutor transparente em uma das suas superfícies – geralmente o óxido utilizado é o *Indium Tin Oxide* (ITO – do inglês óxido de estanho com índio); um polímero para revestir uma das superfícies do substrato de vidro, por exemplo, o *Polyvinyl alcohol* (PVA); um cristal líquido termotrópico na fase nemática, o mais utilizado para esse tipo de *display* é o E7, que é a mistura de quatro cristais líquidos; e, por fim, um espelho. A figura 1.4 apresenta a disposição desses materiais em um mostrador de CL.

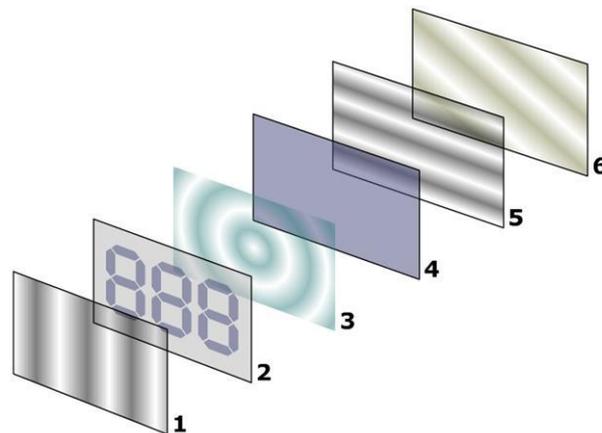


Figura 1.4 – Componentes de um mostrador de CL.

Esse tipo de mostrador não possui fonte de luz interna, portanto, é necessário que o ambiente esteja iluminado. De acordo com a figura 1.4, o polarizador representado em (1) faz com que a luz ambiente entre no *display* polarizada verticalmente, em (2) e (4) estão os substratos de vidro e, particularmente, o substrato representado em (2) passou por um processo de corrosão para formar os caracteres na camada com o ITO. Além da camada de ITO, os dois substratos

possuem uma camada de polímero, que passou por um polimento para criar microfissuras ao longo de uma direção, aonde o CL vai se ancorar. O *display* é construído em uma configuração que a direção das microfissuras fiquem perpendiculares entre os substratos. Essa configuração permite ao cristal líquido, representado em (3), orientar-se formando uma torção de 90° entre as moléculas de cristal líquido ancorados nas superfícies dos substratos. Essa torção serve para melhorar o contraste da amostra.

Devido a birrefringência do cristal líquido, a luz que penetrou polarizada verticalmente em (1) muda de direção e atravessa o polarizador (5); a luz resultante desse polarizador sai polarizada horizontalmente e em seguida atinge o espelho em (6) que é refletida e faz o trajeto contrário. Quando uma diferença de potencial é aplicada nos eletrodos de ITO, cria-se, então, um campo elétrico que faz com que as moléculas de cristal líquido mudem a direção de sua orientação, deixando as moléculas paralelas ao campo elétrico no interior do *display*. Devido a essa nova orientação a birrefringência do material se desfaz e a luz que adentrou polarizada verticalmente não atravessa o segundo polarizador formando uma região de sombra no espelho. A figura 1.5 apresenta o funcionamento de um mostrador de cristal líquido nemático torcido (CLNT) e, também, a orientação das moléculas de CL no interior do *display*.

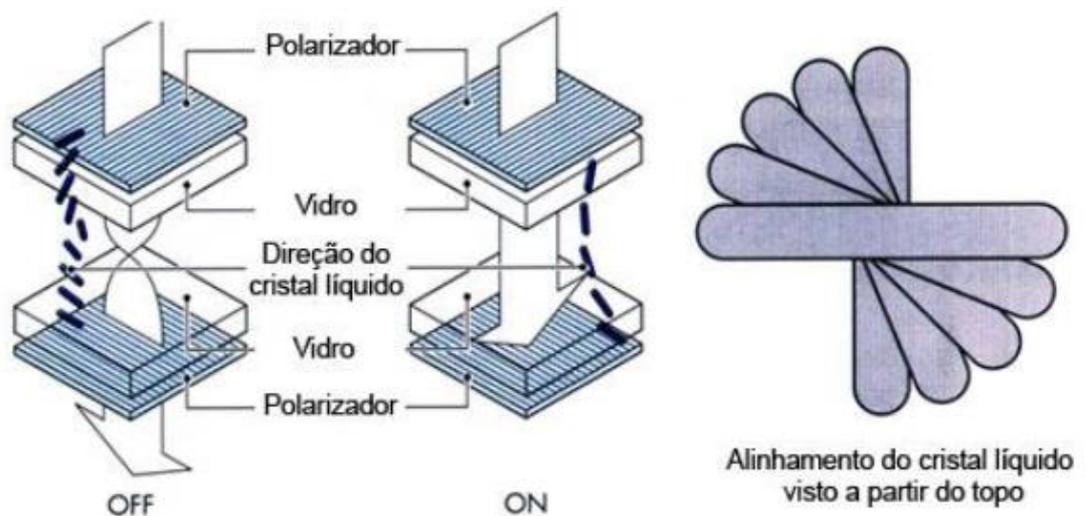


Figura 1.5 – Funcionamento de um *display* de CLNT e a orientação das moléculas.

1.4 - Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo construir e caracterizar as células de cristais líquidos, tendo como base a configuração de cristal líquido nemático torcido (CLNT), tais como são usadas em *displays*. As células foram preparadas com o auxílio do corpo técnico dos laboratórios do CTI Renato Archer em Campinas – SP, devido a complexidade no processo de construção. O CTI é uma referência no preparo e fabricação de *displays*, possui técnicas e equipamentos apropriados para tal finalidade.

Um circuito eletrônico, baseado em um micro controlador 16F628A, foi construído para controlar as amostras via ação de PWM, tal circuito foi importante na investigação da transmitância de luz nas células de CL.

Este trabalho compara o controle de intensidade por ação PWM das células de CL com a variação da frequência e, também, com a variação da amplitude do sinal aplicado as células de cristal líquido. A presente dissertação está organizada da seguinte maneira:

No capítulo 1, apresenta-se uma breve descrição sobre a descoberta e os tipos de cristais líquidos, além de uma rápida apresentação de como um *display* de cristal líquido nemático opera.

O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica necessária para o entendimento dos resultados obtidos nesse trabalho.

Os procedimentos experimentais utilizados, tais como a construção das células de CL, a construção do circuito de ação PWM e as descrições dos processos para a obtenção das medidas experimentais, são discutidas no capítulo 3.

No capítulo 4, encontram-se os resultados experimentais obtidos neste trabalho.

No capítulo 5, apresenta-se as conclusões deste trabalho.

2.1 – Parâmetro de Ordem

Como a fase nemática é menos simétrica do que a fase isotrópica, então, pode-se introduzir um parâmetro de ordem que possua as seguintes características usuais: que seja diferente de zero na fase nemática e se anule, por razões de simetria, na fase isotrópica [6]. Para definir um parâmetro de ordem escalar, primeiramente, é necessário estabelecer um modelo geométrico para a molécula de CL.

Assumindo que as moléculas sejam como longos bastões rígidos, como é mostrado na figura 2.1, o referencial do laboratório é definido pelas coordenadas cartesianas (x, y, z) e a direção \hat{z} é escolhida como a direção de \vec{n} . O vetor unitário \vec{a} indica a direção do eixo longo da molécula. Já a quantidade

$$\langle (\vec{n} \cdot \vec{a})^2 \rangle \tag{2.1}$$

é a medida da dispersão em torno de \vec{n} . Em uma fase perfeitamente ordenada tem-se que $\langle (\vec{n} \cdot \vec{a})^2 \rangle = 1$, desde que $\vec{n} = \vec{a}$. Por outro lado, na fase isotrópica em que as direções de \vec{a} estão distribuídas em probabilidades iguais em todas as direções do espaço, por tanto, $\langle (\vec{n} \cdot \vec{a})^2 \rangle = 1/3$. Para o caso mais simples em que $\vec{n} = \hat{z}$, obtém-se

$$\langle (\vec{n} \cdot \vec{a})^2 \rangle = \langle (\cos \theta)^2 \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta \cos^2 \theta \, d\theta \, d\varphi = \frac{1}{3} \tag{2.2}$$

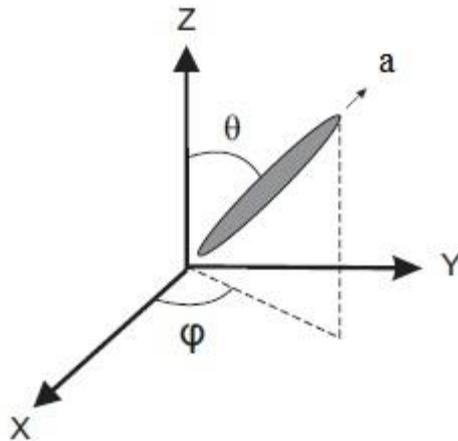


Figura 2.1 – Orientação de uma molécula em relação ao referencial cartesiano.

Esse resultado permite introduzir um parâmetro de ordem escalar da forma:

$$S = \frac{3}{2} \left[\langle (n \cdot a)^2 \rangle - \frac{1}{3} \right] = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle = \langle P_2(\cos \theta) \rangle \quad (2.3)$$

em que $S = 1$ para a fase nemática e desaparece ($S = 0$) na fase isotrópica. O parâmetro de ordem nemático é definido pela média estatística do segundo polinômio de Legendre ($P_2(\cos \theta)$). Pode-se ainda, obter a quantidade macroscópica conhecida como parâmetro de ordem tensorial \mathbf{Q} , onde os elementos deste tensor de ordem dois é representado por:

$$Q_{ij} = \frac{3}{2} S \left(n_i n_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \quad (2.4)$$

com n_i sendo a i -ésima componente do vetor diretor e δ_{ij} é a delta de Kronecker. Este tensor de ordem dois é um tensor Cartesiano, que pode ser representado por uma matriz quadrada, neste caso uma matriz 3x3. O traço do tensor \mathbf{Q} é dado por:

$$Tr \mathbf{Q} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \delta_{ij} Q_{ij} = \sum_{i=1}^3 Q_{ii} = 0 \quad (2.5)$$

sendo $\delta_{ii} = \delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33} = 3$ [7 – 10].

De modo a facilitar as manipulações matemáticas que se seguirão ao longo desta seção, será introduzida a notação de derivada da i -ésima componente do vetor \vec{a} com relação a j -ésima variável como:

$$\frac{\partial a_i}{\partial x_j} \equiv a_{i,j} \quad (2.6)$$

o divergente de \vec{a} fica representado por:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{a} = a_{i,i} \quad (2.7)$$

com o tensor de Levi-Civita, o rotacional do vetor \vec{a} pode ser expresso como:

$$\vec{\nabla} \times \vec{a} = (\epsilon_{ijk} a_{j,k})_i \quad (2.8)$$

2.1.1 – Densidade de Energia Livre de Frank

Para construir uma densidade de energia livre na ausência de campos externos, pode-se considerar o caso em que a ordem nemática é caracterizada por um parâmetro de ordem S . As deformações espaciais presentes no sistema surgem das variações locais do diretor. Isso quer dizer que, se \vec{n} é independente da posição, o meio nemático não está deformado. Por outro lado, levando em conta que \vec{n} seja dependente da posição, ou seja, $\vec{n} = \vec{n}(\vec{r})$, então o meio nemático pode ser considerado deformado. E nesse caso, as derivadas parciais dos componentes do diretor podem ser diferentes de zero:

$$n_{i,j} = \frac{\partial n_i}{\partial x_j} \neq 0$$

(2.9)

em que $n_{i,j}$ é chamado de tensor das deformações e ainda possui a seguinte propriedade:

$$n_i n_{i,j} = n_i \frac{\partial n_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \frac{\partial (n_i n_i)}{\partial x_j} = 0. \quad (2.10)$$

Existem expressões para a energia livre em que se consideram derivadas de ordem superiores, mas para este trabalho, esta aproximação é suficiente [10].

Considerando que o estado de referência f_0 não possua deformações na densidade de energia livre, sendo esta quantidade chamada de **termo uniforme** da densidade de energia livre que, em geral, depende do parâmetro de ordem S e da temperatura. Por simplicidade, assume-se que a densidade de energia livre pode ser completamente caracterizada pela primeira derivada dos componentes do diretor, podendo ser descrita pela seguinte forma:

$$f = f \left(\frac{\partial n_i}{\partial x_j} \right) = f(n_{i,j}) \quad (2.11)$$

Se as derivadas de \vec{n} são quantidades pequenas, ou seja, as deformações são pequenas na distância se comparadas com as dimensões moleculares, com isso a densidade de energia livre f pode ser expandida em séries de potência de $n_{i,j}$ em torno do estado sem deformações f_0 , podendo ser escrita como:

$$\begin{aligned} f &= f_0 + \left(\frac{\partial f}{\partial n_{i,j}} \right)_0 n_{i,j} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial n_{i,j} \partial n_{k,l}} \right)_0 n_{i,j} n_{k,l} + \dots \\ f &= f_0 + L_{ij} n_{i,j} + \frac{1}{2} K_{ijkl} n_{i,j} n_{k,l} \geq f_0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

onde se introduziu os dois tensores:

$$L_{ij} = \left(\frac{\partial f}{\partial n_{i,j}} \right)_0 \quad \text{e} \quad K_{ijkl} = \left(\frac{\partial^2 f}{\partial n_{i,j} \partial n_{k,l}} \right)_0 \quad (2.13)$$

o índice 0 indica que as derivadas são feitas no estado de referência f_0 . Os tensores elásticos \mathbf{L} e \mathbf{K} não são conhecidos, mas na prática, esses tensores podem ser escritos como combinações dos produtos dos componentes adequados de \vec{n} , δ_{ij} e ϵ_{ijk} . As componentes do tensor \mathbf{L} , de ordem dois, podem ser escritas da seguinte forma:

$$L_{ij} = L_1 n_i n_j + L_2 \delta_{ij} + L_3 n_k \epsilon_{ijk} \quad (2.14)$$

onde L_i , com $i = 1, 2$ e 3 , são escalares desconhecidos e n_i são as componentes do diretor \vec{n} [7]. O tensor de elementos Q_{ij} também pode ser escrito de forma similar

$$Q_{ij} = q_1 n_i n_j + q_2 \delta_{ij} + q_3 n_k \epsilon_{kij} \quad (2.15)$$

onde q_i (com o índice $i = 1, 2$ e 3) são escalares desconhecidos. Porém, a fase nemática requer que \vec{n} e $-\vec{n}$ descrevam situações fisicamente idênticas. Desse modo, Q_{ij} precisa ser simétrico, isto é, $Q_{ij} = Q_{ji}$. Esta propriedade não é satisfeita por δ_{ij} , pois é antissimétrica por construção, portanto $q_3 = 0$. É necessário que Q_{ii} seja nulo, lembrando que $\delta_{ii} = \delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33} = 3$, assim

$$Q_{ii} = q_1 + 3q_2 = 0 \rightarrow q_1 = -3q_2 \quad (2.16)$$

o que é fácil de observar que

$$Q_{ij} = q_1 \left(n_i n_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right). \quad (2.17)$$

