UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS DEPARTAMENTO DE FÍSICA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO MILAYRA SUEMI ENOKIDA

MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA NO CRISTAL LÍQUIDO 70BAC

Maringá 2011

MILAYRA SUEMI ENOKIDA

MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA NO CRISTAL LÍQUIDO 70BAC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharelado em Física, pelo curso de Física da Universidade Estadual de Maringá

Orientador: Profº. Drº. Newller Marcelo Kimura

Maringá 2011

Dedico este trabalho aos meus pais que deram

o melhor deles para minha formação educacional e moral.

AGRADECIMENTOS

A vida é um livro que escrevemos a cada dia uma nova página, e ao final de cada história temos um novo Capítulo. Por isso devemos sempre viver ao máximo cada fase da nossa vida. E agora que um capítulo termina e uma nova historia começa pretendo fazer uma singela homenagem a todos àqueles que estiveram ao meu lado nesses quatro anos de crescimento tanto profissional e quanto pessoal. A todos meus sinceros agradecimentos.

A Deus que durante todos os momentos me fortaleceu com coragem, fé e sabedoria.

Aos meus pais, Mário e Márcia pelo apoio em todos os momentos de minha vida. Por todo o amor e carinho necessário para minha formação.

Ao Prof. Drº Newller que me forneceu todo suporte para a concretização desse trabalho.

Aos meus irmãos, Matheus e Mayara, que tanto me fizeram rir e chorar, e me proporcionaram tantos momentos memoráveis.

A minha avó, Cida, por todas suas as orações, amor e carinho. E toda admiração que tenho por ela.

Aos meus amigos, Ana Carolina, Allyne, Adriane, Cristiane, Eduardo Henrique, Eduardo Perin, Eloá, Eloiza, Fábio, Fernando, Ghiovani, Jeremias, Lidiane, Mayse, Manuelle, Rafael Navarro, Renato Teles, que durante todos esses anos juntos nos momentos de tristeza e de saudades de casa me fizeram Sorrir, e nos momentos de fraqueza me deram animo e forças pra continuar. Com um simples abraço ou uma simples conversa.

A todos do Laboratório de Fluido Complexos que me auxiliaram no aprendizado da técnica de espectroscopia e de outra maneira. Em especial ao David e ao Anderson que sempre estiveram prontos e de bom grado me ensinaram e ajudaram.

RESUMO

A espectroscopia dielétrica é uma técnica muito importante no processo de investigação dos fluidos complexos. Neste trabalho focamos o estudo do comportamento dos parâmetros obtidos por esta técnica tais como permissividade elétrica e impedância em função da frequência, da temperatura e do campo elétrico aplicado no cristal líquido termotrópico E7 e principalmente com o cristal líquido 7OBAC. O emprego da técnica de espectroscopia dielétrica se faz através do uso do analisador de impedância Solartron 1260. É importante salientar que necessitamos de um porta-amostra com controle de temperatura e este também foi confeccionado. Na caracterização das transições de fase utilizamos a técnica de microscopia óptica de luz polarizada em conjunto com a técnica de análise digital de imagens.

PALAVRAS-CHAVE: PERMISSIVIDADE ELÉTRICA (REAL E IMAGINÁRIA), CRISTAL LIQUIDO TERMOTRÓPICO, IMPEDÂNCIA (REAL E IMAGINÁRIA).

ABSTRACT

The dielectric spectroscopy is more important technics in the investigation of complex fluids. In this paper we focus on the study of the behavior of the parameters obtained by this technics such as electric permittivity and impedance versus frequency, temperature and applied electric field in the thermotropic liquid crystal E7 and particularly of the liquid crystal 7OBAC. The use of dielectri spectroscopy tecnics is done by using the impedance analyzer Solartron 1260. Importantly, we need sample hloder with temperature control and this was also made. The characterization of phase transitions we will use the technics of polarized light microscopy in conjunction with the technics of digital image analysis.

KEYWORDS: ELECTRIC PERMITTIVITY (REAL AND IMAGINARY), LIQUID CRYSTAL THERMOTROPIC, IMPEDANCE (REAL AND IMAGINARY).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura molecular dos quatro compostos que formam o CL E7.	9
Figura 2: Estrutura molecular do 4-n-heptyloxybenzoic (70BAC)	10
Figura 3: Representação da estrutura molecular de um sólido cristalino	10
Figura 4: (a) Representação da Molécula Discótica; (b) Representação da Molécula Cilíndrica;	11
Figura 5: Estrutura molecular da mesofase nemática calamítica no qual n é o vetor diretor	12
Figura 6: Estrutura molecular da mesofase colestérica para diferentes orientações do vetor diretor	12
Figura 7: Representação das estruturas da mesofase Esmética A, B e C	13
Figura 8: (a) Representação estrutural de uma micela cilíndrica. (b) Representação estrutural de uma micela e	m
forma de disco ou discótica. (c) Representação estrutural da fase lamelar.	14
Figura 9: Representação da estrutura molecular de um Líquido Isotrópico	14
Figura 10: (a) Analalisador de impedância Solartron 1260; (b) Porta-amostra capacitor constituido de vidro	16
Figura 11: Microscopia Óptica de Luz Polarizada	17
Figura 12: Porta-amostra utilizado para fazer as medidas de espectroscopia dielétrica no CL 7OBAC. Contém	1
um capacitor cilíndrico com controle de temperatura e um medidor para medir a espessura do capacitor	18
Figura 13: Um resistor na qual por ele passa uma corrente alternada	19
Figura 14: Indutor em corrente alternada	20
Figura 15: Circuito com um capacitor em corrente alternada	20
Figura 16: Circuito de corrente alternada RLC em série.	22
Figura 17: Representação vetorial da impedância para o circuito RLC em série	23
Figura 18:Diagrama de fasores para o circuito RLC em série no caso de VL > VC.	24
Figura 19: Diagrama de fasores para circuito RC em paralelo.	25
Figura 20: Representação triangular da admitância.	26
Figura 21: Espectro de impedância para um resistor ideal.	28
Figura 22: Espectro de impedância para um capacitor ideal.	29
Figura 23: Espectro de impedância para um capacitor e um resistor em série.	30
Figura 24: Espectro de impedância para um capacitor e um resistor em paralelo	31
Figura 25: Espectro de impedância para um resistor em série com uma associação de um resistor em série con	n
um capacitor	32
Figura 26: Espectro de impedância do resistor ôhmico	33
Figura 27: Espectro de impedância do capacitor de capacitância conhecida.	33
Figura 28: Espectro de impedância para um capacitor e resistor em série	34
Figura 29: Espectro de impedância para um capacitor e um resistor em paralelo	34
Figura 30: Espectro de impedância para um resistor com uma associação de um resistor em paralelo com um	
capacitor	35
Figura 31:Índice de refração em função da temperatura para o composto E7	35
Figura 32: (a) medida da permissividade elétrica real variando a frequência na temperatura de 50,6°C. (b)	
Medida da permissividade elétrica imaginária variando a frequência na temperatura de 50,6°C	36
Figura 33: (a) Medida da permissividade elétrica real. (b) Medida da permissividade elétrica imaginária	36
Figura 34: (a) Permissividade elétrica real em relação à temperatura. (b) Permissividade elétrica imaginária er	m
relação à temperatura do composto E7	37
Figura 35: (a)Amostra na fase Sólido Cristalino, (b) Amostra transitando da fase sólido cristalino para fase	
Esmético C, (c) Amostra na fase Esmético C, (d)Amostra transitando da fase Esmético A para fase Nematico	1,
(e) Amostra na fase Nematico 1, (f) Amostra transitando da fase Nemático 1 para fase Nemático 2, (g) Amost	tra
na fase Nemático 2, (h) Amostra transitando da fase Nemático 2 pra fase Isotrópico, (i) Amostra na fase	
Isotrópica	38
Figura 36: Gráfico do desvio padrão pela temperatura	38
Figura 37: (a) Gráfico da Impedância Imaginária pela Impedância Real para temperaturas na fase Nemático 1	e
na fase Nemático 2, (b) Gráfico da Impedância Imaginária pela Impedância Real para temperatura na fase	
Nemático 1	39
Figura 38: (a) Impedância Real pela Frequência, (b) Impedância Imaginária pela freqüência	39
Figura 39: (a) Gráfico da Impedância Real pela freqüência, (b) Impedância Imaginária pela freqüência	40
Figura 40: (a) Gráfico da Impedância Real pela temperatura na transição de fase S _C -N ₁ , (b) Gráfico da	
Impedância Imaginária pela temperatura	40
Figura 41: (a) Impedância Real pela temperatura, (b) Impedância Imaginária pela temperatura	41

