

POLARIZAÇÃO DA LUZ

E

MOSTRADOR DE CRISTAL LÍQUIDO TN
(TNLCD)

José Henrique Vuolo

Instituto de Física

Universidade de São Paulo

Maio/2013

Polarização da luz e mostrador de cristal líquido TN (TNLCD)

José Henrique Vuolo

IFUSP - Novembro/2008

Esta apostila poderá ser disponibilizada em duas versões: uma versão simplificada e uma versão um pouco mais completa contendo alguns Apêndices. Espera-se que a versão simplificada (sem os Apêndices) permita ao leitor ter uma boa compreensão qualitativa de polarização da luz e principais aplicações. Os Apêndices contêm informações gerais ou detalhes matemáticos ou tópicos mais especializados, não muito importantes para visão qualitativa geral do assunto.

Tópicos

- Breve resumo histórico .
- Conceito de polarização. Luz linearmente polarizada e luz não-polarizada.
- Dicroísmo linear e polarizador sintético. Cristais dicroicos, polarizadores sintéticos, aplicações de polarizadores e Cinema 3D.
- Polarização da luz na reflexão. Ângulo de Brewster e obtenção de luz polarizada por reflexão. Aplicações: óculos de pescador e filtro fotográfico.
- Polarização da luz no espalhamento.
- Polarização da luz por birrefringência.
- Cristal líquido nemático torcido (Twisted Nematic Liquid Cristal - TNLC).
- Funcionamento do mostrador de cristal líquido TN (TNLCD).
- Fotoelasticidade.
- Apêndice A. Ondas eletromagnéticas. Luz. Propriedades fundamentais.
- Apêndice B. Descrição do estado de polarização: Polarização linear, circular e elíptica. Luz não polarizada. Esfera de Poincaré.
- Apêndice C. Fórmulas de Fresnel para os coeficientes de reflexão. Radiação dipolar e interpretação física de ângulo de Brewster e polarização da luz no espalhamento.
- Apêndice D. Prismas polarizadores.
- Apêndice E. Chaves eletro-ópticas, magneto-ópticas e modulação ótica.
- Apêndice F. Lâminas birrefringentes. Lâmina de meia-onda e lâmina quarto-de-onda. Fotoelasticidade.

1 Breve resumo histórico

Um breve resumo histórico é apresentado nesta seção, apenas com os principais fatos.

~ 1670, o dinamarquês Erasmi Bartholini em “Experimenta Crystalli Island” apresenta uma primeira explicação para a dupla refração num cristal de calcita, também chamado cristal da Islândia. A Figura 1 mostra um trecho do livro onde Bartholini interpreta razoavelmente bem a formação de dupla imagem.

~ 1678, o holandês Christian Huygens (em “Treatise on Light (1690)”) explica a dupla refração em termos de ondas esféricas (refração ordinária) e ondas esferoidais (refração extraordinária).

~ 1704, Isaac Newton (“Opticks”), que descreve a luz como constituída de “partículas” (teoria corpuscular da luz), propõe “2 pares de lados” para a “partícula”. Apesar de equivocada, a explicação deu origem ao termo “polarização”, devido à analogia com polos de um imã.

~ 1807, o francês E. Louis Malus mostra conclusivamente em um artigo que a polarização é uma propriedade intrínseca da luz e formula a lei “ $\cos^2 \theta$ ” que leva seu nome.