Para o caso específico do tensor de componentes L_{ij} , observa-se que o primeiro termo é formado pelo produto de duas componentes de \vec{n} e, o segundo termo contém somente a delta de Kronecker. Esses dois termos, quando substituídos na eq. (2.12), trazem contribuições na

densidade de energia livre que violam o requisito da indistinguibilidade entre o estado descrito por \vec{n} e $-\vec{n}$. Para que a simetria levada em conta fique adequada na construção da densidade de energia livre f , escolhe-se $L_1 = L_2 = 0$. Dessa maneira, apenas o último termo contribui linearmente na primeira derivada para a densidade de energia livre f , que fica da seguinte forma:

$$f_1 = L_{ij}n_{i,j} = L_3 n_k \epsilon_{kij} n_{i,j} \quad (2.18)$$

onde

$$\epsilon_{kin} n_{i,j} = -(\vec{\nabla} \times \vec{n})_k$$

ou seja, o produto do tensor de Levi-Civita com a derivada parcial do diretor é igual a componente k do rotacional de \vec{n} , como foi representado na eq. (2.8). Assim, levando em conta a soma dos índices, tem-se

$$f_1 = -L_3 (\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{n}). \quad (2.19)$$

Agora, considerando o tensor de ordem quatro $K_{ijkl} = K_{klij}$. Um tensor desse tipo é formado por oitenta e uma componentes [7]. Ele pode ser decomposto de forma similar ao que foi feito a L_{ij} . Tal decomposição resulta em:

$$\begin{aligned} K_{ijkl} = & k_1 n_i n_j n_k n_l + k'_2 n_i n_j \delta_{kl} + k''_2 n_k n_l \delta_{ij} + k_3 n_i n_k \delta_{jl} + k'_4 n_i n_l \delta_{jk} + k''_4 n_j n_k \delta_{kl} \\ & + k_5 n_j n_l \delta_{ik} + k_6 \delta_{ij} \delta_{kl} + k_7 \delta_{ik} \delta_{jl} + k_8 \delta_{il} \delta_{jk} \end{aligned} \quad (2.20)$$

quando K_{ijkl} é inserido na expressão da densidade de energia livre, todos os índices são somados e os termos marcados com (\prime) e ($\prime\prime$) contribuem de forma idêntica e, para facilitar, podem ser reduzido a um de cada. Assim a expressão (2.20) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
K_{ijkl} = & k_1 n_i n_j n_k n_l + \frac{1}{2} k_2 (n_i n_j \delta_{kl} + n_k n_l \delta_{ij}) + k_3 n_i n_k \delta_{jl} + \frac{1}{2} k_4 (n_i n_l \delta_{jk} + n_j n_k \delta_{kl}) \\
& + k_5 n_j n_l \delta_{ik} + k_6 \delta_{ij} \delta_{kl} + k_7 \delta_{ik} \delta_{jl} + k_8 \delta_{il} \delta_{jk}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

diferentemente do que foi feito na decomposição de L_{ij} , para K_{ijkl} o tensor Levi-Cevita não precisa ser empregado [10]. Levando em consideração que $(\vec{n} \cdot \vec{n}) = n_i n_i = 1$, os termos da forma $n_i n_{i,j}$ desaparecerão, devido a propriedade expressa em (2.10) [5]. Desse modo, quando a expressão (2.21) é substituída na expressão (2.12), verifica-se que $k_i = 0$, para $i = 1, 2, 3$ e 4 . Os termos restantes ficam:

$$\begin{aligned}
n_j n_l \delta_{ik} n_{i,j} n_{k,l} &= (\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 \\
\delta_{ij} \delta_{kl} n_{i,j} n_{k,l} &= n_{i,i} n_{k,k} = (\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 \\
\delta_{ik} \delta_{jl} n_{i,j} n_{k,l} &= n_{k,j} n_{k,j} = (\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 + (\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 \\
\delta_{il} \delta_{jk} n_{i,j} n_{k,l} &= n_{i,j} n_{j,l} = (\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 - \vec{\nabla} \cdot (\vec{n} \vec{\nabla} \cdot \vec{n} + \vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})
\end{aligned}$$

Reagrupando os termos e deixando em evidência os operadores em comum, a densidade de energia livre expressa em (2.12) pode ser representada por:

$$\begin{aligned}
f = & \frac{1}{2} K_{11} (\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 \\
& - (K_{22} + K_{24}) \vec{\nabla} \cdot (\vec{n} \vec{\nabla} \cdot \vec{n} + \vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})
\end{aligned} \tag{2.22}$$

onde

$$K_{11} = k_6 + k_7 + k_8, \quad K_{22} = k_7, \quad K_{33} = k_5 + k_7 \quad \text{e} \quad K_{24} = k_8.$$

A expressão (2.22) fornece a energia por unidade de volume da fase nemática, o último termo representa as contribuições da superfície e pode ser ignorado [10]. Assim (2.22) fica:

$$f_{Frank} = \frac{1}{2} K_{11} (\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})^2.$$

(2.23)

A expressão (2.23) é a expressão de Frank (proposta em 1958) para a densidade de energia livre, isto é, a energia livre por unidade de volume de um nemático deformado. As quantidades K_{11} , K_{22} , K_{33} e $(K_{22} + K_{24})$ são conhecidas como constantes elásticas, *splay* (afunilamento), *twist* (torção), e *bend* (flexão) respectivamente. Em geral, utiliza-se a aproximação de constante única ($K_{11} = K_{22} = K_{33} = K$) para facilitar o desenvolvimento matemático.

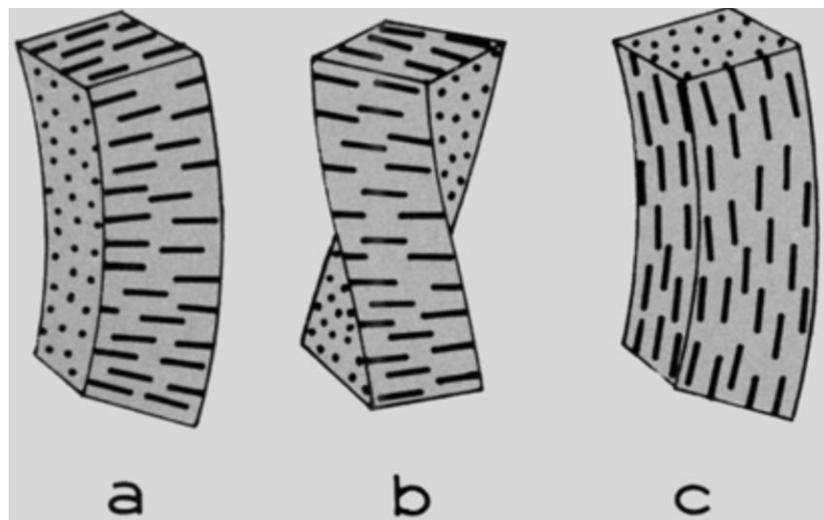


Figura 2.2 – Representação das distorções (a) “*splay*”, (b) “*twist*” e (c) “*bend*” [11].

2.1.2 – Campo Elétrico

Este é o estudo do que acontece com a densidade de energia elástica no volume, em termos das primeiras derivadas espaciais de \vec{n} , quando se aplica um campo externo \vec{E} . Neste caso, a densidade de energia elástica também depende das componentes do campo elétrico aplicado E_i , chamando então de $f = f(n_{i,j}, E_i)$. Expandindo em série de potência, obtêm-se os estados termodinâmicos da seguinte forma:

$$f = f_0 + \frac{1}{2} K_{ijkl} n_{i,j} n_{k,l} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ij} E_i E_j - e_{ijk} n_{i,j} E_k \quad (2.24)$$

o segundo termo da eq. (2.24) representa a energia dielétrica usual, decompondo ε_{ij} de acordo com regras gerais, obtêm-se

$$\varepsilon_{ij} = an_in_j + b\delta_{ij} \quad (2.25)$$

onde a e b são duas constantes a se determinar, dado o simples cálculo:

$$\varepsilon_{ii} = a + 3b$$

e

$$n_in_j\varepsilon_{ij} = a + b$$

onde ε_{ii} é o traço de ε_{ij} . Em uma configuração onde a referência local em que \vec{n} está no eixo z , como considerado anteriormente, o tensor ε_{ij} fica diagonal na seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix}. \quad (2.26)$$

Como os cristais líquidos nemáticos são cristais uniaxiais, tem-se que $\varepsilon_{ii} = 2\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_{\parallel}$ e $n_in_j\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{\parallel}$. Conseqüentemente as constantes a e b de (2.25) ficam:

$$a = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} = \varepsilon_a \quad \text{e} \quad b = \varepsilon_{\perp}$$

a quantidade ε_a é conhecida como anisotropia dielétrica [10]. Assim ε_{ij} pode ser representado por:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_a n_in_j + \varepsilon_{\perp} \delta_{ij}. \quad (2.27)$$

E o segundo termo que aparece em (2.24) pode ser escrita como

$$\frac{1}{2} \varepsilon_{ij} E_i E_j = \frac{1}{2} \varepsilon_a (\vec{n} \cdot \vec{E})^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{\perp} \vec{E}^2 \quad (2.28)$$

o último argumento pode ser reescrito em função da polarização na forma $-P_k E_k$, onde:

$$P_k = e_{ijk} n_{i,j} \quad (2.29)$$

que pode ser dita como uma polarização induzida pela deformação. A eq. (2.29) é equivalente à polarização em um material piezoelétrico. As quantidades e_{ijk} são as componentes do tensor flexoelétrico e , cuja decomposição usual é definida por:

$$e_{ijk} = e_1 n_i n_j n_k + e_2 n_i \delta_{jk} + e_3 n_j \delta_{ik} + e_4 n_k \delta_{ij}. \quad (2.30)$$

Onde se leva em conta que e_{ijk} precisa ser ímpar em \vec{n} [7], o que leva a $n_i n_{i,j} = 0$. Substituindo (2.30) em (2.29) se obtêm:

$$P_k = e_3 n_j \delta_{ik} n_{i,j} + e_4 n_k \delta_{ij} n_{i,j} \quad (2.31)$$

lembrando que

$$n_j \delta_{ik} n_{i,j} = n_j n_{k,j} = -(\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})_k \quad \text{e} \quad n_k \delta_{ij} n_{i,j} = n_k n_{i,i} = n_k (\vec{\nabla} \cdot \vec{n}).$$

Portanto a polarização fica na forma:

$$\vec{P} = e_4 \vec{n} (\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) - e_3 (\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})$$

renomeando os coeficientes e_4 para e_{11} e e_3 para e_{33} . Então:

$$\vec{P} = e_{11}\vec{n}(\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) - e_{33}(\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n}). \quad (2.32)$$

A eq. 2.32 foi primeiramente proposta por Meyer em 1969 [12]. A interação intermolecular da polarização elétrica é dada em termos de um dipolo, ou seja, consideram-se formas particulares para as moléculas que constituem a fase líquido-cristalina nemática. Portanto, pode-se reescrever a densidade de energia livre em função das contribuições elétricas de um nemático, de acordo com a referência [10], na forma:

$$f = f_0 + \frac{1}{2}K_{ijkl}n_{i,j}n_{k,l} - \frac{1}{2}\varepsilon_a(\vec{n} \cdot \vec{E})^2 - \vec{P} \cdot \vec{E} \quad (2.33)$$

ou

$$f = \frac{1}{2}K_{11}(\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_{22}(\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_{33}(\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 - \frac{1}{2}\varepsilon_a(\vec{n} \cdot \vec{E})^2 \quad (2.34)$$

2.1.3 – Campo Magnético

Ao aplicar um campo magnético \vec{H} em um cristal líquido nemático (CLN), a energia de interação pode ser apresentada da seguinte forma:

$$-\frac{1}{2}\chi_{ij}H_iH_j \quad (2.35)$$

onde χ_{ij} é o tensor permissividade diamagnética. Ao se decompor χ_{ij} obtêm-se

$$\chi_{ij} = \chi_a n_i n_j + \chi_{\perp} \delta_{ij}. \quad (2.36)$$

Nos compostos de CLN, usualmente a anisotropia da susceptibilidade magnética χ_a é maior que zero, dessa forma a eq. (2.35) fica:

$$-\frac{1}{2}\chi_a(\vec{n} \cdot \vec{H})^2 \quad (2.37)$$

este termo que descreve a interação magnética equivalente ao que foi feito para o caso do campo elétrico [7]. A grande maioria dos cristais líquidos é diamagnética e responde muito fracamente ao campo magnético aplicado. De forma semelhante ao caso do campo elétrico, a densidade de energia livre para o campo magnético é dada por [10]:

$$f = \frac{1}{2}K_{11}(\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_{22}(\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2}K_{33}(\vec{n} \times \vec{\nabla} \times \vec{n})^2 - \frac{1}{2}\chi_a(\vec{n} \cdot \vec{H})^2. \quad (2.38)$$

2.2 – Condição de Contorno

Neste trabalho utilizou-se uma geometria em que as células (porta amostra) de CL eram formadas por duas placas paralelas finas, espaçadas a uma distância d uma da outra, sendo que essa distância é muito menor se comparadas com as outras dimensões da célula de CL (figura 2.3). Tal geometria também é conhecida como “slab”.

Para facilitar o desenvolvimento teórico, que as placas estão situadas em $z = \pm d/2$. Supondo que $\theta(\mathbf{r}) = \theta(z)$ e, ainda, pode-se considerar que o diretor possui deformações apenas no plano x - z , de modo que $\varphi = 0$. A direção fácil imposta pelas superfícies da célula é perpendicular ao eixo z , desse modo $\theta(z = \pm d/2) = \theta = \pi/2$.

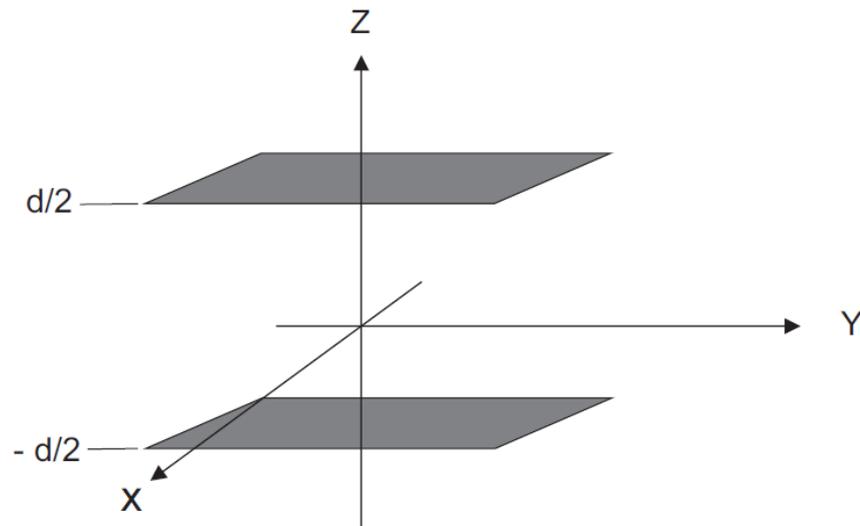


Figura 2.3 – Geometria escolhida para a confecção das células de CL.