Sumário

1	INTRO	ODU	JÇÃO	9		
1.1 SÓLIDO CRISTALINO (C _r)				10		
	1.2 C	RIST	ΓΑL LÍQUIDO	11		
	1.2.	1	CRISTAL LÍQUIDO TERMOTRÓPICO	11		
	1.2.	2	CRISTAL LÍQUIDO LIOTRÓPICO	13		
	1.3	LÍQ	UIDOS ISOTRÓPICOS	14		
	1.4	ESP	PECTROSCOPIA DIELÉTRICA	15		
	1.5	OBJ	JETIVOS	15		
	2.1 RE	ESUL	LTADOS E DISCUSSÃO	18		
4	4 REFERÊNCIAS42					

1 INTRODUÇÃO

O austríaco Friedrich Reinitzer descobriu em 1888 as fases intermediárias analisando a estrutura de um composto orgânico o Benzoato de Colesterila. Ele percebeu que este composto apresentava dois pontos de fusão, no qual o primeiro era em 145,5°C sendo que a amostra tornava-se um fluido de aparência turva e não apresentava um ponto nítido de fusão e se tornava transparente quando a amostra atingia a temperatura de 178,5 °C. Com essa descoberta começou um novo campo de estudos e em 1889, o físico alemão Otto Lehmann verificou que muitos compostos orgânicos apresentavam comportamento semelhante ao analisado por Reinitzer, reconhecendo o fato de que muitas substâncias orgânicas apresentam fases intermediarias entre a fase sólida e a fase líquida. Por esse motivo Lehmann nomeou essas substancias de Cristais Líquidos. Em 1922, G. Friedel propôs o termo *fases mesomórficas* ou *mesofases* para designar este novo estado da matéria.

Os compostos (CL) utilizados nesse trabalho foram o E7 e o 7OBAC. O primeiro composto é formado por uma mistura de quatro outros compostos cujas estruturas moleculares podem ser observadas na figura 1. O CL E7 possui as mesofase Nemática Calamítica e Isotrópico. Lembrando que este composto foi adquirido comercialmente.



Figura 1: Estrutura molecular dos quatro compostos que formam o CL E7.

O segundo composto também conhecido como 4-n-heptyloxybenzoic (7OBAC) tem em sua estrutura representado na Fig.2.



Figura 2: Estrutura molecular do 4-n-heptyloxybenzoic (7OBAC)

O CL 7OBAC possui como mesofase Esmético C, Nemático 1 e Nemático 2.

1.1 SÓLIDO CRISTALINO (Cr)

Os sólidos cristalinos são materiais que possuem ordenamento tridimensional de suas moléculas, caracterizando uma rede cristalina. Eles exibem ordem de longo alcance translacional, orientacional e rotacional, podendo alguns apresentar anisotropia óptica ou birrefringência.



Figura 3: Representação da estrutura molecular de um sólido cristalino

1.2 CRISTAL LÍQUIDO

Os Cristais Líquidos são substâncias que têm como característica principal uma fase com simultâneas propriedades de cristal e de líquido. O Cristal Líquido apresenta birrefringência que é uma característica da fase sólida cristalina e fluidez como característica dos líquidos. Eles são divididos em dois grupos distintos, os cristais líquidos termotrópicos (CLT) e os cristais líquidos liotrópicos (CLL).

1.2.1 CRISTAL LÍQUIDO TERMOTRÓPICO

Os CLT têm como constituinte básico moléculas alongadas (cilíndricas) ou moléculas espalmadas (discóticas) e suas transições de fases se dão em função da temperatura e pressão.



Figura 4: (a) Representação da Molécula Discótica; (b) Representação da Molécula Cilíndrica;

Nos termotrópicos as disposições das moléculas alongadas podem obter as seguintes fases: nemática, colestérica e esmética.

A mesofase nemática possui uma ordem orientacional de longo alcance, ou seja, caracterizam-se por uma direção preferencial de orientação em suas moléculas sem qualquer ordem posicional. As moléculas constituintes de uma mesofase nemática calamítica orientam-se espontaneamente com seu eixo maior de simetria aproximadamente paralelos uns aos outros, definindo uma direção média preferencial. Essa direção preferencial é definida por um vetor unitário chamado de diretor.