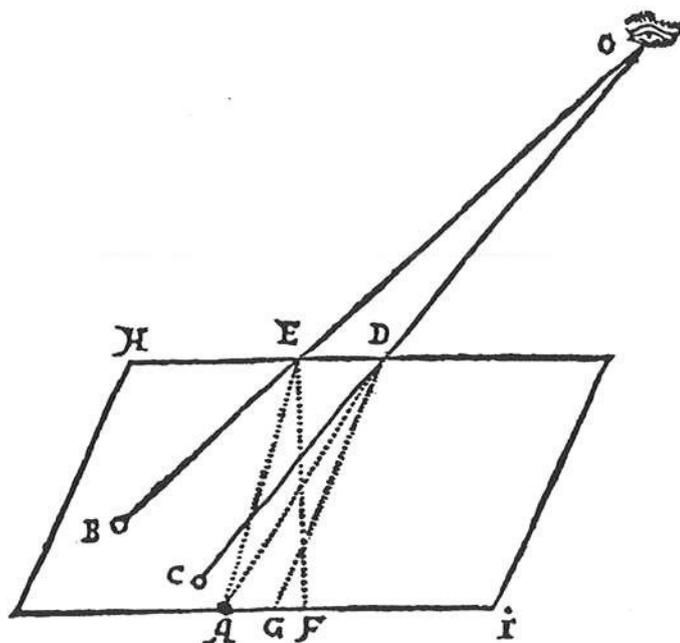
~ 1820, o francês Augustin Fresnel (francês), “Ouevres Complètes...(1866)”. Desenvolveu uma teoria ondulatória completa e geral. Endossa sugestão de Young, propondo a luz como “onda transversal” e deduz as hoje chamadas “fórmulas de Fresnel” para os coeficientes de reflexão em cada polarização¹.

~ 1873, o escocês J. C. Maxwell (“Treatise on Electricity and Magnetism”) formula a moderna teoria do eletromagnetismo e estabelece definitivamente o conceito de luz como “onda eletromagnética transversal”. O conceito de polarização resulta imediatamente da direção de oscilação do campo elétrico transversal da onda eletromagnética.

Vários desenvolvimentos importantes são omitidos aqui. Serão apenas mencionados alguns: Young (interferência e difração), Arago (atividade ótica, interferência e difração), Brewster (polarização na reflexão), Stokes (parâmetros de Stokes), Poincaré (representação da polarização numa esfera), Land (polarizadores sintéticos), Jones (matrizes de Jones). As Referências 1 e 2 fornecem uma visão histórica mais completa.

¹A história de Fresnel é bastante triste. Apesar de ser um dos maiores nomes na história da ótica, foi ridicularizado e humilhado pelos seguidores de Newton, adeptos da chamada “teoria corpuscular da luz”. Fresnel morreu aos 39 anos de idade e praticamente não conseguiu publicar seus trabalhos em vida, devido a perseguição de cientistas tais como Laplace, Poisson e outros.

ginibus, altera elevationior. Id quod adjecta figura demonstrat, in qua HI sectio delineata est Prismatis, per oculum O, objectum A & imagines E & D, quas ostendit in superficie, objectum A.



Jam, si productos ab oculo O imagineris singulorū imaginum radios, OD nempe in C, & OE in B, ubi oculus judicat intra Prisma occurrere imagines; facile constat B locum ex quo provenire ju-

Figura 1: Texto de 1670 de Erasmi Bartholini.

2 Polarização.

A polarização da luz foi descoberta 200 anos antes que a natureza da luz fosse esclarecida. Esta descoberta se deve à formação de dupla imagem num cristal de calcita², como mostrado na Figura 1. A formação de imagem dupla foi interpretada como devido ao fato que a luz que segue o trajeto AEO possuir alguma *propriedade diferente* da luz que segue a trajetória ADO para chegar ao olho do observador. Esta propriedade foi, já na época chamada de **polarização**.

Usando um filtro polarizador moderno³, pode-se verificar facilmente que as imagens formadas pela calcita são polarizadas em direções perpendiculares.

²Antigamente chamado de cristal da Islândia.

³O filtro polarizador sintético é descrito na Seção 3.1.