As moléculas de CL interagem com a superfície, e essa interação pode ser explicada pelo tipo de energia de ancoramento entre a molécula e a superfície da célula. Existem dois tipos de ancoramento: o fraco e o forte. Para as manipulações matemáticas neste trabalho, será usado apenas o ancoramento forte, pois é o que ocorre nos displays de CLNT, devido ao tratamento com polímero nas superfícies dos substratos de vidro. Para este caso particular de ancoramento, a energia elástica total por unidade de área pode ser construída como:

$$F[\theta(z)] = \int_{-d/2}^{d/2} f(\theta, \theta') dz + f_{s1}(\theta_1) + f_{s2}(\theta_2) \quad (2.39)$$

Onde $\theta(z)$ caracteriza a deformação e $\theta'(z) = d\theta/dz$ é o equivalente para o tensor de deformação. E ainda se tem $f(\theta, \theta')$ sendo a densidade de energia livre, a mesma calculada anteriormente, f_{s1} e f_{s2} são, respectivamente, as energias de superfície em $z = -d/2$ e $z = d/2$. De forma análoga, $\theta_1 = \theta(z = -d/2)$ e $\theta_2 = \theta(z = d/2)$ são os ângulos de inclinação assumidos nas superfícies [7]. Levando em conta a contribuição do volume, obtém-se:

$$F[\theta(z)] = \int_{-d/2}^{d/2} f(\theta, \theta') dz \quad (2.40)$$

é necessário encontrar a função $\theta(z)$, que seja contínua e que, também, sua derivada seja contínua. Para minimizar a eq. (2.40) precisa-se levar em conta às condições de contorno, assim:

$$\theta_1 = \theta(z = -d/2) = \theta_1 \quad \text{e} \quad \theta_2 = \theta(z = d/2) = \theta_2.$$

Escolhendo a função $\vartheta(z)$ de modo a minimizar (2.40) e que também satisfaça as condições de contorno, tem-se

$$\delta\theta(z) = \theta(z) - \vartheta(z) \tag{2.41}$$

sendo

$$|\delta\theta(z)| \ll 1, \quad \forall z \in \left[-\frac{d}{2}, \frac{d}{2}\right].$$

escolhendo $\theta(z)$ próximo de $\vartheta(z)$, observa-se que:

$$\theta(z) = \vartheta(z) + \alpha v(z) \tag{2.42}$$

onde $v(z)$ é uma função arbitrária e α é um pequeno parâmetro qualquer a se determinar [7]. Substituindo (2.42) em (2.40):

$$F[\theta(z)] = \int_{-d/2}^{d/2} f[\vartheta(z) + \alpha v(z), \vartheta'(z) + \alpha v'(z); z] dz \tag{2.43}$$

a equação (2.43) mostra que $F[\theta(z)]$ é uma função ordinária com parâmetro α , e diferenciando em α , com $\alpha = 0$, é um mínimo. Assim:

$$\left\{ \frac{d}{d\alpha} \int_{-d/2}^{d/2} f[\vartheta(z) + \alpha v(z), \vartheta'(z) + \alpha v'(z); z] dz \right\}_{\alpha=0} = 0 \quad (2.44)$$

como α independe de z e usando as regras matemáticas apropriadas, a eq. (2.44) pode ser reescrita como:

$$\int_{-d/2}^{d/2} \left[\frac{\partial f}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} + \frac{\partial f}{\partial \theta'} \frac{\partial \theta'}{\partial \alpha} \right]_{\alpha=0} dz = 0 \quad (2.45)$$

onde

$$\frac{\partial \theta(z)}{\partial z} = v(z) \quad \text{e} \quad \frac{\partial \theta'}{\partial \alpha} = v'(z)$$

assim

$$\int_{-d/2}^{d/2} \left[\frac{\partial f}{\partial \vartheta} v(z) + \frac{\partial f}{\partial \vartheta'} v'(z) \right]_{\alpha=0} dz = 0 \quad (2.46)$$

a eq. (2.46) mostra que $\vartheta(z)$ minimiza F apenas se a primeira variação de F for definida por

$$\delta_1 F = \left(\frac{\partial F}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=0}$$

que desaparece para qualquer $v(z)$, e ainda se tem:

$$\frac{\partial f}{\partial \vartheta'} v'(z) = \frac{d}{dz} \left[\frac{\partial f}{\partial \vartheta'} v'(z) \right] - \left[\frac{d}{dz} \frac{\partial f}{\partial \vartheta'} \right] v(z)$$

que pode ser reescrito como:

$$\int_{-d/2}^{d/2} \left[\frac{\partial f}{\partial \vartheta} - \frac{d}{dz} \frac{\partial f}{\partial \vartheta'} \right] v(z) dz + \left[\frac{\partial f}{\partial \vartheta'} v'(z) \right]_{-d/2}^{d/2} = 0. \quad (2.47)$$

Para o ancoramento forte, os valores de $\vartheta(z = \pm d/2)$ são fixos, implicando que $\vartheta(z)$ e $\theta(z)$ satisfação às condições de contorno consideradas acima. Levando em conta (2.42), conclui-se que $v(z)$ também precisa satisfazer as condições de contorno, dessa forma:

$$v(z = \pm d/2) = 0$$

consequentemente (2.46) pode ser reescrita de modo que:

$$\int_{-d/2}^{d/2} \left[\frac{\partial f}{\partial \vartheta} - \frac{d}{dz} \frac{\partial f}{\partial \vartheta'} \right] v(z) dz = 0 \quad (2.48)$$

a eq. (2.48) minimiza F e é solução da equação de Euler-Lagrange [7].

$$\frac{\partial f}{\partial \vartheta} - \frac{d}{dz} \frac{\partial f}{\partial \vartheta'} = 0, \quad \forall z \in \left(-\frac{d}{2}, +\frac{d}{2} \right) \quad (2.49)$$

2.3 – Transição de Fréedericksz

Em 1926, Fréedericksz descobriu, experimentalmente, que ao aplicar um campo magnético em uma amostra de cristal, a orientação do vetor diretor \vec{n} mudava [6]. Posteriormente, foi visto que o mesmo efeito ocorria também com o campo elétrico. Os experimentos de Fréedericksz conduziram a seguinte lei:

$$H_c = \frac{\pi}{d} \left(\frac{K}{\chi_a} \right)^{1/2} = \text{constante} \quad (2.50)$$

onde H_c é o campo magnético crítico para ocorrer a transição, d é a espessura da amostra, K é a aproximação de constante elástica única e χ_a é a anisotropia da susceptibilidade magnética [13].

Portanto, a transição de Fréedericksz é a mudança na orientação do vetor diretor de um CL, na presença de campos magnético ou elétrico. Tal efeito ocorre a partir de um campo crítico (a eq. 2.50 apresenta o campo crítico para o caso do campo magnético). Os parâmetros de controle para que ocorra a transição são: o campo aplicado e o parâmetro de ordem para um valor máximo do ângulo de inclinação [7].

Neste trabalho, faz-se o uso do campo elétrico, pois é a base de funcionamento dos mostradores de CL utilizados hoje em dia, e também do protótipo que será descrito no capítulo seguinte. Devido ao processo de preparo das células de CLN, a descrição matemática para a transição de Fréedericksz, que será realizada a seguir, usa as condições de contorno descritas na seção anterior e levando em conta apenas o ancoramento forte (figura 2.4).

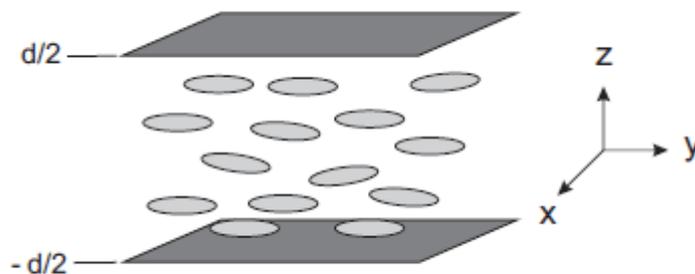


Figura 2.4 – Ilustração das condições de contorno para transição de Fréedericksz.

A célula de CLN com espessura d possui uma direção fácil de alinhamento das moléculas de modo a ficarem paralelas às superfícies internas da célula de CL. Pode-se assumir que o diretor muda de direção apenas no plano xz , de forma que $\vec{n} = \sin \theta(z)\mathbf{i} + \cos \theta(z)\mathbf{k}$, onde $\theta(z)$ é o ângulo de inclinação em relação ao eixo z , \mathbf{i} e \mathbf{k} são vetores unitários ao longo dos eixos x e z respectivamente. O campo elétrico aplicado é paralelo ao eixo z , ou seja, $\vec{E} = E\mathbf{k}$, sendo E constante [7]. A contribuição do campo elétrico aplicado ao CL pode ser escrita como:

$$f_E = -\frac{1}{2}\varepsilon_a E^2 \sin^2 \theta \quad (2.51)$$

onde ε_a é a anisotropia dielétrica, sendo $\varepsilon_a > 0$, pois as moléculas de CLN tendem a alinhar-se paralelamente ao campo aplicado [7]. Assim, fazendo-se uma aproximação constante, assume-se que a densidade de energia livre no volume juntamente com a contribuição do campo aplicado é dada por:

$$f = \frac{1}{2}K \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 - \frac{1}{2}\varepsilon_a E^2 \sin^2 \theta \quad (2.52)$$

integrando a expressão (2.52) em z , no intervalo de integração de $-d/2$ a $d/2$, encontra-se a energia total por unidade de volume da amostra, dada por:

$$F[\theta(z)] = \int_{-d/2}^{d/2} \left[\frac{1}{2}K \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 - \frac{1}{2}\varepsilon_a E^2 \sin^2 \theta \right] dz \quad (2.53)$$

lembrando que $\theta(z = \pm d/2) = \theta = \pi/2$ e fazendo a normalização em que $d\theta/dz = 0$ para $z = 0$ e $\theta(0) = \theta_m$, onde θ_m é a inclinação máxima do diretor. Dessas considerações, pode-se deduzir que $\theta(z)$ é solução da equação de Euler-Lagrange minimizando (2.53), tal que:

$$K\theta''(z) - \varepsilon_a E^2 \sin\theta \cos\theta = 0$$

ou, isolando $\theta''(z)$

$$\theta''(z) = \frac{1}{\xi^2} \sin\theta \cos\theta \quad (2.54)$$

onde

$$\xi = \sqrt{\frac{K}{\varepsilon_a E^2}}$$

e ξ é o comprimento de coerência dielétrica [10]. A integral pode ser resolvida com a multiplicação de ambos os lados da eq. (2.54) por $\theta'(z)$, e reorganizando para que fique na seguinte forma:

$$\theta''(z)\theta'(z) = \frac{1}{\xi^2} \sin\theta \cos\theta \theta'(z) \rightarrow \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{2} (\theta'(z))^2 + \frac{1}{2\xi^2} \sin^2\theta \right] = 0$$

no que implica em

$$(\theta'(z))^2 + \frac{1}{\xi^2} \sin^2\theta = C. \tag{2.55}$$

Onde C é uma constante de integração. A situação de ancoramento nas duas placas é idêntica por construção, portanto $\theta(z)$ é uma função par com máximo em $z = 0$. Assim as normalizações descritas anteriormente, onde, $\theta'(z = 0) = 0$ e $\theta(0) = \theta_m$, que corresponde ao máximo de θ . Isso quer dizer que se $\theta_m = 0$, então $\theta(0) = 0$ e a amostra está totalmente orientada, mas se $\theta_m \neq 0$, então $\theta(z) = f(z)$ e a amostra está distorcida [10]. Seguindo esse pensamento é possível determinar a constante C , que é dada por:

$$C = \frac{1}{\xi^2} \sin^2\theta_m \tag{2.56}$$

de forma que (2.55) pode ser reescrita como:

$$\left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 = \frac{1}{\xi^2} (\sin^2\theta_m - \sin^2\theta) \tag{2.57}$$

Extraindo a raiz quadrada de ambos os lados e usando a técnica da separação de variáveis para resolver (2.57), obtêm-se:

$$\int_0^{\theta_m} \frac{d\theta}{\sqrt{\text{sen}^2\theta_m - \text{sen}^2\theta}} = \pm \frac{1}{\xi} \left(z + \frac{d}{2} \right). \quad (2.58)$$

Onde o sinal + leva a solução da metade inferior da amostra, e em quanto o sinal – leva a solução da metade superior. Sendo uma solução par, pode-se usar a parte positiva, fazendo com que a eq. (2.58) seja usada para determinar a função $\theta(z)$ [10]. Assim:

$$\int_0^{\theta_m} \frac{d\theta}{\sqrt{\text{sen}^2\theta_m - \text{sen}^2\theta}} = \pm \frac{d}{2\xi} \quad (2.59)$$

usando a seguinte mudança de variável, $\text{sen } \theta = \text{sen}\theta_m \text{sen}\psi$ para $\theta_m \neq 0$, o elemento de integração fica:

$$d\theta = \frac{\text{sen}\theta_m \cos\psi \, d\psi}{\sqrt{1 - \text{sen}^2\theta_m \text{sen}^2\psi}}$$

assim, a eq. (2.59) fica:

$$\int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - \text{sen}^2\theta_m \text{sen}^2\psi}} = \mathcal{K}[\text{sen}^2\theta_m] = \frac{d}{2\xi} \quad (2.60)$$

onde $\mathcal{K}[\text{sen}^2\theta_m]$ é a integral elíptica completa, isto é

$$\mathcal{K}[m] = F\left[m \mid \frac{\pi}{2}\right] = \int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - m \text{sen}^2\psi}} \quad (2.61)$$

Para que a eq. (2.58) possua solução diferente da trivial, deve-se tomar o limite de $\theta_m \rightarrow 0$ na eq. (2.60), o que resulta em

$$\pi = \frac{d}{\xi_c} \quad (2.62)$$

onde ξ_c é aquele para o qual $\theta_m \rightarrow 0$, e pode se obter o campo elétrico crítico dado por:

$$E_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K}{\epsilon_a}}. \quad (2.63)$$

A eq. (2.63) fornece um valor crítico para a intensidade do campo elétrico aplicado. Se $E < E_c$, o diretor orienta-se paralelo às placas, essa orientação é resultado da interação nemática e da orientação imposta pela superfície. Para $E > E_c$, existe uma competição entre as interações elásticas do meio e a força elétrica devido ao campo, na região onde $z = 0$, no meio da amostra, o efeito da superfície é mais fraco e, conseqüentemente, o campo distorce a orientação do diretor, tal distorção vai se difundindo até as superfícies à medida que a intensidade do campo aplicado aumenta [10]. A figura 2.5 mostra como a distorção ocorre dentro da célula de CL para as situações onde $E < E_c$ e $E > E_c$.

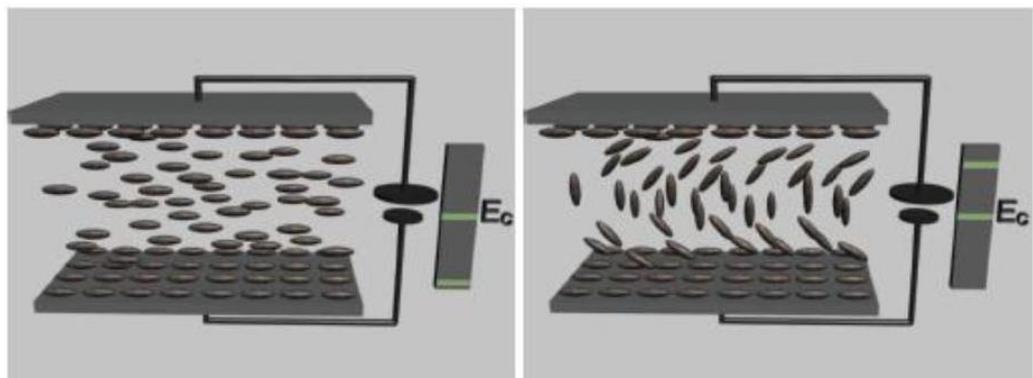


Figura 2.5 – Representação de como o diretor muda na presença do campo elétrico nas situações onde $E < E_c$ e $E > E_c$ respectivamente [10].

Lembrando que a diferença de potencial é definida por:

$$V = E d \quad (2.64)$$

Dessa maneira a diferença de potencial (V_c) crítica para ocorrer à transição de Fréedericksz é dada por:

$$V_c = \pi \sqrt{\frac{K}{\epsilon_0 \epsilon_a}} \quad (2.65)$$

onde K é uma aproximação das constantes elásticas do material. Para a maioria dos cristais líquidos termotrópicos $K \sim 10^{-11}$ N, $\epsilon_a \sim 11$ e $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m. De modo que a diferença de potencial crítica é da ordem de 1,0V [6, 14].