Figura 5: Estrutura molecular da mesofase nemática calamítica no qual n é o vetor diretor

Na mesofase colestérica as moléculas se organizam em camadas e, similarmente aos nemáticos, apresentam uma direção preferencial média de orientação especificada pelo vetor diretor. Deslocando-se, porém, perpendicularmente em relação ao plano das camadas, nota-se uma mudança na direção dos diretores, descrevendo uma estrutura helicoidal, ou seja, ocorre uma torção no vetor diretor. A ausência de ordem translacional contribui para que esta mesofase apresente razoável fluidez.



Figura 6: Estrutura molecular da mesofase colestérica para diferentes orientações do vetor diretor

Na mesofase esmética, as moléculas encontram-se arranjadas em uma série de camadas paralelas entre si, na qual apresentam um ordenamento translacional das camadas. Em relação aos planos paralelos das camadas, as moléculas se orientam com seus eixos de simetria perpendicularmente a esses planos e paralelamente entre si. Portanto, apresentando ordenamento orientacional das moléculas ao longo de uma direção preferencial denominada vetor diretor da fase. Por outro lado, não apresenta ordenamento posicional das moléculas, sendo que estas podem ter seus centros de massa distribuídos aleatoriamente dentro das camadas. Devido às diferentes direções de orientação das moléculas, que podem ocorrer no interior das camadas da fase esmética, surgem diferentes tipos de esméticos. Em uma ordem de classificação, os mais comuns são os de tipo A, B e C.

A fase esmética **A** exibe as moléculas orientadas perpendicularmente às camadas com seus centros de massa distribuídos aleatoriamente dentro das mesmas, semelhante ao que ocorre em um líquido isotrópico. A fase esmética C exibe estrutura semelhante à fase esmética A, porém as moléculas apresentam certa inclinação em relação ao plano das camadas. Quanto à fase esmética B, pode-se perceber que estas não apresentam grande fluidez como as que ocorrem nas fases A e C, pois seus centros de massa moleculares, em cada camada, encontram-se organizados em volumes de correlação com ordem hexagonal.



Figura 7: Representação das estruturas da mesofase Esmética A, B e C

1.2.2 CRISTAL LÍQUIDO LIOTRÓPICO

Os cristais líquidos liotrópicos são substâncias homogêneas obtidas a partir da mistura de um ou mais compostos e um solvente, que geralmente é a água. As transições de fase neste sistema são obtidas em função das concentrações relativas dos componentes da mistura, da temperatura e pressão.

O constituinte básico do cristal líquido liotrópico são as micelas. As micelas são formadas por um agrupamento de moléculas anfifílicas, na qual tais moléculas possuem uma "cabeça" polar ligada a uma ou mais cadeia carbônica (cauda) apolar. As fases encontradas nos liotrópicos são Nemática Discótica, Nemática Calamítica, Nemática Biaxial, Lamelar, Hexagonal e Isotrópica.

Medidas utilizando a técnica de difração de raios-X identificaram agregados micelares como sendo elipsóides prolatos e elipsóides oblatos, as quais foram respectivamente classificadas como fase nemática cilíndrica ou calamítica e fase nemática discótica, podendo exibir, também, a fase nemática biaxial, que foi observada pela primeira vez em sistemas liotrópicos em 1980. Na fase lamelar, as moléculas anfifílicas são encontradas em camadas contendo água entre as camadas paralelas. Na fase hexagonal, as micelas têm formato cilíndrico de tamanho infinito, arranjadas de maneira que possibilitam a formação de uma estrutura hexagonal no espaço. Na Fig. 8, são apresentadas algumas estruturas micelares existentes nas mesofases liotrópicas.



Figura 8: (a) Representação estrutural de uma micela cilíndrica. (b) Representação estrutural de uma micela em forma de disco ou discótica. (c) Representação estrutural da fase lamelar.

1.3 LÍQUIDOS ISOTRÓPICOS

Líquidos isotrópicos são substâncias líquidas, nas quais as moléculas constituintes não exibem ordem posicional de longo alcance, orientacional e rotacional em nenhuma direção do espaço, ou seja, as moléculas estão distribuídas aleatoriamente num volume qualquer.



Figura 9: Representação da estrutura molecular de um Líquido Isotrópico

1.4 ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA

A espectroscopia dielétrica é uma técnica utilizada na caracterização das propriedades elétricas de materiais e nas interfaces de materiais sólidos e líquidos, com diferentes características iônicas como os semicondutoras, condutoras e isolantes. A técnica consiste em analisar o comportamento do material entre os eletrodos, aplicando-se um campo elétrico conhecido e observar como o material responde a esse estímulo. Tal resposta depende de outros fatores controláveis, como temperatura, pressão ou campo estático aplicado, sendo que o primeiro parâmetro citado tem sido citado e descrito na literatura. A interação do campo elétrico com a matéria provoca uma variedade de processos microscópicos que podem determinar a resposta do material em nível macroscópico. Podemos citar como exemplo dessa interação: transporte de cargas no material, polarização das moléculas, orientação dos dipolos e ainda o transporte de cargas a partir de espécies atômicas, carregadas ou não que se formam no material ou a sua volta, através de processos químicos de oxi–redução. A taxa na qual ocorre o transporte de cargas depende da resistência ôhmica dos eletrodos, da natureza do material e da taxa de reação na interface.

1.5 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos primeiramente operacionalizar a técnica de espectroscopia dielétrica utilizando a ponte de impedância Solartron 1260. A viabilização da amostra de interesse o CLT 7OBAC. A construção de um porta-amostra com controle de temperatura e com o medidor de espessura para um capacitor. Determinar parâmetros tais como permissividade elétrica e impedância e por último analisar e contextualizar os resultados experimentais.

2 DESENVOLVIMENTO

Nos primeiros contatos com o equipamento foram realizadas medidas de parâmetros elétricos em resistores, capacitores, bem como em circuitos contendo capacitores e resistores em série e em paralelo. Tais medidas foram importantes, pois seus resultados já eram conhecidos, sendo assim, verificamos que nossas medidas estão de acordo com as medidas já realizadas anteriormente. Já as medidas contendo associações de capacitores e resistores nos fornecem resultados que podem equivaler a resultados obtidos para medidas com fluidos complexos.