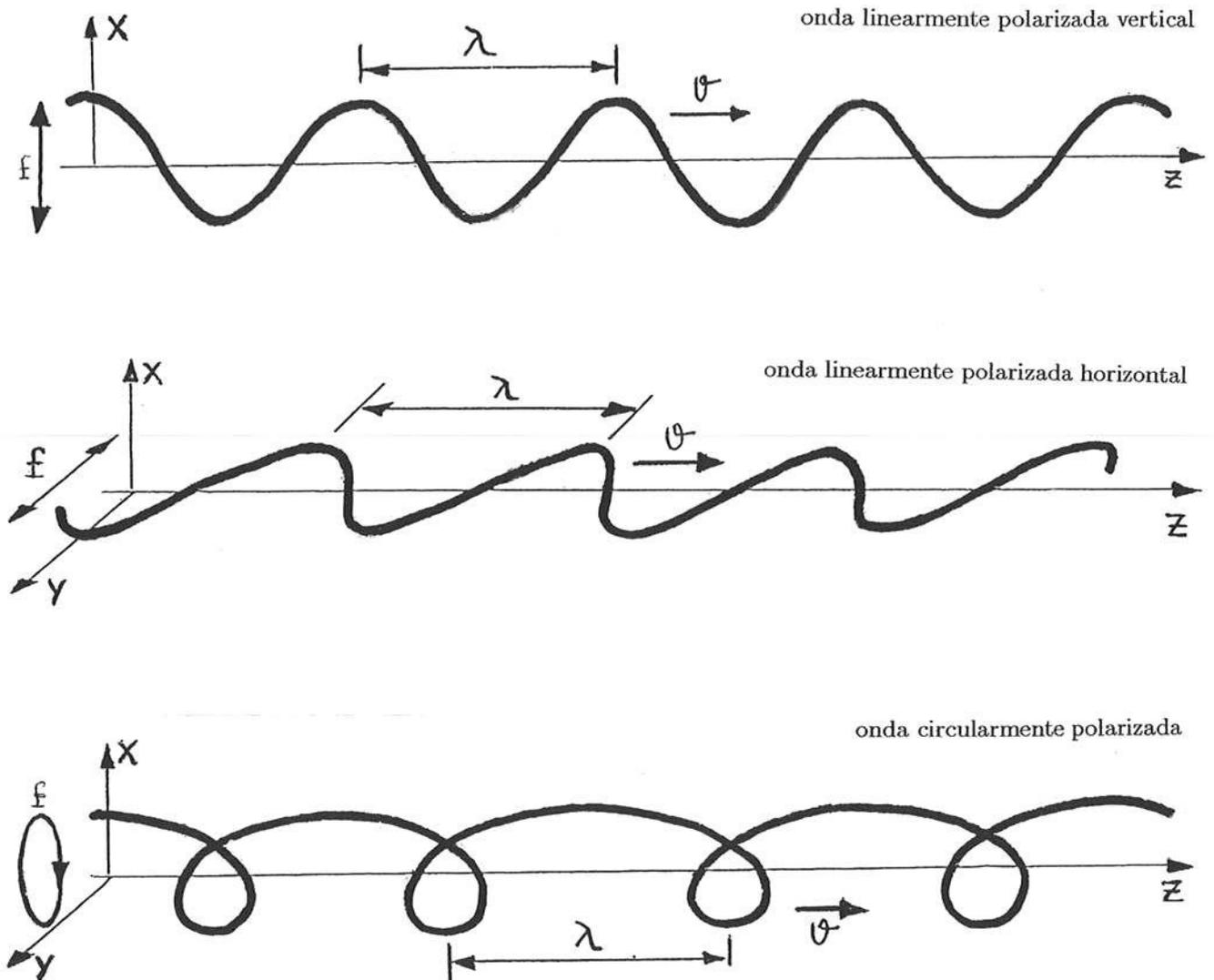