Para a geometria escolhida para a montagem da célula de CL, em que as moléculas de CL no interior da amostra estão torcidas, formando um ângulo de 90° entre as superfícies da célula (figura 2.6), a equação que melhor descreve a transição de Fréedericksz é dada por [13]:

$$V_c = \pi \sqrt{\frac{K_{11} + (K_{33} + 2K_{22})}{4\epsilon_0 \epsilon_a}}$$

Os valores típicos para as três constantes elásticas são: $K_{11} = 10^{-11}$ N, $K_{22} = 5,4 \times 10^{-12}$ N e $K_{33} = 1,6 \times 10^{-12}$ N. De modo que a diferença de potencial crítica V_c ocorre em torno de 1,1 V [13].

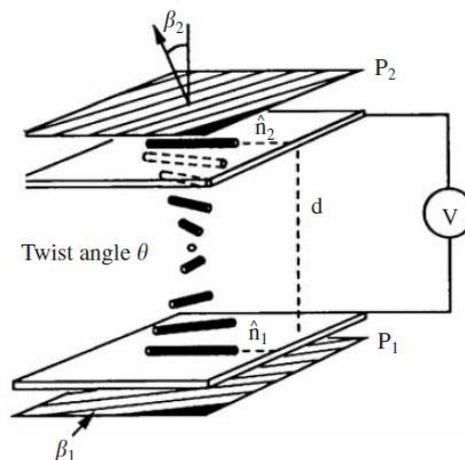


Figura 2.6 – Célula de cristal líquido nemático torcido [13].

A figura 2.7 mostra uma das células de CL utilizadas nesse trabalho, onde é possível observar que em (a) a ddp aplicada é menor que a ddp crítica ($V < V_C$) e a célula fica translúcida, já em (b) a ddp aplicada é maior que a ddp crítica ($V > V_C$) e a célula fica opaca.

(a)



(b)



Figura 2.7 – Foto da Célula de cristal líquido com $V < V_C$ em (a) e $V > V_C$ em (b).

Capítulo 3 – Procedimento Experimental

Este trabalho está dividido em três partes distintas, que são: 1) a confecção das células de CLN; 2) a construção da fonte eletrônica com controle de PWM; e, 3) as medidas experimentais para caracterização das amostras que, conseqüentemente, serviram para comparação entre os métodos de controle usados em dispositivos baseados em nemáticos.

Foram utilizados dois cristais líquidos termotrópicos nesse trabalho, o 5CB (*4'-Pentyl-4-biphenylcarbonitrile*) e o E7, que é uma mistura de quatro tipos de cristal líquido, a proporção de sua constituição é: 51% de *4-ciano-4'-n-pentilbifenila* (5CB), 25% de *4-ciano-4'-n-heptilbifenila* (7CB), 16% de *4-ciano-4'-n-octiloxibifenila* (8OCB) e 8% de *4-ciano-4-n-pentil-p-terfenila* (5CT). A figura 3.1 mostra a estrutura molecular dos cristais líquidos que formam o E7 [15].

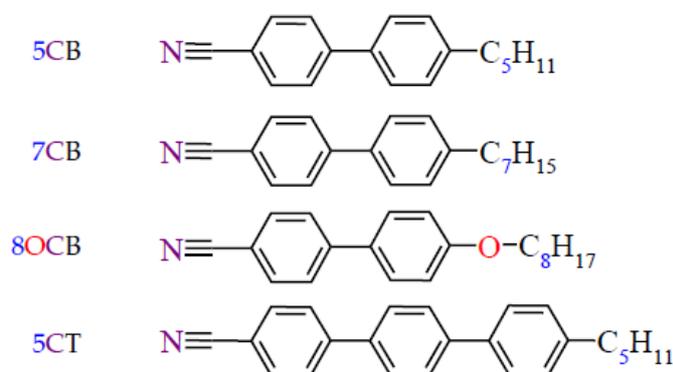


Figura 3.1 – Estrutura molecular dos componentes que constituem o E7.

A tabela 3.1 traz alguns parâmetros físicos dos dois cristais líquidos usados neste trabalho [15 a 18].

Composto	Transição N – I (°C)
5CB	35,0
E7	58,4

Tabela 3.1 – Parâmetros físicos dos cristais líquidos 5CB e E7.

3.1 – Construção das Células de Cristal Líquido Nemático Torcido

A construção das células de cristal líquido nemático torcido (CLNT) foi realizada nas dependências do CTI Renato Archer, em Campinas – SP, com a supervisão do Thebano Emilio Almeida Santos, chefe da Divisão de Superfícies de Interação e Display (DSID). As descrições experimentais a seguir relatam as etapas necessárias para a construção das células de CLNT.

Antes de tudo é necessário fazer uma lavagem dos substratos de vidro. Esse procedimento é sempre realizado entre uma etapa e outra no processo de montagem dos portas amostras. Tal procedimento é realizado da seguinte maneira: o substrato é lavado com água destilada e deionizada (DI), em seguida com detergente e enxaguado novamente com água DI, seguindo com um mergulho em acetona e depois uma lavagem com metanol aquecido (em torno de 70 °C). Após essa sequência, o substrato é levado à estufa para retirar a umidade (a uma temperatura de 80° C aproximadamente) por um período de uma hora.

Os substratos utilizados nesse trabalho possuíam um filme fino de SnO₂. A descrição experimental para a deposição do filme fino de SnO₂ é feita nas referências [19 – 21]. Já o procedimento de fotolitografia foi realizado apenas para entender como são feitos os caracteres em um display de CLNT. As amostras que foram usadas para as medidas experimentais não passaram por esse processo.

Com os substratos de vidro devidamente limpos, inicia-se a etapa de deposição do material fotoresiste (Fotoresiste Positivo AZ111 XF da Hoescht). Para tal finalidade utilizou-se uma centrífuga “*spinner*” para depositar o fotoresiste no substrato de modo que ficasse o mais homogêneo possível. Em seguida os substratos foram expostos em luz ultravioleta (dosagem de 55 mJ/cm²) e usando um fotolito para que apenas as regiões de interesse ficassem expostas a luz UV. Depois da exposição, os substratos foram levados ao banho de material revelador, com concentração de 1:2, e o tempo aproximado em que o substrato ficou no banho foi de 45 segundos. Esse processo faz com que as regiões do substrato que receberam luz UV fiquem sem o fotoresiste, o que é importante para a próxima etapa.

Para realizar a corrosão do filme de óxido de estanho (SnO₂) foram feitas duas soluções diluindo ácido clorídrico (HCl) em água, uma solução de 1:10 e outra de 1:3. Para que ocorra

a corrosão é necessário depositar uma camada de zinco (Zn) no substrato anteriormente preparado, isso foi feito com Zn em pó diluído em água.

Com os substratos preparados com a camada de Zn, são levado para a solução de HCl com concentração de 1:10, onde apenas as regiões sem fotoresiste serão corroídas. Depois da camada de Zn se soltar do substrato, retira-se eles da solução com HCl e levados para serem lavados com água DI, e para retirar a água na superfície dos substratos usa-se um jato de gás nitrogênio (N₂).

Na sequencia, leva-se os substratos para o microscópio para observar se houve a formação de cristais nas bordas das regiões onde o fotoresiste se encontra. Caso tenha cristais formados, os substratos são colocados em outra solução de HCl, com concentração de 1:3, para corroer os cristais formados. Em seguida, os substratos são banhados novamente com água e depois levados para o procedimento de limpeza outra vez, para que o fotoresiste seja retirado.

O preparo do Acetato de polivinila (PVA) é realizado com a dissolução do mesmo em água DI (concentração de 5%), que é feito em um béquer de 100 ml, em que se colocou aproximadamente 2,5 g de PVA e 45 ml de água DI, que ficou em um agitador térmico a uma temperatura de 70° C, deixado ali agitando de um dia para o outro (aproximadamente 14 horas). Após a dissolução do PVA, foi realizada uma filtragem do mesmo (processo realizado com o auxílio de um funil de Buchner, papel de filtro, um Kitassato de 250 ml e uma bomba de vácuo). Depois da filtragem, o PVA foi usado para cobrir o substrato anteriormente preparado, para tal finalidade utilizou-se o “*spinner*” novamente, com rotação de 2000 RPM durante um tempo aproximado de 30 segundos, e a seguir os substratos com a camada de PVA foram levados à estufa, permanecendo lá por um tempo aproximado de uma hora e calibrada em 80° C. Tal processo serve para desidratar o PVA deixando-o um pouco mais consistente.

Depois de o substrato com a camada de PVA ter sido retirado da estufa, foi realizado o *rubbing* (polimento que trata a camada de PVA), que consiste em atritar um rolo de pele de carneiro (o mesmo que se usa para pintura) na camada de PVA do substrato. Isso é necessário para fazer com que tal camada fique com micro ranhuras em um único sentido, de forma que as moléculas do cristal líquido fiquem ancoradas e alinhadas nessas ranhuras.

A etapa subsequente foi levar os substratos em uma dosadora de comando numérico computadorizado (CNC), para aplicar a cola de cura térmica (pressão de 35,0 Lib/pol² a uma velocidade de 3,5 mm/s). A seguir, adicionou-se os espaçadores (tubos de vidro com aproximadamente 7,5 µm de diâmetro), realizado com o auxílio de uma caixa de acrílico com suporte para uma tela com duas malhas de nylon de 80 fios/cm sobrepostas uma a outra, onde pulverizava-se os espaçadores, e que de modo adequado, caíam sobre o substrato.

Posteriormente, os substratos foram montados com as suas respectivas partes, e levados para a câmara isobárica, revestida com uma manta de teflon e pressurizadas a 35,0 Lib/pol², ficando dentro de uma estufa por aproximadamente uma hora e meia, a uma temperatura de 150° C, para a cura da cola.

Para se conseguir uma configuração em que o cristal líquido fique em um nemático torcido, para o caso desse processo de montagem das células, o alinhamento das ranhuras do PVA foi escolhido de modo a ficarem em 90° em relação uma da outra, e na hora da junção dos substratos foi tomado o cuidado de deixar que as micro ranhuras ficassem perpendiculares.

Com as células montadas realizou-se uma selagem parcial das mesmas com cola ultravioleta, deixando uma abertura para depositar o cristal líquido, depois as células foram para uma esteira com lâmpadas ultravioletas (radiação de 200 W/pol) e ficaram expostas a luz UV por um tempo aproximado de 5 segundos.

Antes de preencher as células com o CLN, foi realizada a medida da espessura das células via técnica interferométrica, cujo aparato experimental consiste em um laser, uma lente convergente com uma distancia focal aproximadamente de 2,5 cm, um porta amostra, onde as células eram colocadas de modo que ficassem no foco da lente, e por fim, um anteparo onde às franjas de interferência eram projetadas. As medidas da espessura das células foram realizadas em nove pontos diferentes das mesmas, isso é feito para se obter uma medida média. A expressão utilizada para realizar tais medidas é seguinte*:

$$d = \frac{z\lambda}{2 \operatorname{sen}\theta \left(\frac{\Delta X_m}{N_F} \right)} \quad (3.1)$$

* Expressão retirada das normas técnicas internas do CTI Renato Archer.

onde, d é espaçamento da célula, z é a distância entre a célula e o anteparo (neste caso, o foco do lente está no interior da célula e a distância aproximada da célula ao anteparo é de 120 cm), λ é o comprimento de onda do laser (543,5 nm), θ é o ângulo de incidência do feixe de laser em relação ao eixo normal à célula (ajustado em 45°), ΔX_m é a distância entre a primeira e a última franja medida do padrão de interferência (no anteparo as franjas de eram contadas entre duas faixas separadas em 20 cm), e N_F número de franjas contadas a partir do padrão de interferência. A figura 3.2 ilustra a montagem experimental para a realização das medidas do espaçamento no interior das células de CL.

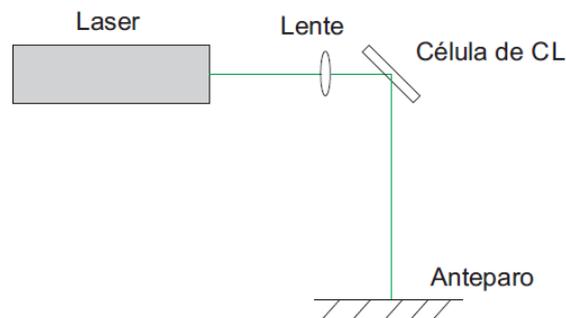


Figura 3.2 – Montagem experimental para medir o espaçamento no interior da célula de CL.

Com as células montadas e pré-seladas, foi inserido o cristal líquido por capilarização (5CB adquirido da SIGMA-ALDRICH e o E7 da MERCK) e em seguida foram seladas completamente. E finalizando com uma nova limpeza das células para proporcionar a colagem dos polarizadores, de modo a deixa-los cruzados, mas paralelos às micro ranhuras do PVA, a figura 3.3 mostra as amostras construídas e utilizadas nesse trabalho.

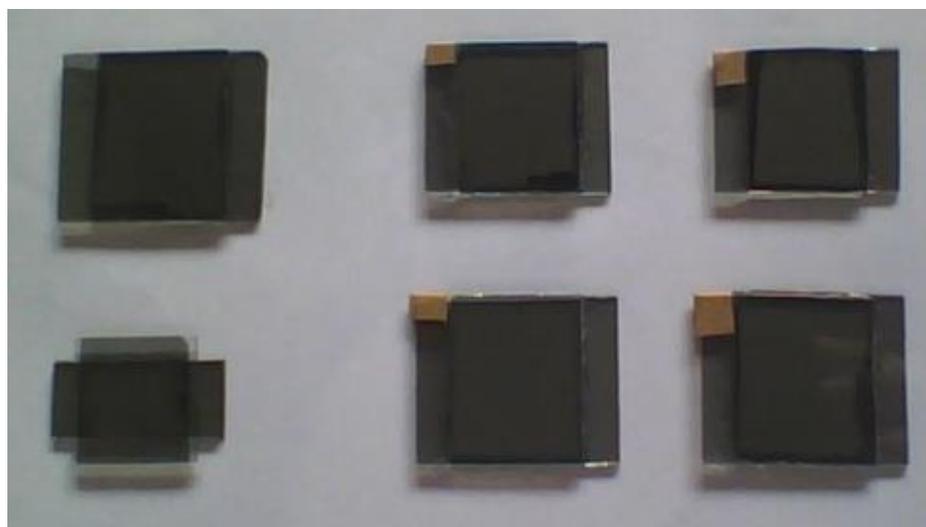


Figura 3.3 – Amostras montadas pelos métodos experimentais descritos nessa seção.

3.2 – Circuito de Ação PWM

PWM é a abreviação de “*Pulse Width Modulation*” ou Modulação de Largura de Pulso, sendo um método muito utilizado para controlar circuitos de grande potência, tais como motores, lâmpadas, fontes de alimentação e etc.

Para melhor entendimento dessa técnica, segue-se a figura 3.4 que é a representação de um circuito com uma carga ligada a uma fonte por meio de chave liga-desliga, tal chave pode comutar rapidamente do estado ligado para desligado e vice e versa [22].

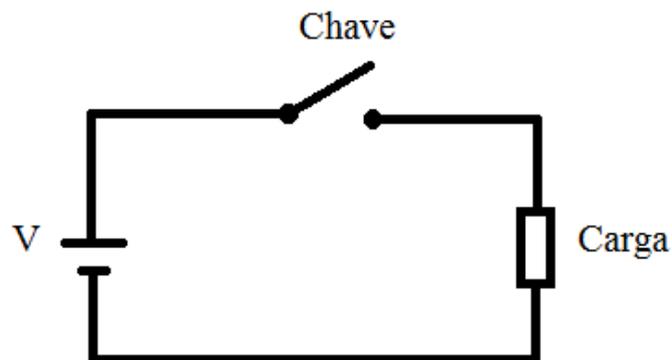


Figura 3.4 – Circuito de uma fonte ligada uma carga através de uma chave.