Ainda nesse trabalho, utilizamos o analisador de Impedância Solartron1260 (figura 9a) e utilizamos como porta amostra um capacitor constituído de vidro recoberto com um filme de SnO₂, com espessura de 200nm e área de 33mm^2 (figura 9b). O filme de SnO₂ foi depositado sobre o vidro pela técnica de decomposição de vapores. Ressaltando que a espessura da amostra é de 25µm. Primeiramente realizamos nossas medidas no cristal líquido E7, que apresenta fase nemática calamítica em temperatura ambiente e o seu ponto de transição nemático-isotrópico se encontra a 58°C. Considerando o E7 realizamos medidas elétricas em função da temperatura (controlada pelo banho térmico) iniciada na temperatura de 25°C (fase nemática) até 65 °C(fase isotrópica).



Figura 10: (a) Analalisador de impedância Solartron 1260; (b) Porta-amostra capacitor constituido de vidro.

No cálculo da permissividade elétrica relativa real pode-se empregar a equação $\varepsilon'_r = C(\omega)/C_0$, que leva em consideração a área do porta amostra e também sua espessura. Onde " $C(\omega)$ " é a capacitância que foi medida em função da freqüência e " C_0 " é dado pela equação $C_0=\varepsilon_0A/d$, sendo " ε_0 " a permissividade elétrica no vácuo ($\varepsilon_0=8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), A a área circular do capacitor e d a espessura da amostra.

Para o cálculo da permissividade elétrica relativa imaginaria foi utilizada a equação ε "_r=1 / ω C₀ R₀(ω). No qual, "R₀(ω)" é a resistência (medida em função da freqüência), ω =2 π f , C₀= ε_0 A/d, sendo " ε_0 " a permissividade elétrica no vácuo (ε_0 =8,85 x 10⁻¹² F/m), A é a área circular do capacitor e "d" a espessura da amostra.

Em seguida fizemos medidas com o Cristal Líquido Termotrópico 7OBAC para sabermos exatamente a temperatura de transição de fase utilizamos da técnica de Microscopia óptica de luz polarizada com a analise digital de imagens. A técnica consiste em utilizar um microscópio de luz polarizada a LEICA DMLP. O microscópio tem acoplado uma câmera LEICA DFC295 permitindo assim a captura das imagens visíveis ao microscópio em um computador. Junto ao aparato do microscópio temos um sistema térmico que nos permite fazer a variação de temperatura na amostra analisada. Este sistema consiste em uma unidade de aquecimento eletrônico, o MK1000, ligado diretamente ao computador (Fig. 11). Assim, colocamos a amostra de 7OBAC em duas lâminas de vidro e em seguida acoplamos no microscópio óptico. Começamos as medidas em 160 °C até próximo de 85 °C com uma taxa de variação de 0,1 °C na temperatura tirando uma foto por minuto. Após ter terminado através de um software foi feito a análise digital de imagens no qual fizemos o gráfico do desvio padrão da amostra em função da temperatura.



Figura 11: Microscopia Óptica de Luz Polarizada

Logo após a definição das temperaturas de transição do 7OBAC, fizemos a medida de espectroscopia de impedância no composto. O aparato experimental utilizado neste é diferente do que foi utilizado no E7. O capacitor utilizado é cilíndrico e de metal possuindo controle de

temperatura. O porta-amostra acopla o capacitor e tem um medidor para medir a espessura da amostra dentro do capacitor. Como representado na Fig. 12.



Figura 12: Porta-amostra utilizado para fazer as medidas de espectroscopia dielétrica no CL 7OBAC. Contém um capacitor cilíndrico com controle de temperatura e um medidor para medir a espessura do capacitor.

As transições de fase do composto 7OBAC ocorrem em temperaturas muito elevadas, por esse motivo as medidas de espectroscopia foram realizadas em três partes e de maneira decrescente, ou seja, da maior temperatura para temperatura de menor valor. A primeira obteve como temperatura inicial 135,0° C e como temperatura final 115,5°C, a segunda se iniciou a 96 °C a 89,5 °C e a última foi medida a temperatura de 104,0 °C a 85 °C. A amostra no capacitor utilizado apresentou espessura de 25 µm. Lembrando que o 7OBAC possui as seguintes transições de fase sólido cristalino, esmética A, nemática 1, nemática 2 e isotrópica. Em temperatura ambiente a 25° C, amostra se encontra na fase sólido cristalino e em, aproximadamente, 145,0°C amostra vai para o estado liquido isotrópico.

2.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, utilizamos circuitos ligados a corrente AC. Quando analisamos um circuito AC o conceito de resistência que usualmente se atribui a resistores precisa ser

estendido, pois os resistores, capacitores e indutores oferecem resistência à passagem de uma corrente alternada. A resistência que esses elementos apresentam ao se oporem à corrente alternada é denominada de reativa ou reatância. Observando a energia dissipada no circuito é percebe-se a diferença entre resistência e reatância, ou seja, numa resistência a energia dissipada ocorre unicamente na forma de calor enquanto que na reatância a energia é armazenada periodicamente em campos elétricos ou magnéticos e não ocorre perda de calor. Assim, a impedância é a ação conjunta de resistência e reatância. Para o cálculo da impedância, examinamos a tensão em cada um dos componentes em série, representados pela Fig.13, tomando a corrente que flui do tipo senoidal:

$$i = I \cos \omega t$$
 (1)

onde i é a corrente num instante de tempo qualquer t.

Observando um resistor R através do qual passa uma corrente senoidal expressa na Eq. (1). Como mostra a Fig. 13.



Figura 13: Um resistor na qual por ele passa uma corrente alternada.

De acordo com a lei de Ohm a diferença de potencial instantânea v_R , entre o ponto "a" e "b" é dada por:

$$v_R = Ri = RI \cos(\omega t) \tag{2}$$

Nota-se que a tensão v_R está em fase com a corrente alem disso depende do cosseno de " ωt ". A voltagem máxima V_R , ocorre quando o cosseno tem valor máximo, ou seja, " $cos(\omega t)=1$ ", assim, V_R fica:

$$V_R = RI \tag{3}$$

Agora, observando um indutor com indutância L. Então, na Fig. 13, no lugar do resistor colocamos um indutor, supondo que a corrente seja a expressa na Eq. (1). Como representado na Fig. 14.



Figura 14: Indutor em corrente alternada.

A diferença de potencial v_L é dada por:

$$v_L = L \, di/dt = -\omega \, LI \, sen \, (\omega \, t) = \omega \, cos \, (\omega \, t + \pi/2)$$
 (4)

Pela Eq. 4 verificamos que a tensão v_L está adiantando $\pi/2$ em relação a corrente. A amplitude de tensão V_L é dado por :

$$V_L = \omega L I$$
 (5)

Assim, definimos a reatância indutiva X_L , como sendo:

$$X_L = \omega L \qquad (6)$$

Como X_L é a razão entre uma voltagem e uma corrente, sua unidade no SI é o ohm, a mesma usada para resistência.