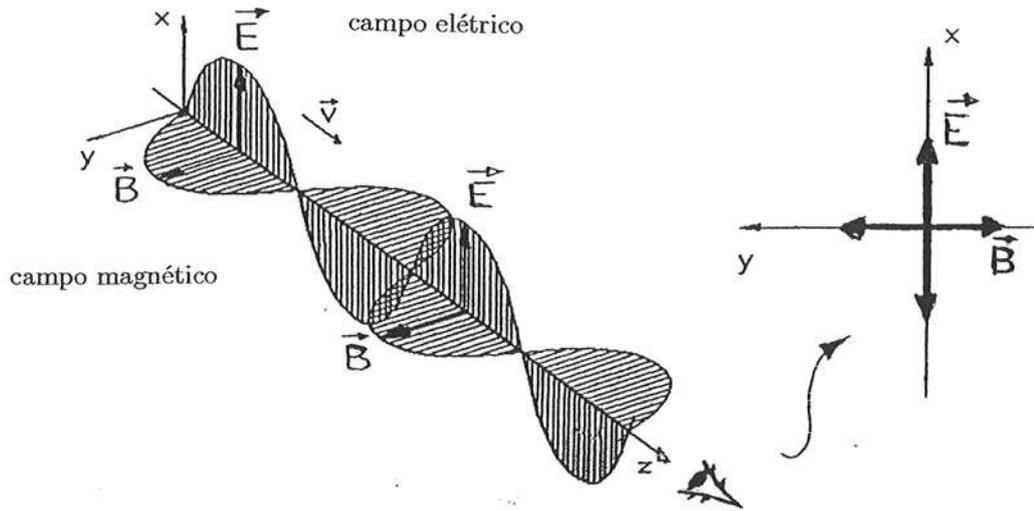