Quando a chave permanece aberta não há circulação de corrente; no momento em que a chave é fechada, a carga recebe tensão total da fonte e a corrente que circula pelo circuito é máxima.

Agora se a chave ficar ligando e desligando rapidamente a corrente média do circuito não é mais a máxima, conseqüentemente a tensão média não é a mesma da fonte. A figura 3.5 representa o gráfico da tensão em função do tempo, onde t é o período, t_1 o tempo da chave ligada, t_2 o tempo da chave desligada. Para o caso particular em que $t_1 = t_2$, a tensão média aplicada à carga é de 50%.

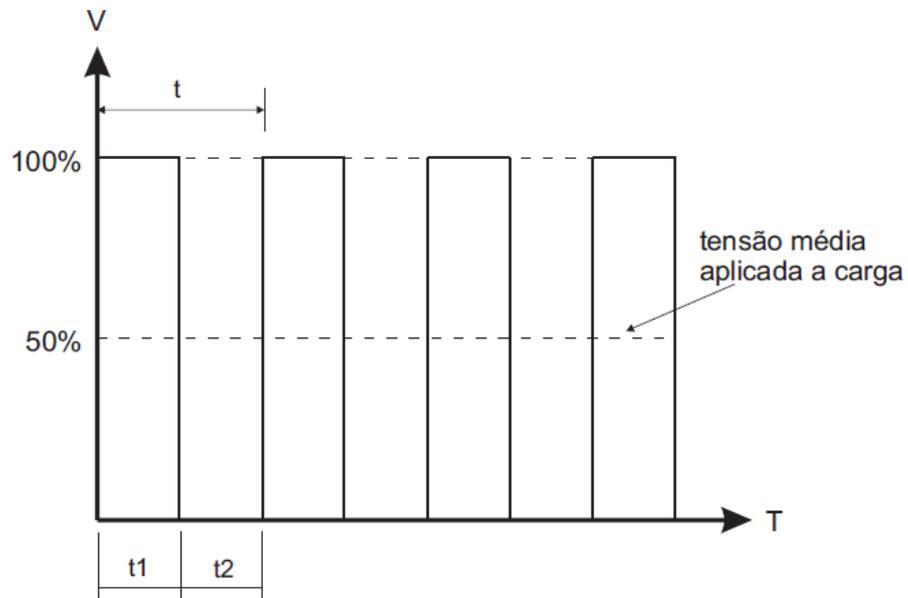


Figura 3.5 – Gráfico da tensão em função do tempo aplicado a carga.

O interruptor fechado define a largura do pulso pelo tempo em que ele fica nesta condição, e um intervalo entre pulsos pelo tempo em que ele fica aberto. Os dois tempos definem o período e, portanto, uma frequência de controle.

A relação entre o tempo em que chave está fechada (t_1) e o período (t) definem o ciclo ativo, dado pela relação:

$$\frac{t_1}{t} \times 100 = \text{ciclo ativo.} \quad (3.2)$$

Variando-se a largura do pulso e também o intervalo de modo a se obter ciclos ativos diferentes, pode-se controlar a potência média aplicada a uma carga. Assim, quando a largura do pulso varia de zero até o máximo, a potência também varia na mesma proporção [22, 23], conforme está indicado na figura 3.6.

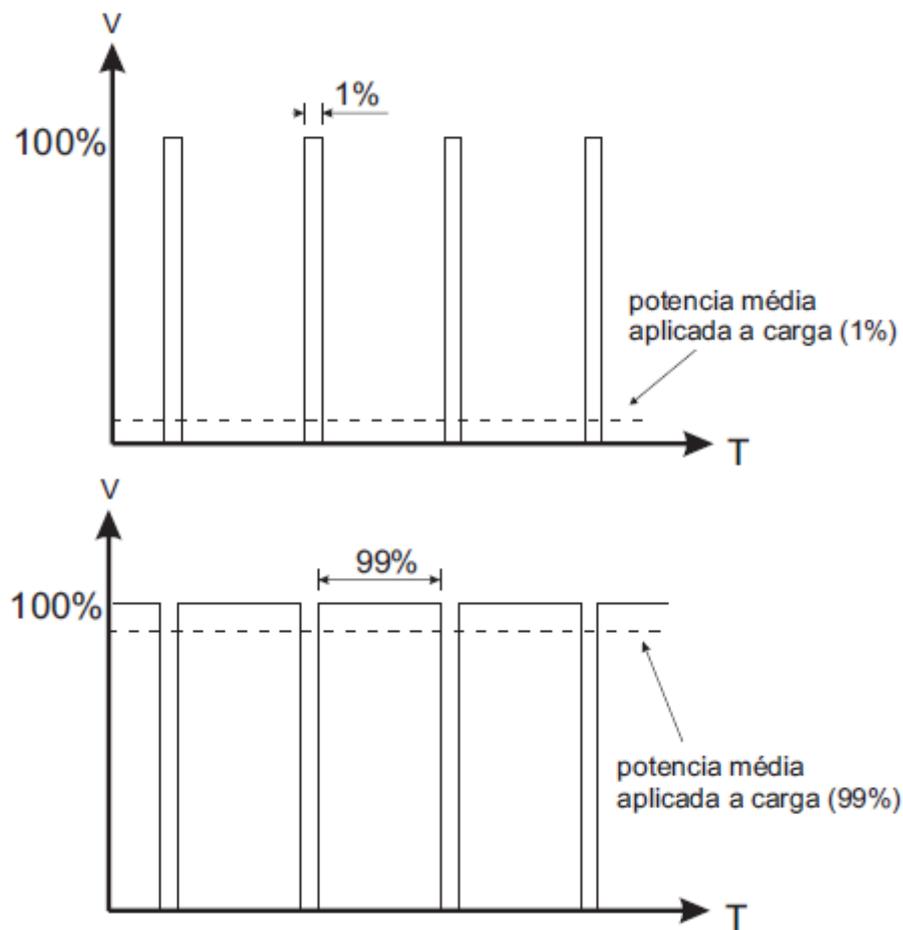


Figura 3.6 – Potência média aplicada a carga com a variação do ciclo ativo.

Este princípio é usado no controle PWM: modulando-se a largura do pulso de modo a controlar o ciclo ativo do sinal aplicado a uma carga e, com isso, a potência aplicada a ela [22 – 24]. Para realizar as medidas experimentais deste trabalho, foi necessário montar um circuito de ação PWM.

O circuito de ação PWM foi feito com base em um micro controlador PIC 16F628A (Microchip), com um programa escrito em linguagem C (utilizando o compilador PIC C) e gravado com gravador de memórias e micro controladores do tipo *Pickit 2*. A figura 3.7 mostra o diagrama elétrico do circuito.

A frequência usada para o PWM é de 1,0 KHz (escolhida no momento de fazer o programa). O pino de saída do PWM é ligado ao transistor Q1 que aciona a célula de CLNT, como se pode observar na figura 3.7, quando o transístor é acionado fecha um curto circuito na célula de CLNT. Tal célula pode ser comparada com um capacitor de placas paralelas e, devido a

isso, o curto circuito faz descarrega-la. Quando o transistor não é acionado, o que pode ser considerado com um interruptor aberto, faz com que a célula carregue-se pelo resistor R4.

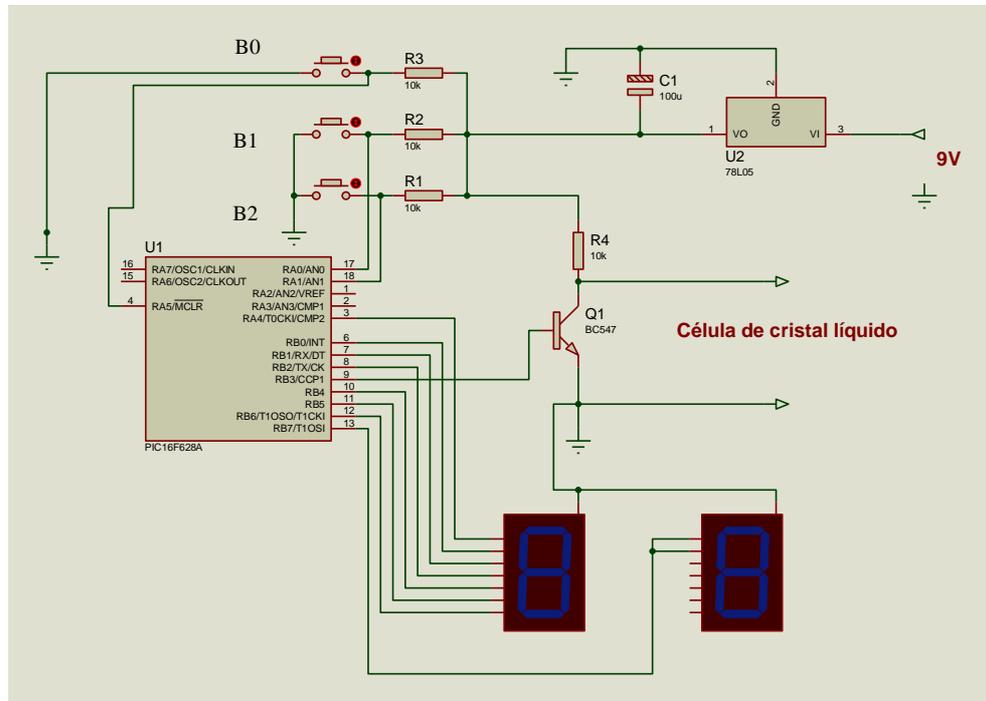


Figura 3.7 – Diagrama elétrico do circuito de ação PWM.

Pela configuração que as células de CLNT são montadas, quando é aplicada uma diferença de potencial em seus terminais, de forma a ultrapassar o campo crítico, ocorre uma orientação das moléculas e, devido aos polarizadores cruzados, a célula fica opaca.

O circuito de PWM faz um controle da transmitância de luz que atravessa a célula, a variação do ciclo ativo é feito de 0 a 99%, em passos de 9,9%, que são controlados pelos botões B1 e B2, o botão B0 é o reset, que quando é acionado faz com que a célula volte a ficar translúcida. Os displays de sete segmentos servem para mostrar em qual estado a fonte esta configurada, sendo esses estados ou passos indicados de 0 a 10. A tensão de funcionamento do circuito é de 5,0 V, regulada por um circuito integrado 7805.

3.3 – Espectrofotometria

Sabe-se que as moléculas de diversos materiais podem absorver a luz, o modo que os comprimentos de onda e a eficiência que são absorvidos dependem da estrutura dessas

moléculas e também do meio onde se encontram. Com base nisso a espectroscopia é uma técnica muito útil para caracterizar propriedades físico-químicas.

O espectrofotômetro é utilizado para realizar as medidas de absorbância, de transmitância e de refletância de luz. Tal aparelho é constituído por uma fonte de luz, um monocromador (para selecionar os comprimentos de onda), um compartimento para se colocar as amostras e um detector de luz. A figura 3.8 ilustra um esquema de um espectrofotômetro [25 – 29].

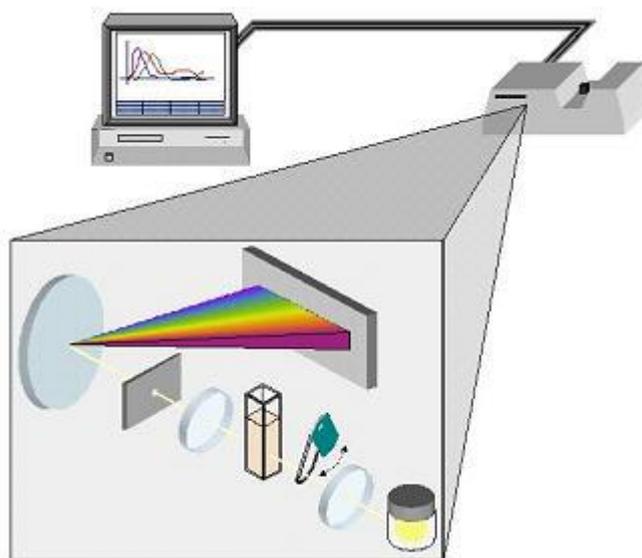


Figura 3.8 – Esquema de um espectrofotômetro [25].

O espectrofotômetro utilizado nesse trabalho foi o Cary 50 (da Varian), ligado a um computador para a aquisição dos dados, foi possível realizar as medidas experimentais para comparar os sistemas de controle eletrônico das células de CLNT. Os sistemas de controle utilizados neste trabalho foram o circuito de ação PWM, um gerador de funções (SRS, modelo DS 335) usado de duas maneiras: a primeira foi variando a frequência de 0,2 a 2.500,0 KHz, deixando a amplitude da onda quadrada fixa em 5 V; e a segunda fixou-se a frequência em 1,0 KHz (a mesma usa pelo circuito de ação PWM) e variou-se a amplitude da onda quadrada de 0,0 a 10,0 V.

As medidas foram realizadas colocando as células de CL em um porta amostra no interior do espectrofotômetro, depois eram ligados os cabos da fonte de controle nos terminais das células, em seguida fechava-se o compartimento onde a amostra foi inserida, isso era feito

para a que luz externa não interfira nas medidas realizadas. A figura 3.9 ilustra o espectrofotômetro usado nessa pesquisa.

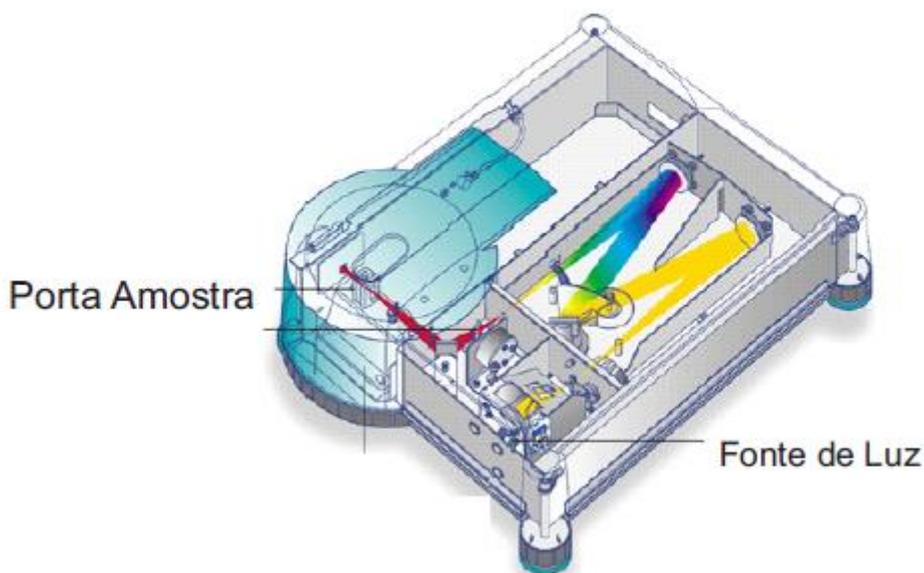


Figura 3.9 – Ilustração do interior do espectrofotômetro usado no trabalho [25].

A aquisição de dados foi configurada para o equipamento medir a transmitância de luz que passava pela amostra, em um intervalo do comprimento de onda de 400,0 a 700,0 nm, que representa a parte visível do espectro eletromagnético. Também foi tomado o cuidado de sempre calibrar o equipamento para cada amostra. Tal calibração foi realizada não aplicando uma diferença de potencial na célula de CL, ou seja, o sistema de controle utilizado não envia sinal elétrico para a célula, de forma que a transmitância de luz pela amostra é a máxima.