E por fim, ao substituir a resistência da Fig. 13 por um capacitor com capacitância C, como mostra a Fig. 15.



Figura 15: Circuito com um capacitor em corrente alternada.

Utilizaremos a corrente da Eq. (1). Para encontrar a voltagem instantânea v_C através do capacitor e assim montamos a Eq. (7).

$$v_C = q/C = (1/\omega C) I \operatorname{sen}(\omega t) = (1/\omega C) I \cos(\omega t - \pi/2)$$
(7)

na qual, a expressão (7) usamos a relação $q = \int i dt$. Esta equação revela que a tensão v_c está atrasada $\pi/2$ da corrente. O coeficiente $(1/\omega C)I$ têm dimensão de volt e representa a amplitude da tensão C. Representada pela Eq. 8.

$$V_C = (1/\omega C) I \tag{8}$$

A reatância capacitiva é dada por:

$$X_C = (1/\omega C) \quad (9)$$

Agora, calculando a tensão instantânea total v dada pela somatória de v_R + v_L + v_C , resulta:

$$v = RI \cos(\omega t) + \left[(1/\omega C) - \omega L \right] I \ sen(\omega t) \quad (10)$$

Utilizando da relação trigonométrica do tipo *a cos x* + *b sen x* pode ser expressa na forma *A cos (x* + φ), com A= (a² + b²)^{1/2} e *tg* φ = - *b/a*, podemos reescrever a Eq. (5) como

$$v = V \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

na qual

$$V = I \left[R^2 + (\omega L - I/\omega C)^2 \right]^{1/2} = I \left[R^2 + (XL + XC)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
(12)

e

$$\varphi = \arctan\left[(\omega L - 1/\omega C)/R\right] = \arctan\left(X_L + X_C/R\right) \quad (13)$$

A letra Z normalmente é o símbolo utilizado para a impedância, Usando Z, essa equação pode ser escrita como

$$V=ZI$$
 (14)

A expressão 14 que formalmente é idêntica a lei de Ohm, somente colocando a impedância desempenhando a função da resistência equivalente no circuito DC. Ela nos

mostra que existe também uma relação de proporcionalidade entre o valor máximo da tensão total e o valor máximo da tensão total e o valor máximo da corrente. Para elementos em série, temos:

$$Z = [R^{2} + (X_{L} - X_{C})^{2}]^{\frac{1}{2}}$$
(15)

A equação (15) fornece a impedância, e através dela, podemos definir a impedância de um circuito mais complexo como a razão entre tensão total e a corrente máxima.

Agora analisando os elementos em série como mostra a Fig. 16:



Figura 16: Circuito de corrente alternada RLC em série.

A Eq. (15) nos mostra que a impedância dos três elementos da Fig. 13 pode ser imaginada como a hipotenusa de um triângulo retângulo, cujos lados medem $R \, e \, X_L - X_C$, ou como o vetor resultante de dois vetores perpendiculares entre si cujos módulos medem $R \, e \, X_L$ $- X_C$, como apresentado na Fig. 17. O ângulo nessa figura representa a defasagem entre a tensão total e a corrente máxima.



Figura 17: Representação vetorial da impedância para o circuito RLC em série.

A representação vetorial pode fornecer também as amplitudes de tensões, pois a Eq. (12) resulta em:

$$V = I[R^{2} + (X_{L} - X_{C})^{2}]^{\frac{1}{2}} = [(RI)^{2} + I^{2}(X_{L} - X_{C})^{2}]^{\frac{1}{2}} = [(V_{R})^{2} + (V_{L} - V_{C})^{2}]^{\frac{1}{2}}$$
(16)

O diagrama das tensões é, portanto, semelhante ao da Fig. 10. Se esse diagrama for posto a girar com velocidade angular ω , as projeções dos vetores de módulo V_R , V_L , $V_C \in V$ sobre o eixo horizontal fornecerão os valores de v_R , v_L , $v_C \in v$ dados respectivamente pelas expressões (2), (4), (8) e (10). Neste diagrama, no qual algumas literaturas denominam de fasores, o vetor de módulo I representa a corrente através dos três elementos em série. Ele foi desenhado na mesma direção do vetor módulo V_R , pois pela Eq. (2), a tensão e a corrente no resistor estão sempre em fase; a corrente instantânea dada pela Eq. (1) é expressa pela projeção sobre o eixo x.



Figura 18:Diagrama de fasores para o circuito RLC em série no caso de VL > VC.

Os vetores representados nas Figs. 17 e 18 não devem ser identificados com os vetores tratados em textos de análise vetorial, uma vez que as grandezas consideradas nessas figuras não têm a mesma natureza das grandezas vetoriais que aparecem em mecânica ou eletromagnetismo.

Analisando elementos em paralelo e considerando o caso de um resistor e um capacitor em paralelo e alimentados por uma tensão v = V cos (ωt), temos que as correntes instantâneas $i_R e i_C$ através do resistor e do capacitor são dadas por:

$$i_R = v/R = V/R \cos(\omega t) = I/R \cos(\omega t)$$
(17)
$$i_C = dq/dt = C dv/dt = -\omega CV sen(\omega t) = -V/X_C sen(\omega t) = I_C \cos(\omega t + \pi/2)$$
(18)

A corrente total instantânea $i = i_R + i_C$, é portanto, $i = I_R \cos(\omega t) - I_C \sin(\omega t)$, ou

$$i = I \cos(\omega t + \varphi)$$
 (19)

onde

$$I = [I^2_{C} + I^2_{R}]^{1/2} \qquad (20)$$

e $\varphi = arctg I_C/I_R$. Disto se conclui que a corrente total pode ser imaginada como o vetor resultante de dois vetores módulos respectivamente iguais a $I_R e I_C$ e perpendiculares entre si. Se esse vetores forem postos a girar com velocidade angular ω as projeções dos vetores módulos $I_R e I_C e I$ sobre o eixo horizontal fornecerão os valores instantâneos i_R , $i_C e i$, dados respectivamente pelas Eqs. (17), (18) e (19). O ângulo entre $I_R e I_C$ representa a defasagem entre a corrente *i* e a tensão *v*, que de acordo com a expressão (17) está em fase com i_R .



Figura 19: Diagrama de fasores para circuito RC em paralelo.