Figura 2: Exemplos de ondas produzidas num fio muito longo.

2.1 Conceito de polarização

Numa onda transversal, a perturbação oscila num plano perpendicular à direção de propagação. A variação da perturbação neste plano transversal define a polarização da onda. Um exemplo simples é uma onda se propagando num fio muito longo (Figura 2). Se a extremidade do fio é forçada a oscilar na direção vertical gera-se uma onda transversal linearmente polarizada vertical. Forçando a extremidade a oscilar horizontalmente a onda gerada será linearmente polarizada horizontal. Mas outras polarizações podem ocorrer. Por exemplo, se a extremidade é colocada em movimento circular uniforme, gera-se uma onda circularmente polarizada. No Apêndice B tem-se uma descrição mais completa dos diversos estados de polarização possíveis.

Para a maioria das ondas transversais, pode-se ter diferentes polarizações.



CAMPO ELÉTRICO \Rightarrow define a polarização da onda
CAMPO MAGNÉTICO \Rightarrow geralmente é omitido na representação

Figura 3: Onda eletromagnética linearmente polarizada verticalmente.

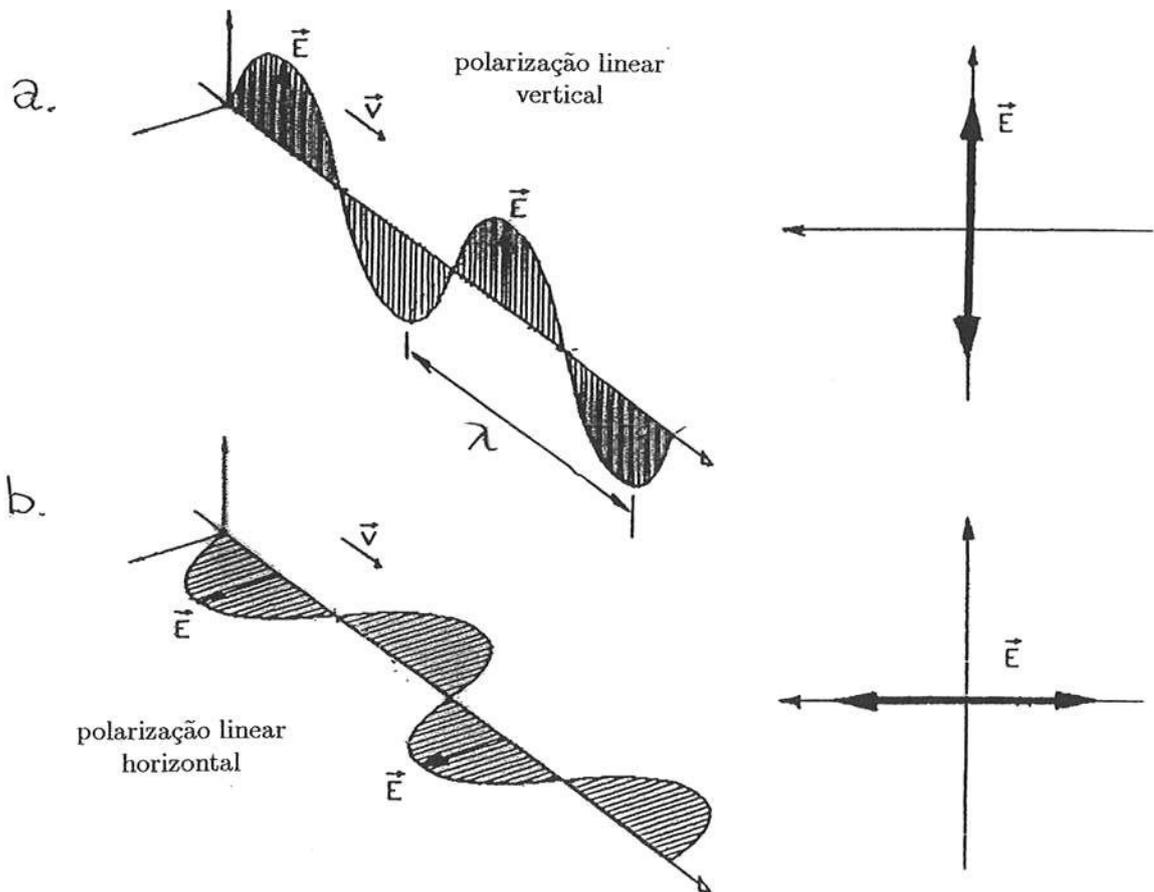


Figura 4: Representação de polarizações lineares vertical e horizontal.