Depois da calibração do equipamento foram realizadas as medidas de transmitância de luz em função do ciclo ativo, que eram feitas de forma manual, onde era ligada a fonte de controle, que envia um sinal elétrico para a célula, por padronização esperava-se um tempo aproximado de vinte segundos para coletar os dados experimentais, usando o programa específico do fabricante do equipamento. Em seguida, mudava-se o parâmetro de controle da fonte e repetiam-se os procedimentos acima descritos.

3.4 – Tempo de Acionamento

As medidas de tempo de acionamento ou tempo de resposta foram realizadas em uma mesa montada com um laser de He-Ne, um porta amostras onde a célula de CLN era colocada, um sensor ligado ao osciloscópio (Tektronix – TDS 3014) e a fonte de PWM ligada à célula de CL. A figura 3.10 ilustra a montagem experimental para realização das medidas.

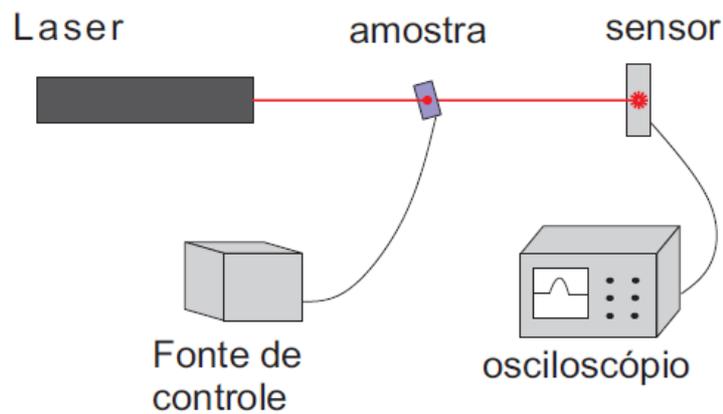


Figura 3.10 – Montagem experimental para medir o tempo de resposta das células de CL.

As medidas do tempo de acionamento das células de CLNY foram realizadas de forma manual, pois foi necessário usar um interruptor ligado em paralelo a saída da fonte de PWM, quando o interruptor era acionado colocava a célula em curto circuito, de modo a descarregar-se e ficando translúcida como se estivesse desligada, ao voltar o interruptor ao seu estado normal, a fonte enviava o sinal elétrico para a célula de CLNT que voltava a ficar opaca. O sensor captava a intensidade resultante do laser que atravessava a célula de CLNT e com o osciloscópio era possível medir o tempo que a célula levava para mudar do estado opaco para o translucido e, vice e versa. Com o osciloscópio era possível salvar os dados adquiridos em um arquivo e depois leva-los a um computador para ser analisado.

Capítulo 4 – Resultados Experimentais

4.1 – Espessura Interna das Amostras

Foram construídas diversas amostras, mas devido a complexidade na montagem das células, foram analisadas, neste trabalho, duas amostras preenchidas com 5CB e quatro amostras com E7.

As medidas experimentais foram realizadas conforme estão descritas na seção 3.1.4 do capítulo anterior. O quadro 4.1 mostra as médias do espaçamento interno e o desvio padrão de cada célula de CL preenchidas com 5CB e E7. As amostras com menor desvio padrão ficaram com o espaçamento no seu interior mais homogêneo, ou seja, no momento de montar a célula os substratos de vidro ficaram paralelos.

Amostra	d médio (μm)	σ médio (μm)	σ médio (%)	Cristal Líquido
01	24,7	2,3	10,3	5CB
02	45,2	10,2	17,1	5CB
03	14,3	1,0	7,1	E7
04	43,0	17,5	40,6	E7
05	25,6	5,2	20,3	E7
06	35,9	13,6	37,9	E7

Quadro 4.1 – médias de espessura via técnica de interferência para células confeccionadas.

4.2 – Espectrofotometria

4.2.1 – Transmitância Versus Ciclo Ativo (PWM)

As figuras 4.1 e 4.2 ilustram os gráficos para as duas amostras preenchidas com o cristal líquido termotrópico 5CB. As figuras 4.3 a 4.6 representam os gráficos para as amostras preenchidas com cristal líquido termotrópico E7, onde pode-se observar o comportamento de como a transmitância normalizada da luz varia com o ciclo ativo do circuito PWM.

O espectrofotômetro faz as medidas da transmitância de luz em função do comprimento de onda. No presente caso, foi utilizado entre 400 a 700 nm; para cada nível do circuito de ação PWM foi realizada uma varredura entre os comprimentos de onda. Isto posto, os seguintes gráficos foram plotados usando apenas quatro comprimentos de onda (400, 500, 600 e 700 nm) e a média dos dados obtidos.

A figura 4.1 representa o comportamento da amostra 01 preenchida com o CL termotrópico 5CB. Pode-se observar que, quando não se aplica uma diferença de potencial na amostra (o que representa o ciclo ativo igual a 0%) a transmitância de luz é máxima e a célula de CLNT fica translúcida. Aumentando o ciclo ativo do circuito de ação PWM, observa-se uma redução na transmitância de luz, e no nível em que o circuito está com o ciclo ativo próximo de 40%, a transmitância de luz é mínima, aproximando-se de zero. Isso significa que a célula de CLNT está bloqueando a maior parcela da passagem de luz, que pode ser observado com a amostra opaca. A partir do ciclo ativo de 70% a amostra volta a aumentar a transmitância de luz, o que pode ser explicado pela reorientação do diretor das moléculas de CL, pois o ciclo ativo de 70% pode ser comparado com um sinal de corrente contínua.

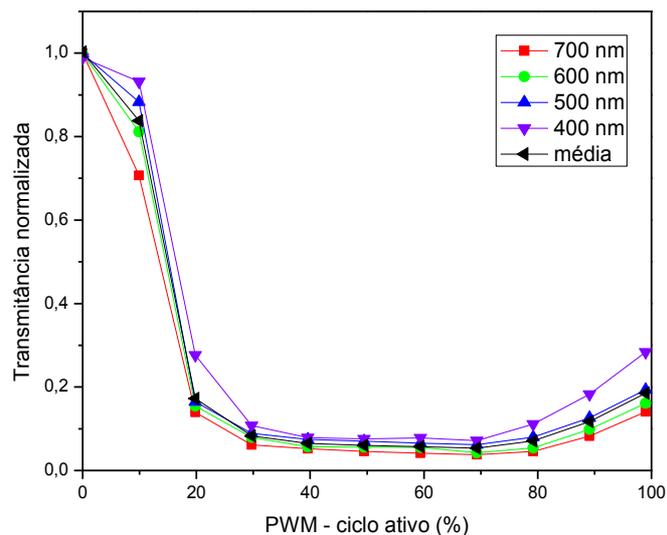


Figura 4.1 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 01.

O gráfico da amostra 02 está representado na figura 4.2, onde pode-se observar um comportamento semelhante ao da amostra 01, porém o mínimo atingido para essa amostra

aproxima-se de 0,7, e possui comportamento diferente para o comprimento de onda de 400 nm. Isso ocorre, provavelmente, devido à espessura no interior da célula de CLNT, e para diminuir a transmitância de luz seria necessário aplicar uma diferença de potencial maior.

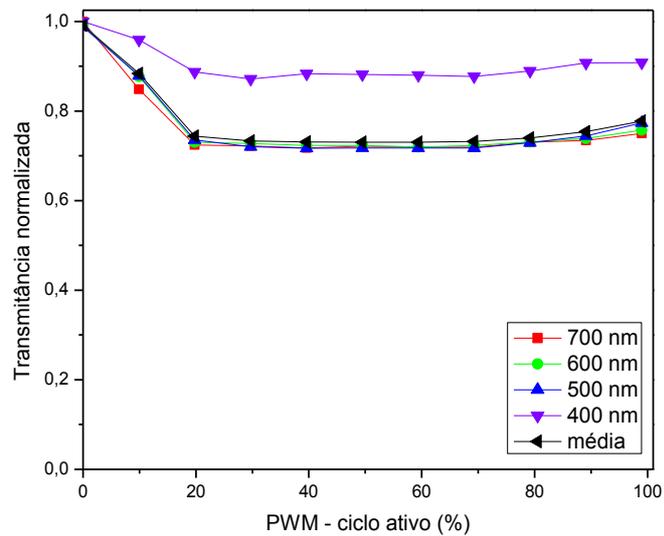


Figura 4.2 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 02.

A figura 4.3 ilustra o gráfico da amostra 03, preenchida com o cristal líquido termotrópico E7. Observa-se que o comportamento da transmitância de luz normalizada em função do ciclo ativo. Nota-se que o comportamento da transmitância é similar com o obtido na figura 4.1. No entanto, ao que se refere à figura 4.3, o mínimo de transmitância de luz ocorre no ciclo ativo de 60%, já no ciclo ativo de próximo de 80%, a transmitância de luz volta a aumentar, nessa porcentagem o sinal elétrico da saída do circuito de ação PWM é comparável com o sinal de uma corrente contínua, e pelo meio ser um fluido, as moléculas de cristal líquido não conseguem manter a orientação com o campo elétrico no interior da amostra.

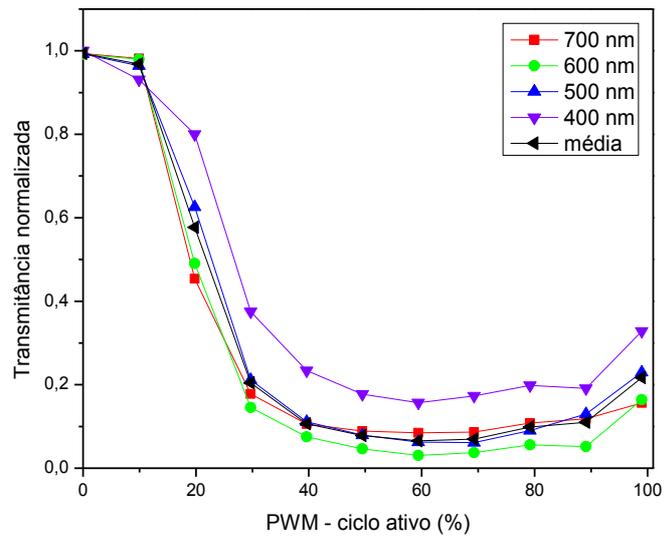


Figura 4.3 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 03.

A figura 4.4 apresenta o gráfico da amostra 04 preenchida com E7. Nota-se um comportamento diferente ao das amostras anteriores, onde o mínimo da transmitância ocorreu em um ciclo ativo de 50%, e na medida em que o ciclo ativo se eleva (até 99%), a transmitância de luz também aumenta, tendendo ao valor de 0,96. Isso pode ter ocorrido devido à espessura no interior da amostra, pois esta apresentou maior espessura em relação às outras.

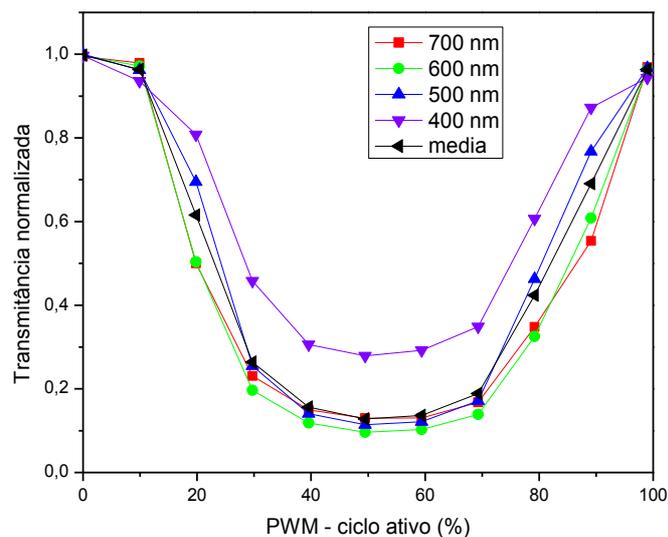


Figura 4.4 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 04.

As figuras 4.5 e 4.6 esboçam os gráficos das amostras 05 e 06 respectivamente. Verifica-se que o comportamento de ambas as amostras é semelhante ao da amostra 03. A amostra 05 apresenta um mínimo na transmitância para o ciclo ativo de próximo de 60%, Por outro lado, na amostra 06, o mínimo ocorre em torno de 50%. Os valores da transmitância de luz das duas amostras situam-se próxima de zero, que corresponde a total orientação das moléculas com o campo elétrico.

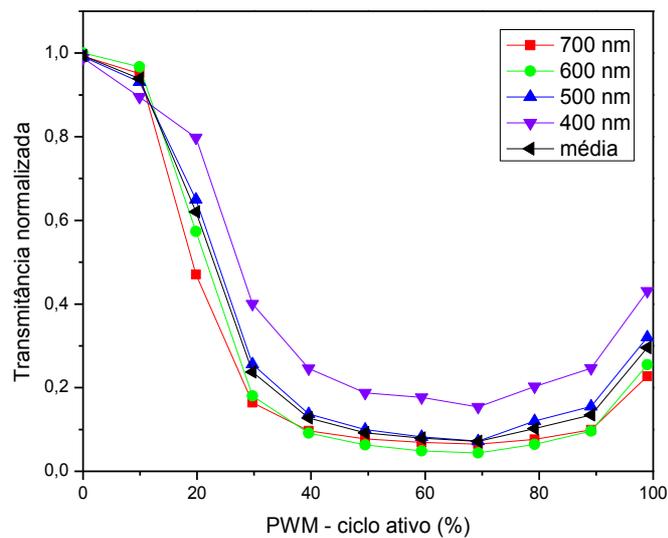


Figura 4.5 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 05.

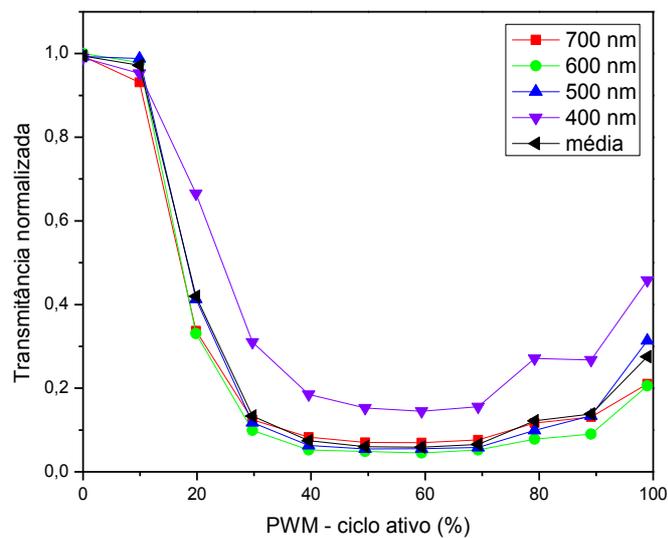


Figura 4.6 – Transmitância normalizada versus ciclo ativo. Amostra 06.

4.2.2 – Transmitância Versus Amplitude de Tensão

As medidas experimentais dessa seção foram realizadas usando um gerador de funções (SRS, modelo DS 335) como sistema de controle para as amostras, deixando a frequência fixa em 1,0 KHz e, depois variando a amplitude da onda quadrada de 0,0 a 10,0 V. A figura 4.7 apresenta o gráfico para a amostra 01.

Observa-se que a transmitância de luz não altera até aproximadamente 1,0 V, isso ocorre devido conceito físico conhecido por transição de Fréedericksz, em que as moléculas de CLN orientam-se após aplicar o campo elétrico acima de um valor crítico. Tal orientação é proporcional à diferença de potencial aplicada nos terminais da célula de CLNT. Note ainda, que a transmitância de luz diminui conforme aumenta a orientação das moléculas no interior da célula. Este resultado é comparável com o previsto teoricamente descrito na seção 2.2 deste trabalho. A partir de 2,4 V a transmitância de luz satura em um valor mínimo, ou seja, a orientação é máxima no interior da célula de CLNT.