Reescrevendo a Eq. (20) na forma elevando ambas as partes ao quadrado e dividindo por V^2 , temos a Eq. (21).

$$(1/Z)^{2} = (1/R)^{2} + (1/X_{C})^{2} (21)$$

Representa-se o inverso da impedância como sendo a admitância *Y*, como a hipotenusa de um triângulo retângulo, cujos lados medem 1/R e $1/X_C$ siemens (ou ohms⁻¹) (Fig. 20):



Figura 20: Representação triangular da admitância.

A representação vetorial de grandezas como as que aparecem nas Fig. 17 a 19 são análogas à representação geométrica de um número complexo no plano complexo. Usando a relação de Euler, onde $j^2 = -1$, podemos substituir as funções cossenos ou senos por funções exponenciais complexas, desde que ao final dos cálculos se tome somente a parte real ou imaginaria do resultado, de acordo com a conveniência.

A corrente $i = I \cos \omega t$ pode ser substituída por $i^* = I e^{j\omega t}$. Procedendo assim, quantidades tais como di/dt ou $q = \int i dt$ ficarão $di^* / dt = j\omega I e^{j\omega t}$ e $i^{*'} = (1/j\omega)I e^{j\omega t}$. Desta forma, a tensão aplicada nos três elementos da Fig. 13, v = Ri + L di/dt + q/C, deve ser substituída pela expressão

$$v^* = (R + j\omega L + 1/j\omega C) I e^{j\omega t}$$
(22)

ou

$$v^* = (R + j\omega L + 1/j\omega C) i^* \quad (23)$$

Tomando a parte real de v^* , obtemos a tensão instantânea total v. Para isso desenvolvemos o produto do segundo membro da equação (22), levando em consideração que separando a parte real do resultado, podemos mostrar então que:

$$Re(v^*) = v = RI\cos\omega t + [(1/\omega C) - \omega L] I \operatorname{sen} \omega t \quad (24)$$

Assim, a Eq. (24) é equivalente a equação (10).

A importância da equação (22) está presente no fato dela mostrar que a reatância indutiva e capacitiva podem ser representadas por quantidades complexas e que estas quantidades pode ser adicionadas por uma regra análoga àquela utilizada para resistências em série.

A fase da tensão em relação à corrente, que está adiantada de $\pi/2$ no indutor e atrasada de $\pi/2$ no capacitor, é garantida pela presença do operador j. Isso pelo fato do plano do vetor complexo estar sendo multiplicado por j gira de $\pi/2$ no sentido anti-horário, e ao ser multiplicado por -j, gira de $\pi/2$ no sentido horário mantendo o seu módulo. De fato:

$$v_{L}^{*} = j\omega L/i^{*} = \omega LI (exp^{j\pi/2}) x (e^{j\omega t}) = \omega LI e^{j(\omega t + \pi/2)} (25)$$

e

$$v_{C}^{*} = (1/j \ \omega C) \ i^{*} = (-j/\omega C) \ i^{*} = (1/\omega C) \ I \left[e^{-j \ \pi/2} \ x \ e^{j\omega t} \right] = (1/\omega C) \ I \ e^{j(\omega \ t - \pi/2)}$$
(26)

Nas equações 26 e 27as quantidades reais são representadas por vetores paralelos ao eixo x e as quantidades imaginárias em vetores paralelos ao eixo y. Assim, a impedância complexa será representada, por um vetor de módulo Z, idêntico aquele mostrado na Fig. 17, e cujo argumento será o ângulo de fase. Analisando a Eq. (22), temos que o fator expresso entre parênteses é a quantidade complexa com dimensão de resistência, que está definida como impedância complexa e representada pela letra Z*. Assim,

$$Z^* = R + j\omega L + l/j\omega C = R + j(\omega L - l/\omega C) = R + j(X_L - X_C) = Z e^{j\varphi}$$
(27)

na qual $Z = |Z^*| = [R^2 + (X_L - X_C)^2]^{\frac{1}{2}}$ e $tg \varphi = (X_L - X_C)/R$ resultados já obtidos anteriormente.

A equação (23) pode ser reescrita como:

$$v^* = Z^* i^* = Z e^{j\varphi} x I e^{j\omega t} = ZI e^{j(\omega t + \varphi)}$$
 (28)

A parte real da Eq. (28) é, dada pela Eq. (11). Estendendo o tratamento desenvolvido acima, pode-se mostrar que a impedância resultante Z^* de um circuito contendo varias impedâncias em série, Z^*_{1} , Z^*_{2} ,..., Z^*_{n} , é dada por

$$Z^* = Z^*_1 + Z^*_2 + \dots + Z^*_n (29)$$

Esta fórmula também corresponde para impedâncias em paralelo pode ser determinada, tendo em mente que a tensão em cada uma delas é a mesma. Pela Eq. (28), a corrente através da impedância Z^*_k é v^*/Z^*_k e a corrente total $i^* = v^*$ ($1/Z^*_1 + 1/Z^*_2 + ... + 1/Z^*_n$).

Portanto, conclui-se que a impedância equivalente Z^* é dada por:

$$i^* / v^* = (1/Z_1^* + 1/Z_2^* + \dots + 1/Z_n^*)$$
 (30)

O espectro de impedância é obtido expressando graficamente a parte real e imaginária de Z* em função da frequência.

Quando um resistor de resistência R for ligado diretamente à uma fonte AC, a impedância complexa do circuito é calculada a partir da Eq. (27), no qual $Z^* = R$, desse modo $Re [Z^*] = R$ e $Im [Z^*] = 0$. O espectro de impedância é dado pelo gráfico representado pela Fig. 21.



Figura 21: Espectro de impedância para um resistor ideal.

Quando um capacitor de capacitância C é ligado à fonte AC, a impedância complexa do circuito será $Z^* = -(1/\omega C)j$, donde se conclui que $Re [Z^*] = 0$ e $Im [Z^*] = -1/\omega C$. A Fig. 22 mostra o espectro de impedância para este caso.



Figura 22: Espectro de impedância para um capacitor ideal.

Ao analisarmos um circuito com resistor e capacitor em série, a impedância complexa desse circuito ligado diretamente à fonte AC, será a representada pela Eq. (27) e dada por:

$$Z^* = R - (1/\omega C)j \qquad (31)$$

As partes reais e imaginárias de Z* são, portanto $Re [Z^*] = R e Im[Z^*] = -1/\omega C$, e o espectro de impedância terá a forma mostrada na Fig. 23:



Figura 23: Espectro de impedância para um capacitor e um resistor em série.