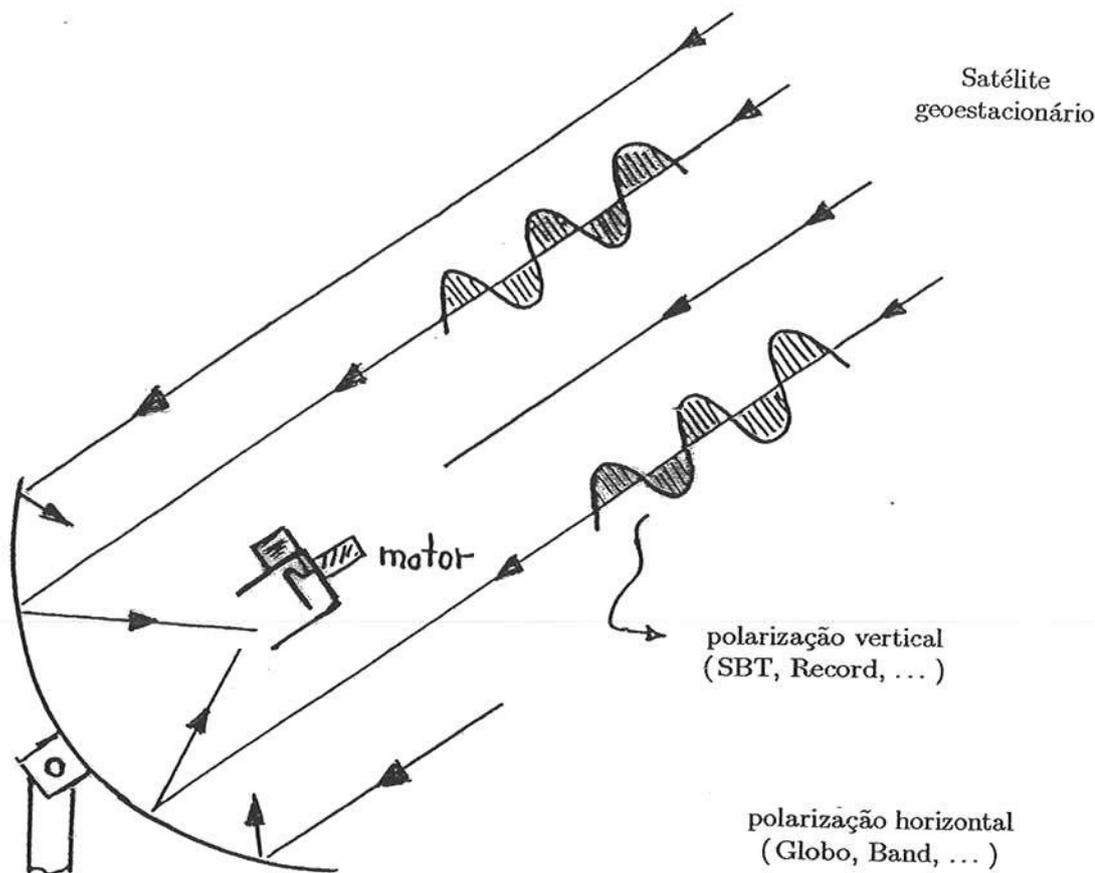


Figura 5: *Recepção de microondas numa antena parabólica comum*

2.2 Polarização da onda eletromagnética

Uma onda eletromagnética pode ser entendida como uma configuração de campos elétrico e magnético se propagando no espaço. No vácuo ou num meio material isotrópico⁴ a onda eletromagnética é transversal e a polarização da onda eletromagnética é sempre definida pela direção do campo elétrico da onda. O campo magnético é perpendicular e tem mesma fase que o campo elétrico.

A figura 3 mostra como exemplo uma onda eletromagnética **linearmente polarizada vertical**. Em geral, o campo magnético é omitido e a polarização linear vertical é representada como na Figura 4.a. A Figura 4.b representa polarização linear horizontal.

A Figura 5 representa uma antena parabólica comum recebendo microondas de um satélite geoestacionário⁵. Numa mesma frequência, podem ser feitas duas transmissões independentes, uma na polarização vertical e outra na polarização horizontal. Assim, a capacidade de transmissão do sistema é duplicada, numa mesma banda de frequências.. No sistema mais simples de recepção, uma pequena antena, acionada por um motor elétrico, gira 90° para se mudar de uma polarização para outra.

⁴Meio material isotrópico é o que tem as mesmas propriedades físicas em todas as direções, o que nem sempre ocorre. Por exemplo, um cristal pode ter propriedades diferentes em direções diferentes e a onda eletromagnética pode ter componente longitudinal.

⁵Satélite geoestacionário tem órbita no plano equatorial da terra e período de exatamente 24 horas. Assim, o satélite fica parado em relação à terra.