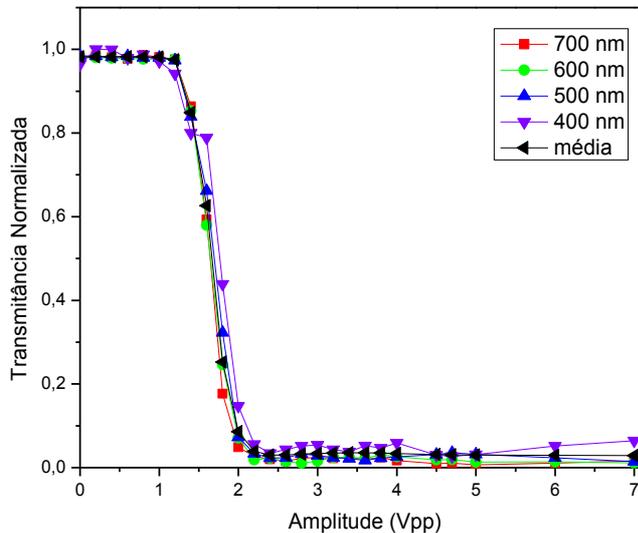


Figura 4.7 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 01.

A figura 4.8 representa o gráfico da transmitância de luz normalizada pela amplitude da onda aplicada na amostra 02 preenchida com 5CB. Na região próxima de 1,0 V observa-se uma descontinuidade na transmitância. Tal descontinuidade necessita de um estudo mais aprofundado para ser esclarecida. Ainda em relação ao gráfico da figura 4.8, conclui-se que para o valor de 1,2 V a transmitância de luz volta a diminuir, em contrapartida, para a

diferença de potencial de 2,0 V observa-se uma mudança na transmitância de luz, que permanece no valor mínimo.

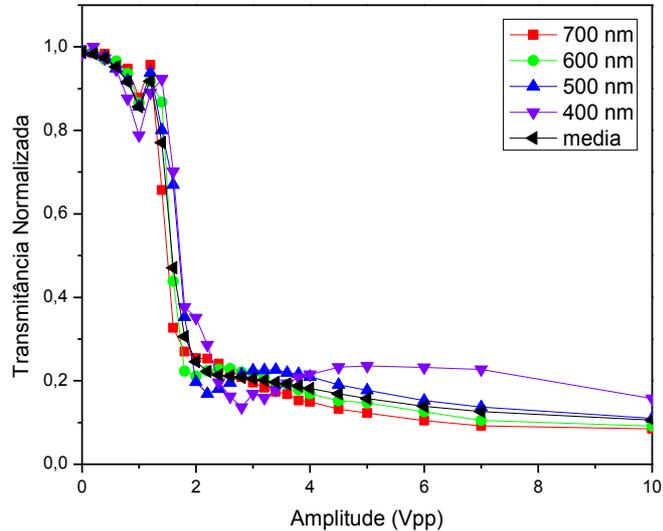


Figura 4.8 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 02.

A figura 4.9 mostra o comportamento da transmitância de luz normalizada em função da amplitude da onda aplicada à amostra 03 com o CL E7. Verifica-se um comportamento análogo ao da amostra 01 com 5CB. A transmitância de luz começa a diminuir a partir de 1,6 V e atinge o mínimo em 3,0 V e não se altera, porém, como se pode ver, cada comprimento de onda possui um valor mínimo de transmitância de luz.

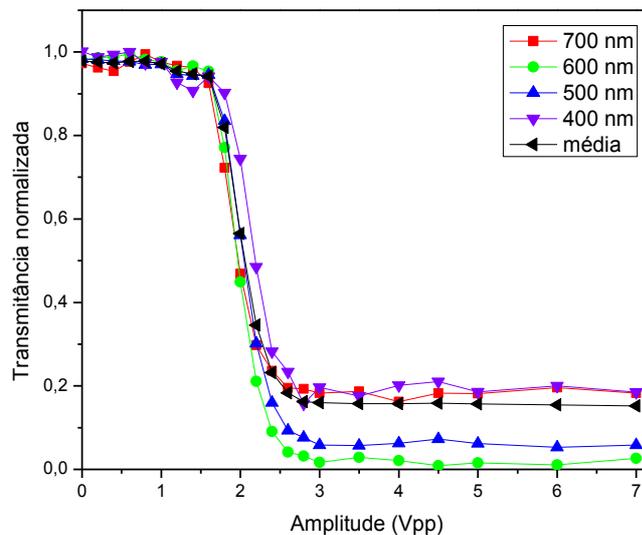


Figura 4.9 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 03.

O comportamento da transmitância de luz pela amplitude da onda da amostra 04 está representado na figura 4.10, que mostra um comportamento semelhante com o da amostra 03. Mas para o comprimento de onda de 400 nm se observa uma descontinuidade. A partir de 1,0 V a transmitância de luz começa a diminuir e em torno de 3,0 V estabiliza no mínimo, como ocorreu na amostra anterior. A amostra 04 também apresenta diferentes valores para os mínimos na transmitância de luz para cada comprimento de onda.

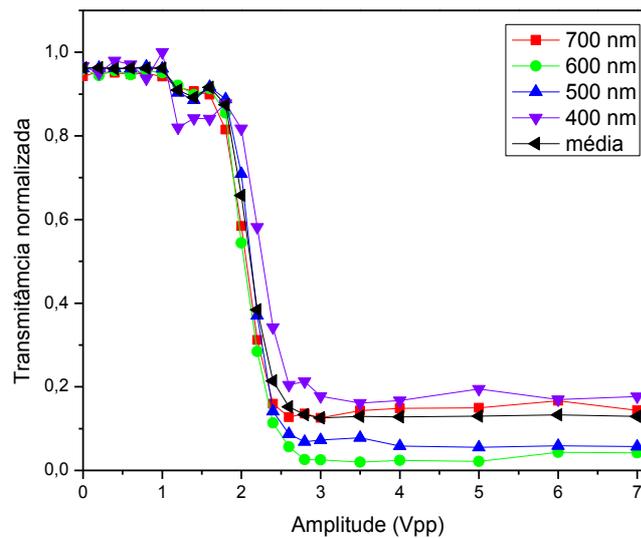


Figura 4.10 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 04.

A figura 4.11 mostra o comportamento da transmitância de luz normalizada pela amplitude da onda aplicada à amostra 05. Pode-se observar que apenas no comprimento de onda de 400 nm houve uma pequena descontinuidade, também apresentou um valor mínimo de transmitância diferente dos outros comprimentos de onda. A intensidade da transmitância de luz diminui a partir de 1,0 V e atinge o mínimo a partir de 2,8 V.

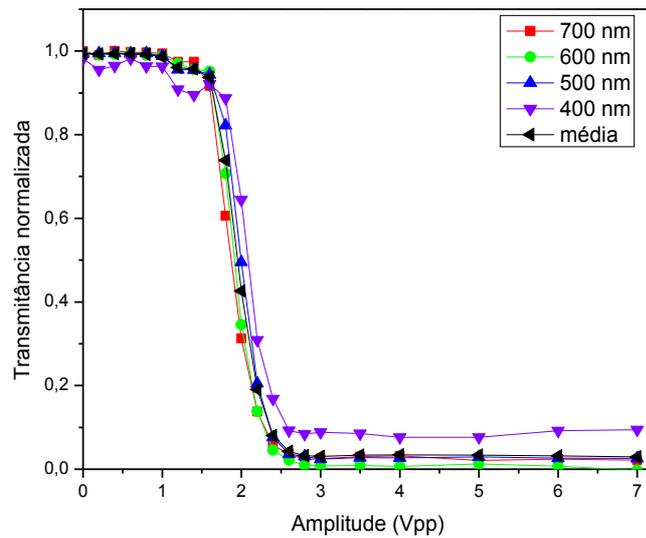


Figura 4.11 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 05.

O gráfico para a amostra 06 está representado na figura 4.12. Observa-se um comportamento bem parecido com os das amostras anteriores. Nessa amostra, a intensidade da transmitância de luz começa a diminuir em 1,6 V e atingindo o mínimo e saturando em 3,5 V. É visível que o comprimento de onda de 400 nm possui o valor mais alto para o mínimo da transmitância, já o comprimento de onda de 600 nm possui o valor menor, tal como ocorre na maioria das amostras anteriormente analisadas.

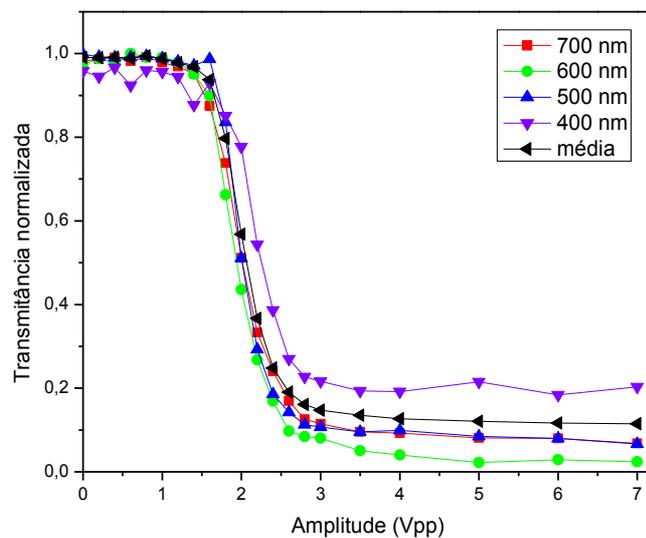


Figura 4.12 – Transmitância normalizada versus amplitude de tensão. Amostra 06.

4.2.3 – Transmitância Versus Frequência

As medidas experimentais dessa seção foram feitas com o gerador de funções SRS, modelo DS 335, configurado em onda quadrada com 5,0 V de amplitude, e usando a frequência como parâmetro de controle, que variou de 0,2 a 2.500,0 KHz. Da mesma forma que nas medidas anteriores, foi utilizado o espectrofotômetro para a aquisição dos dados experimentais.

As curvas da transmitância normalizada pela frequência são mostradas a seguir. Pode-se observar que nesse caso a transmitância inicia próxima de zero e atinge um valor máximo, isso ocorre porque as amostras estão recebendo a diferença de potencial suficiente para deixá-las opacas já de início. Conforme a frequência aumenta, as moléculas de CLN não conseguem se orientar devido ao campo que muda muito rápido, e assim a transmitância de luz muda com a orientação do diretor.

A figura 4.13 representa o gráfico da transmitância normalizada em função da frequência da amostra 01, observa-se que a transmitância começa a aumentar a partir de 35,0 KHz saturando no máximo em 90,0 KHz.

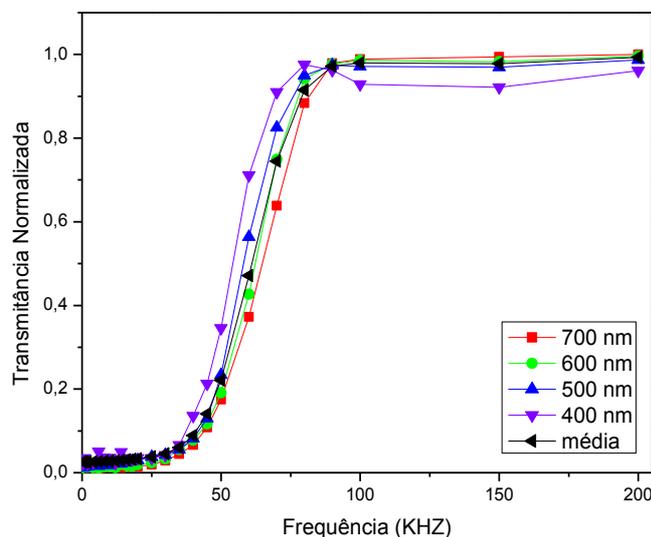


Figura 4.13 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 01.

A figura 4.14 mostra o gráfico da amostra 02, verifica-se que a transmitância, para essa amostra, começa a aumentar a partir de 45,0 KHz e atingindo o valor máximo em 100,0 KHz.

Os valores da transmitância para os comprimentos de onda analisados são próximos, como pode ser observado.

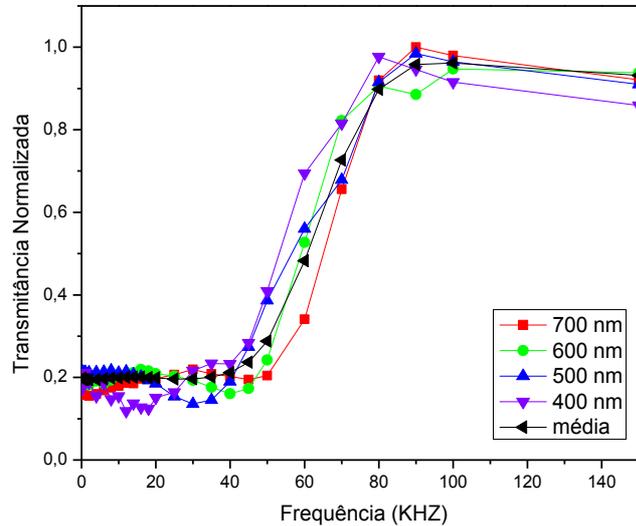


Figura 4.14 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 02.

A figura 4.15 apresenta a curva da transmitância normalizada versus a frequência para a amostra 03, que esta preenchida com o CL do tipo E7. A curva começa a aumentar quando a frequência ultrapassa os 1000,0 KHz, e saturando ao atingir os 1900,0 KHz. Pode se observar que cada comprimento de onda possui um valor de transmitância, porém o comportamento deles é análogo.

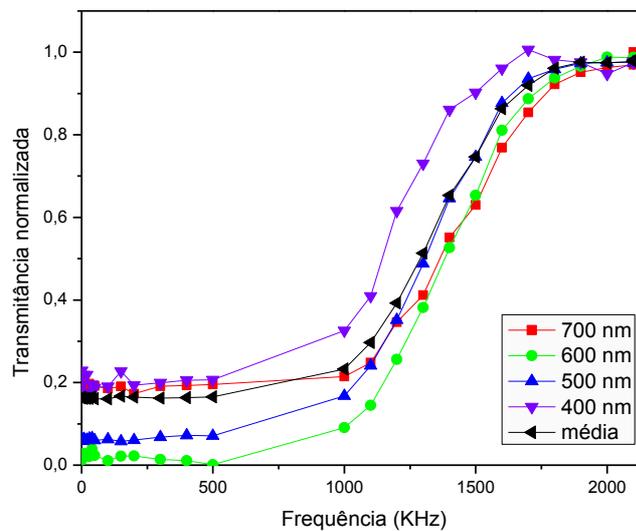


Figura 4.15 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 03.

A figura 4.16 compreende ao gráfico da amostra 04, onde a transmitância de luz aumenta a partir da frequência de 900,0 KHz e satura em 1900,0 KHz. Apenas o comprimento de onda de 400 nm que apresentou algumas variações, e ainda nessa amostra, como na anterior, cada comprimento de onda possui um valor similar para a transmitância.