Agora ligando diretamente em uma fonte AC a uma associação de resistor e capacitor em paralelo a impedância complexa do circuito poderá ser determinada por meio da Eq. (30), no qual $Z_{I}^{*} = R \ e \ Z_{2}^{*} = 1/j\omega C$. Assim, $1/Z^{*} = R / (1 + j\omega RC)$. Multiplicando o numerador e denominador desta fração por 1- j ω RC, obtemos:

$$Z^* = [R (1 - j\omega RC)]/1 + (\omega RC)^2 = [R/1 + (\omega RC)^2] - \omega R^2 C/1 + (\omega RC)^2$$
(32)

Cujas componentes real e imaginária estão representadas graficamente na Fig. 24.



Figura 24: Espectro de impedância para um capacitor e um resistor em paralelo.

Supondo que um resistor (R_2) está ligado em série com uma associação de outro resistor (R_1) e um capacitor em paralelo, no qual o conjunto está ligado a uma fonte AC, fazendo uso dos resultados obtidos no exemplo anterior da Eq. (29), a impedância complexa no circuito fica dada por:

$$Z^* = R_2 + [R_1/1 + (\omega R_1 C)^2] - [\omega R_1^2 C/1 + (\omega R_1 C)^2] j \quad (33)$$

As componentes real e imaginária são apresentadas na Fig. 25.



Figura 25: Espectro de impedância para um resistor em série com uma associação de um resistor em série com um capacitor.

O analisador de impedância (Solartron 1260) foi utilizado para fazer medidas de impedância em resistores e capacitores isoladamente, em circuitos de resistores e capacitores em série e em paralelo, e um circuito misto com um resistor em série com uma associação de resistor em paralelo com um capacitor. Com as medidas obtidas com o analisador de impedância, montamos os gráficos presentes nas Figs. 26 a 30.

Para o resistor, analisamos a impedância real e imaginaria em função da freqüência e mostramos isso graficamente pela Fig. 26, e ao analisá-la, observamos que a parte real da impedância é uma reta paralela ao eixo x e indica o valor da resistência, já a parte imaginaria da impedância é uma reta em zero, também paralela ao eixo x, exatamente da forma que é apresentada na teoria.



Figura 26: Espectro de impedância do resistor ôhmico.

O circuito contendo o capacitor foi demonstrado graficamente na Fig. 27.



Figura 27: Espectro de impedância do capacitor de capacitância conhecida.

O gráfico do espectro de impedância nos mostra que a parte real da impedância é uma reta em zero e paralela ao eixo x, e a parte imaginária da impedância é uma curva exatamente como mostra a Fig. 27.

O circuito com um capacitor em série com um resistor está representado pela Fig. 28.



Figura 28: Espectro de impedância para um capacitor e resistor em série.

O gráfico representado na Fig. 28 mostra que o valor da impedância real é uma reta em 1000 Ω que é equivalente ao valor da resistividade da resistência e a parte imaginária é a curva $Im[Z^*] = -1/\omega C$. Como apresentado na Fig.23.

O circuito de um resistor em paralelo com um capacitor está representado pela Fig. 29. As curvas real e imaginária da impedância condizem com as curvas representada na Fig. 24.



Figura 29: Espectro de impedância para um capacitor e um resistor em paralelo.

A Fig. 30 representa os espectros de impedância para associação de um resistor em série com uma associação de outro resistor em paralelo com um capacitor.



Figura 30: Espectro de impedância para um resistor com uma associação de um resistor em paralelo com um capacitor.

As curvas apresentadas na Fig. 30 estão de acordo com a teoria apresentada na Fig. 25.

O primeiro contato com a amostra de interesse E7, realizamos medidas de índice de refração em função da temperatura, com o objetivo de caracterizar a transição N – I. Nos resultados obtidos (Fig. 31) podemos observar que a amostra na fase nemática possui dois índices de refração (Ordinário e extraordinário) e na fase isotrópica apenas um único índice de refração.



Figura 31:Índice de refração em função da temperatura para o composto E7.

No momento em que no gráfico da figura 31 apresentar apenas um índice de refração temos a temperatura de transição N-I da amostra, representada pela linha tracejada na Fig.31.

Também fizemos medidas no analisador de impedância com composto E7, calculamos a permissividade real e imaginária em função da frequência com temperatura de 50,6°C. O resultado está apresentado na Fig. 32(a) e (b).



Figura 32: (a) medida da permissividade elétrica real variando a frequência na temperatura de 50,6°C. (b) Medida da permissividade elétrica imaginária variando a frequência na temperatura de 50,6°C.

Fizemos medidas para a permissividade elétrica em função da frequência com temperatura de 62,5°C. Os resultados estão expressos graficamente nas Fig. 33(a) e (b).





Medimos a permissividade elétrica do composto E7 variando a temperatura, observase na Fig. 34 (a) e (b) que próximo da temperatura de 60°C a transição de fase do composto E7 é bem defina.



Figura 34: (a) Permissividade elétrica real em relação à temperatura. (b) Permissividade elétrica imaginária em relação à temperatura do composto E7.

A primeira medida feita com o cristal líquido 7OBAC foi com técnica de microscopia óptica de luz polarizada, no qual variamos a temperatura e podemos observar e fotografar as imagens da amostra em suas transições de fase. Representado da figura 35 de (a) a (i) podemos observar tais transições:





Figura 35: (a)Amostra na fase Sólido Cristalino, (b) Amostra transitando da fase sólido cristalino para fase Esmético C, (c) Amostra na fase Esmético C, (d) Amostra transitando da fase Esmético A para fase Nemático 1, (e) Amostra na fase Nemático 1, (f) Amostra transitando da fase Nemático 1 para fase Nemático 2, (g) Amostra na fase Nemático 2, (h) Amostra transitando da fase Isotrópico, (i) Amostra na fase Isotrópica

Através da técnica de análise digital de texturas podemos montar o gráfico do desvio padrão pela variação de temperatura, na qual representa as temperaturas de transição composto analisado. Representado na figura 36.





Depois aplicamos a técnica de espectroscopia dielétrica no composto 7OBAC. Com os resultados dessa técnica montamos gráfico da impedância imaginária pela impedância real (Fig.37).



Figura 37: (a) Gráfico da Impedância Imaginária pela Impedância Real para temperaturas na fase Nemático 1 e na fase Nemático 2, (b) Gráfico da Impedância Imaginária pela Impedância Real para temperatura na fase Nemático 1

Assim Fig. 37(a) mostra o gráfico da impedância real versus impedância imaginária (cole-cole) para uma temperatura de 123,0 °C que está na fase N_1 e uma temperatura de 128,0°C que está na fase N_2 . A Fig. 37 (b) mostra o gráfico de Cole-Cole para uma temperatura de 99,4°C que está na fase N_1 . Observamos que os gráficos (Fig.37) estão de acordo com o gráfico descrito pelo modelo de Cole-Cole. Confirmando assim que as medidas de impedância estão corretas para o composto 70BAC.