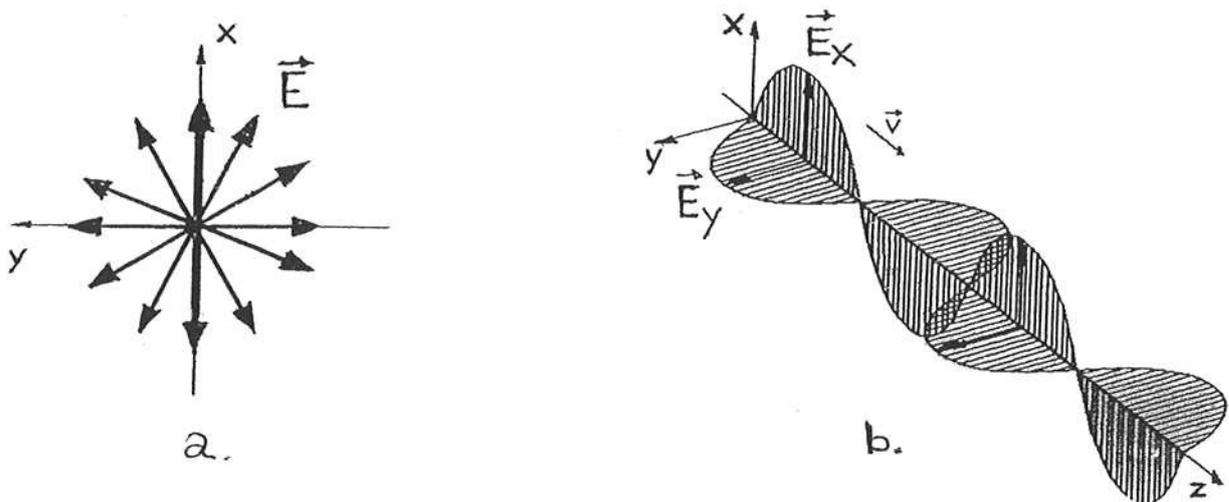


Figura 6: Representações da luz não-polarizada.

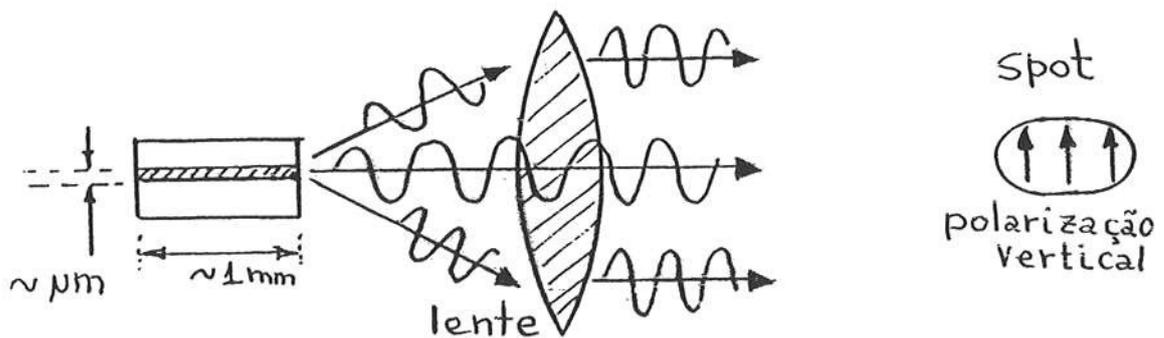


Figura 7: A luz de um laser diodo vermelho comum é polarizada.

3 Luz não-polarizada

A luz é **não-polarizada** quando a direção do campo elétrico muda aleatoriamente e rapidamente com o tempo. A luz não-polarizada pode ser considerada polarizada em escala de tempo da ordem de 10^{-8} s, mas a polarização se modifica aleatoriamente. A Figura 6.a representa luz não-polarizada, mas deve-se entender por “campo elétrico oscilando em todas as direções” como variação aleatória da direção com o tempo. Na Figura 6.b, a luz não-polarizada pode ser entendida como superposição de duas ondas linearmente polarizadas horizontal e vertical de mesma amplitude, mas com diferença de fase aleatória⁶.

A luz original de fontes luminosas comuns é não-polarizada. Mas deve ser observado que a luz pode-se tornar polarizada muito facilmente na reflexão e no espalhamento. A luz de laser é polarizada, em geral⁷. Um laser diodo vermelho comum é polarizado (Fig. 7).

⁶Como discutido no Apêndice B a superposição de 2 ondas linearmente polarizadas ortogonais pode ser uma polarização linear ou circular ou elíptica quando existe diferença de fase definida entre essas ondas.