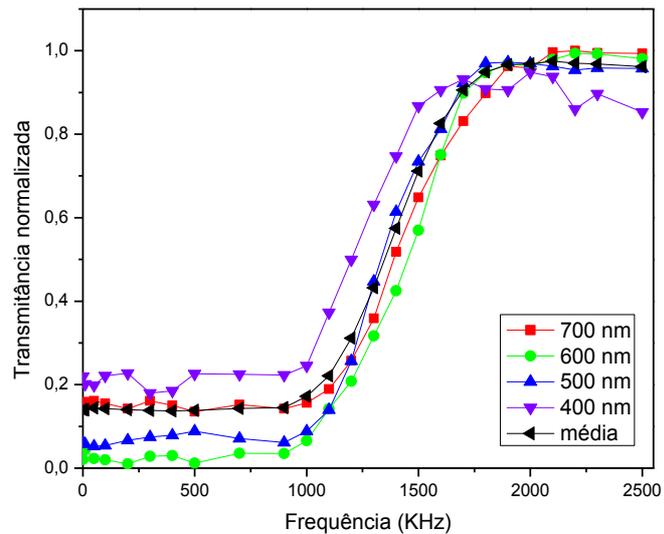


Figura 4.16 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 04.

A figura 4.17 mostra o gráfico da transmitância de luz em função da frequência para a amostra 05. Observa-se que os valores da transmitância de luz (para cada comprimento de onda) são similares. A frequência em que a transmitância começa a aumentar é de 700,0 KHz e, atinge um valor máximo para a frequência de 1500,0 KHz. A partir desse valor de frequência a transmitância de luz não se altera.

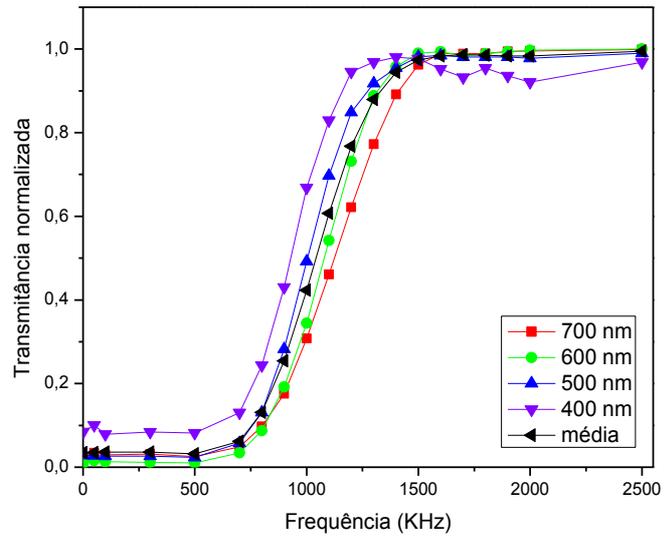


Figura 4.17 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 05.

A figura 4.18 (amostra 06) mostra o gráfico da transmitância de luz normalizada versus a frequência. Verifica-se que cada comprimento de onda possui um valor de transmitância apenas no início da curva, sendo que a partir da frequência de 400,0 KHz em que a curva da transmitância começa a subir, fazendo com que os seus valores fiquem próximos para cada comprimento de onda. A transmitância de luz da amostra satura para a frequência aproximada de 1100,0 KHz.

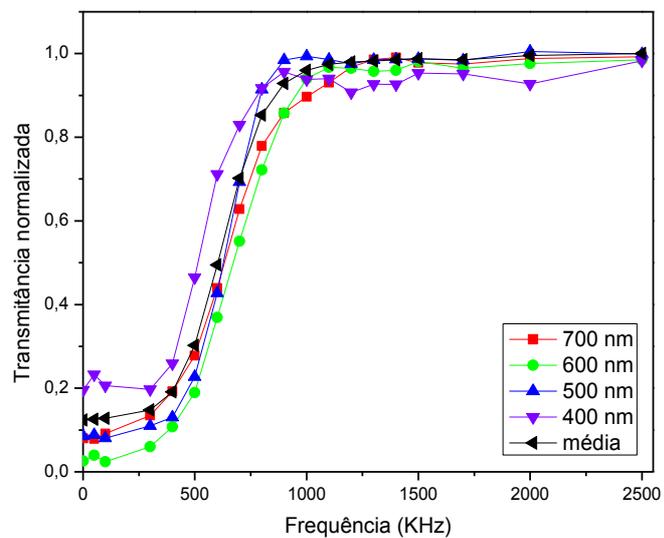


Figura 4.18 – Transmitância normalizada versus frequência. Amostra 06.

4.3 – Tempo de Acionamento

Os resultados experimentais do tempo de acionamento ou tempo de resposta serão apresentados e discutidos a seguir, segundo a seção 3.3.2.

A figura 4.19 compara o tempo de acionamento de um visor de máscara de solda (da ordem de 10 ms) com o tempo de acionamento real das amostras estudadas no presente trabalho (da ordem de 200 ms). Tal figura é um gráfico elaborado a partir dos dados experimentais de um visor de CL da máscara de solda (Focus, modelo CV 1000) e compara os resultados experimentais obtidos da amostra 06.

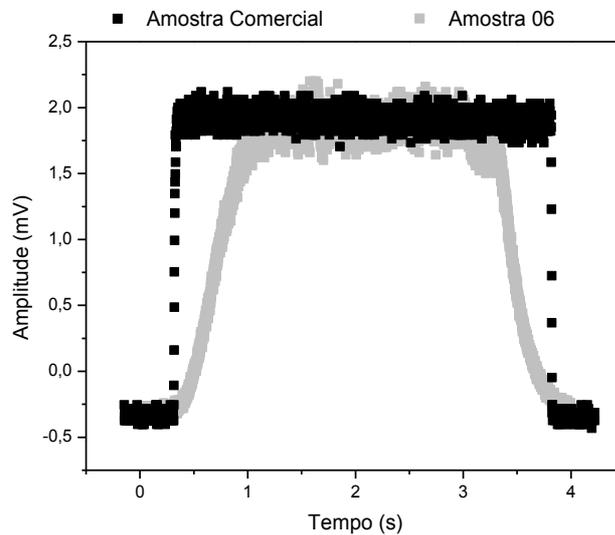


Figura 4.19 – Tempo de acionamento. Amostra comercial versus amostra 06.

A tabela 4.2 mostra o valor médio dos tempos de resposta de cada amostra. Foram realizadas três medidas em cada amostra para se conseguir a média. Lembrando que as amostras 01 e 02 estão preenchidas com o CL do tipo 5CB e as amostras restantes com E7.

Amostra	Tempo (s) – Célula Opaca	Tempo (s) – Célula Translúcida
01	0,641	1,920
02	0,241	1,039
03	0,356	0,450
04	0,416	0,451
05	0,440	0,630
06	0,232	0,259

Tabela 4.2 – Tempo de resposta médio das amostras estudadas.

O tempo de resposta de acionamento das células é influenciado por vários fatores como: o espaçamento no interior da célula; o nível de paralelismo dos substratos usado na montagem da célula; e a diferença de potencial usada no acionamento.

O circuito de ação PWM trabalha com uma frequência aproximada de 1000,0 Hz, o período total de um ciclo corresponde a 0,001 s, o menor tempo em que a amostra recebe o sinal elétrico corresponde a 9,9% e o maior de 99,0% do período total, o que corresponde a aproximadamente $9,9 \times 10^{-5}$ e $9,9 \times 10^{-4}$ s respectivamente.

Capítulo 5 – Conclusões

Este trabalho estudou e comparou os métodos de três sistemas de controle eletrônicos para acionar um dispositivo eletro-óptico utilizando fase nemática. Para realizar tal estudo foi necessário preparar diversas células de CLNT. Elas foram preparadas nas instalações do CTI Renato Archer. As dificuldades técnicas no processo de confecção das células são importantes de ressaltar aqui, pois erros durante esse processo foram superados e é parte do trabalho.

A construção de uma fonte eletrônica com controle de ação PWM foi uma etapa fundamental deste trabalho, onde comparou-se o controle de transmitância de luz com os outros sistemas de acionamentos (variação da amplitude e de frequência) utilizados em dispositivos eletro-ópticos (*displays*). Durante o trabalho, a fonte passou por alguns ajustes até se conseguir o melhor controle na transmitância de luz das células de CLNT estudadas.

Os resultados experimentais obtidos mostram que a técnica de PWM pode ser utilizada como um sistema de controle para dispositivos eletro-ópticos. Os gráficos mostram que a transmitância de luz volta a aumentar a partir de certo de ciclo ativo, tal efeito ocorre porque quando se aplica uma corrente contínua em um cristal líquido, a orientação das moléculas devido ao campo elétrico não é mantida ao longo do tempo.

Comparando o sistema de variação da amplitude de tensão aplicado a amostra com o PWM, observou-se um comportamento equivalente das curvas de transmitância obtidas, isso se deve porque a ação PWM é baseada em uma tensão média em função do tempo. Os resultados obtidos com o sistema de variação de amplitude mostram que a transmitância de luz começa a diminuir em aproximadamente 1,2 V para as amostras com 5CB, e 1,6 V para as amostras com E7, o que pode ser confrontado com o valor teórico que é da ordem de 1,0 V.

Comparando o estudo de variação da frequência com a ação PWM, verificou-se uma inversão no sentido horizontal da curva de transmitância. A causa disso é que no sistema de variação de frequência, a amostra recebe uma diferença de potencial que ultrapassa o potencial crítico já de início, e conforme a frequência aumenta as moléculas de CLNT não conseguem mudar de direção na mesma velocidade que o campo elétrico. Então para um bom funcionamento da

fonte de PWM, escolheu-se uma frequência de trabalho bem abaixo da frequência crítica. Isso pode ser comparado, em termos da frequência, com a transição de Fréedericksz.

Este trabalho mostrou que a técnica de controle PWM pode ser usada em um protótipo de janela óptica, onde a principal função seria controlar a transmitância de luz que entra em um ambiente.

Bibliografia

- [1] F. Reinitzer, *Mh. Chem.* **9**, 421 (1888).
- [2] T. Sluckin, *Flúidos Fora da Lei*, 1st ed., IST Press, Lisboa, (2006).
- [3] O. Lehmann, *Z. Phys. Chem.* **4**, 462 (1889).
- [4] G. Friedel, *Annl. Phys.* **18**, 273 (1922).
- [5] I. C. Khoo, *Liquid Crystals*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, (2007).
- [6] P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, 2nd ed., Clarendon, Oxford, (1993).
- [7] L. R. Evangelista, *A Short Course on Elastic Theory, Adsorption Phenomena, and Diffusion Problems in Liquid Crystals*, PFI, Universidade Estadual de Maringá, (2012).
- [8] G. Barbero and L. R. Evangelista, *An Elementary Course on the Continuum Theory for Nematic Liquid Crystals*, World Scientific, Singapore, (2001).
- [9] A. Rapini, M. Papoular, *J. Phys. Colloq.* **30**, 54, Paris, (1969).
- [10] R. T. Souza, *Reorientação Molecular, Corrente Elétrica e Energia de Ancoramento em Nemáticos*, Dissertação de Mestrado, PFI, Universidade Estadual de Maringá (2009).
- [11] A. F. Martins, *Os Cristais Líquidos*, Fundação Calouste Gulbenkian, (1991).
- [12] R. B. Meyer, *Phys. Rev.Lett.*, **22**, 918, (1969).
- [13] X. J. Wang, *Liquid Crystalline Polymer*, World Scientific Publishing, United State, (2004).

- [14] D. Demus, et al, *Handbook of Liquid Crystals*, **1**, Fundamentals, Wiley-VCH (1998).
- [15] B. Badadur, *Handbook of Liquid Crystals*, Wiley - VCH, (1998).
- [16] V. M. Lenart, *Estudo das propriedades ópticas não lineares de cristais líquidos luminescentes através da técnica de Z-scan*, Dissertação de Mestrado (DFI), Universidade Estadual de Ponta Grossa (2010).
- [17] M. M. A. Jesus, *Caracterização Eletro-Óptica de uma Mistura Líquido Cristalina, Eutética em Diferentes Configurações de Confinamento*, Tese de Doutorado (PFI), Universidade Estadual de Maringá (2009).
- [18] G. A. Bonvallet, *Differential Scanning Calorimetric Study of the Nematic Liquid Crystal 5CB*, Physics Department. The College of Wooster, Wooster, Ohio, (1999).
- [19] S. Kobayashi e A. P. Mammana, *Revista Brasileira de Computação*, **3**, 19 (1984).
- [20] I. A. Pereira, V. S. T. Peressinotto, P. Paredez, M. O. Silva, V. P. Mammana e T. E. A. Santos, *XVIII COBEQ* (2010).
- [21] W. S. Cardoso, C. Longo e M. A. Paoli, *Quim. Nova*, **28**, 345 (2005).
- [22] A. Ghirardello, *Apostila Sobre Modulação PWM*, Colégio Politec, Americana, São Paulo. http://www.eletronica.org/arq_apostilas/apostila_pwm.pdf.
- [23] B. P. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication Systems*, 3rd ed, Oxford University Press, New York (1998).
- [24] M. H. Rashid, *Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações*, Makron Books, São Paulo (1999).
- [25] D. A. Oliveira, *Microscopia Óptica e Parâmetro de Ordem em Fases Nemáticas*, Tese de Doutorado (PFI), Universidade Estadual de Maringá (2011).

- [26] P. J. Collings, Jay S. Patel, *Handbook of Liquid Crystal Research*, Oxford University Press, (1997).
- [27] J. Michl and E. W. Thulstrup, *Spectroscopy with Polarized Light*, VCH Publishers, New York, (1986).
- [28] V. G. Bordo and Horst-Günter Rubahn, *Optics and Spectroscopy at Surfaces and Interfaces*, WILEY-VCH, (2005).
- [29] J. C. T. *Espectroscopia Molecular, Fundamentos, Métodos e Aplicações*. Manuais Universitários. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian,(1986).
- [30] K. Y. Lo, C. C. Shiah and C. Y. Huang, *Japan. J. of Appl. Phys.*, **45**, 891(2006).
- [31] A. P. Mammana, S. Kobayashi, A. Pavani Filho e C. A. Pisani, *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, **6**, 369 (1986).
- [32] I. H. Bechtold, *RBEF*, **27**, 331 (2005).
- [33] I. H. Bechtold, *Efeitos de Superfícies de Contorno na Orientação de Cristais Líquidos Liotrópicos*, Dissertação de Mestrado, IFUSP, Universidade de São Paulo (2000).
- [34] M. F. Moreira, *Desenvolvimento e Caracterização de um Sistema Laser de Cristal Líquido Colestérico acoplado à Fibra Óptica*. Tese de Doutorado, PUC (DFI), Rio de Janeiro (2004).
- [35] S. Frunza, T. Beica, R. Moldovan, I. Zgura and L. Frunza, *J. of Opt-elect. Adv. Mat.*,**7**, 2149 (2005).
- [36] K. Jong-Hyun, M. Yoneya, J. Yamamoto and H. Yokoyama, *Nature*, **420**, 159 (2002).
- [37] A. P. Mammana e V. P. Mammana, *Inovação Uniemp*, **2**, 44 (2006).
- [38] W. S. Braga, N.M. Kimura, D.D. Luders, A.R. Sampaio, P.A. Santoro and A.J.

- Palangana, *Eur. Phys. J.*, **24** 247 (2007).
- [39] Y. Hendriks, J. Charvolin, M. Rawiso and M. C. Holmes, *J. Phys. Chem.*, **87**, 3991 (1983).
- [40] J. C. Dias, *Cálculo de Constantes Elásticas e Efeitos de Reorientação Molecular em Cristais Líquidos Nemáticos*, Tese de Doutorado, PFI, Universidade Estadual de Maringá (2009).
- [41] E. B. Priestley, P.J. Wojtowicz, P. Sheng, *Introduction to Liquid Crystals*, Plenum Press, New York, (1975).
- [42] P. Wang, H. Zhang and J. Dai, *Opt.Lett.*, **13**, 6 (1988).