As figuras 38 e 39 foram feitas através da técnica de espectroscopia que fornece as freqüências em relação à impedância real e imaginária. Fizemos gráficos da impedância real e imaginária em função da freqüência para todas as temperaturas, porém para apresentar neste trabalho foram escolhidas apenas três temperaturas de interesse. Assim, montamos os gráficos (Figs. 38 e 39).



Figura 38: (a) Impedância Real pela Frequência, (b) Impedância Imaginária pela freqüência



Figura 39: (a) Gráfico da Impedância Real pela freqüência, (b) Impedância Imaginária pela freqüência

Assim, a figura 38(a) mostra duas temperaturas uma a 123,0 °C que esta antes da temperatura de transição N_1 - N_2 , ou seja, se encontra na fase N_1 e a outra de 128,0 °C que está acima da temperatura de transição N_1 - N_2 assim se encontra na fase N_2 . E na Fig. 38(b) a linha tracejada nos mostra o momento às temperaturas possuem a mesma impedância e freqüência. A Fig. 39 (a) e (b) o que ocorre com a impedância real e imaginária quando variamos a temperatura próxima da transição S_C - N_1 , porém o composta ainda se encontra na fase N_1 . Se sobrepuser os gráficos da Fig. 38 (a) e (b) e da Fig. 39 (a) e (b) vemos que ele se assemelha ao circuito de um resistor em paralelo com um capacitor representado pela Fig. 29 ou 24.

Por último, fizemos gráficos das medidas de impedância real e imaginária em razão da temperatura para todas as medidas de freqüência registradas pelo Solartron 1260, porém foram representadas por três freqüências distintas em cada gráfico.



Figura 40: (a) Gráfico da Impedância Real pela temperatura na transição de fase S_C -N₁, (b) Gráfico da Impedância Imaginária pela temperatura

Na Fig. 40, observa-se uma descontinuidade nas curvas das impedâncias que representa o momento em que o composto está transitando de uma fase para outra fase. Na Fig.40(a) da impedância real pela temperatura analisamos as transições $C_r - S_C e S_C - N_1$. Já na Fig. 40(b) da impedância imaginária pela temperatura ficou nítida a transição do $S_C - N_1$ para o composto 70BAC. Observando os dois gráficos da figura 40 e 41 vemos que as linhas tracejadas indicam as temperaturas de transição.



Figura 41: (a) Impedância Real pela temperatura, (b) Impedância Imaginária pela temperatura

Analisando a figura 41(a) podemos observar que o pequeno vale que ocorre na curva da impedância imaginária e o salto da curva da impedância real (figura 41(b)) mostrando assim nitidamente que ocorre uma transição na fase Nemática que é determinada de Nemático 1 para baixa temperatura e Nemático 2 para a temperatura elevada.

3 CONCLUSÃO

Observando nossos resultados podemos afirmar com convicção que nosso equipamento tem a precisão necessária para o estudo de transições de fases em cristais líquidos. Os valores para a permissividade elétrica (real e imaginária) em função da freqüência e da temperatura foram encontrados nesse trabalho, considerando o cristal liquido termotrópico E7. As temperaturas de transições de fases foram caracterizadas (permissividade elétrica) e condizem com resultados de medidas de índice de refração. As medidas feitas para o cristal líquido termotrópico 70BAC foram à de microscopia óptica de luz polarizada, de análise digital de imagens e a de espectroscopia dielétrica de impedância, sendo as duas primeiras técnicas nos garantiram a análise das texturas e das temperaturas de transição da

amostra do 7OBAC. Vale ressaltar que o composto analisado apresenta uma discussão em aberto sobre a sua fase nemática, pois o cristal líquido apresenta uma transição de fase dentro da mesofases nemática. Alguns estudos assumem que essa mesofase tenha duas subfases descritas como Nemático 1 (N₁) e Nemático 2 (N₂). Devido à estrutura molecular existente nessas transições o sistema reorganiza sua forma molecular de dímeros fechados para dímeros abertos e monômeros. Outros afirmam ser uma transição pelo fato do composto estudado possuir na transição N₁ e N₂ características de transição de fase, por esse motivo nosso trabalho pode concluir que o 7OBAC apresentou resultados satisfatórios, pois observamos que os gráficos da impedância em função da temperatura nos fornecem uma pequena descontinuidade, que estamos considerando ser, uma transição de fase N₁-N₂ a temperatura 124,0°C.

4 REFERÊNCIAS

Bose T. K., Campbel B., Yagihara S., Thoen and J., Phys. Rev. A, 36, 5767 (1994);

Chinaglia D. L, Gozzi G., Alfaro R. A. M. e Hessel R. "Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino" (2009)

Costa L. G., "INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA DENSIDADE DE UM SISTEMA LÍQUIDO-CRISTALINO COM FORMA MOLECULAR VARIÁVEL", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá (2001)

Friedel G., Ann. Physique, 18, 273 (1992).

Gennes P. G. de, "The Physics of Liquid Crystals", 2nd ed., Clarendon, Oxford,

Hulchow E., "MEDIDAS DE DENSIDADE E COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA NAS FASES ESMÉTICA C,NEMÁTICA ANÔMALA E ISOTRÓPICA.", Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Maringá (2005) Jesus M. M. A., "CARACTERIZAÇÃO ELETRO-ÓPTICA DE CRISTAIS LÍQUIDOS DISPERSOS EM MATRIZ POLIMÉRICA", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, (2005).

Khoo I. C., "Liquid Crystals", Inc., Hoboken, New Jersey (2007).

Lehmann O., Z. Physik Chem., 4, 462 (1889).

Priestley E.B., "Introduction to Liquid Crystals", Plenum Press, New York, (1979).

Reinitzer F., Monatsch. Chem., 9, 421 (1888).

SampaioA. R., "ESTUDOS DE PARÂMETROS ÓPTICOS EM FASES NEMÁTICAS LIOTRÓPICAS E REOLÓGICOS NAS FASES NEMÁTICA, COLESTÉRICA E 'BLUE PHASE' TERMOTRÓPICAS", Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual de Maringá, (2006).

Young H. D., Freedman R. A., "Física III - Eletromagnetismo", Pearson Addison Wesley, (2004).