⁷Em alguns casos a polarização varia lentamente com o tempo tal como no laser de He-Ne comum (sem janelas de Brewster). O laser verde comum (de bombeamento ótico) é pouco polarizado.

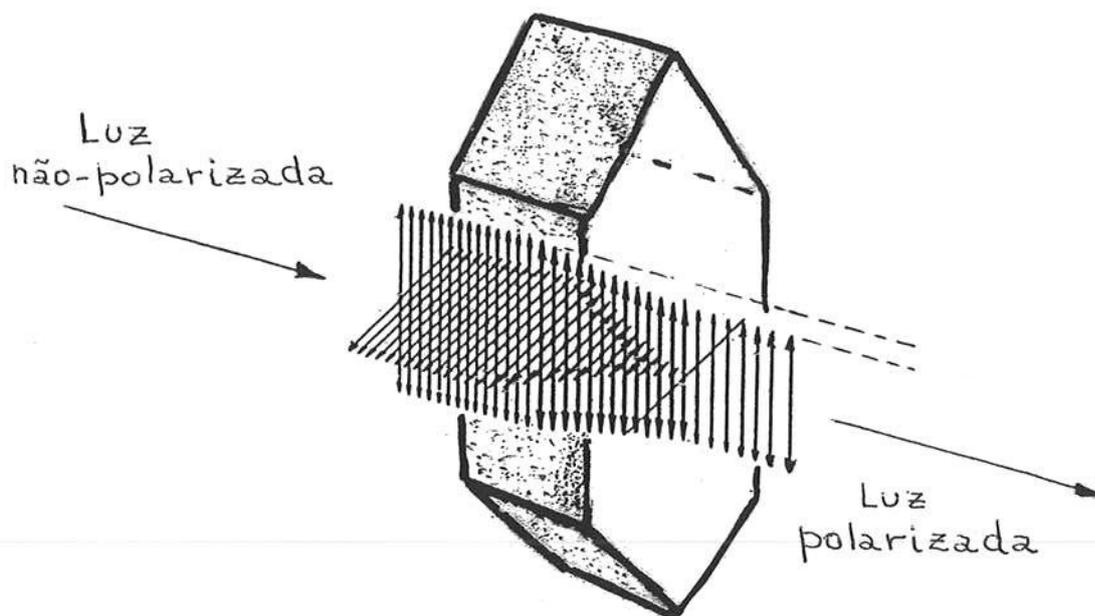


Figura 8: *Dicroísmo linear num cristal de turmalina.*

Formas de polarizar a luz não-polarizada

A luz não-polarizada pode ser polarizada por vários métodos:

- por **dicroísmo** : absorção seletiva de uma polarização.
- por **reflexão** : em dielétricos a luz refletida é parcial ou totalmente polarizada.
- por **espalhamento** : a luz espalhada é parcial ou totalmente polarizada.
- por **birrefringência** : as polarizações são separadas em cristais birrefringentes.

3.1 Dicroísmo linear e polarizador sintético

O dicroísmo linear⁸ é a absorção seletiva da onda linearmente polarizada numa determinada direção. Por exemplo, um cristal de turmalina absorve uma das polarizações como mostrado na Figura 8.

A maneira mais simples de polarizar a luz polarizada é usando o filtro **polarizador sintético**⁹ inventado por Edwin H. Land em 1938.

O princípio de funcionamento do polarizador sintético é esquematizado nas Figuras 9 e 10. Para microondas, com comprimento de onda da ordem de milímetro, uma grade de fios funciona como filtro polarizador. Como mostrado na Figura 9, se o campo elétrico oscila na direção dos fios, a onda é absorvida e/ou refletida pelos fios. A onda polarizada perpendicularmente aos fios passa pela grade.

⁸Existe também o dicroísmo circular que consiste na absorção seletiva de uma das polarizações circulares.

⁹Comercialmente chamado de "polaróide".

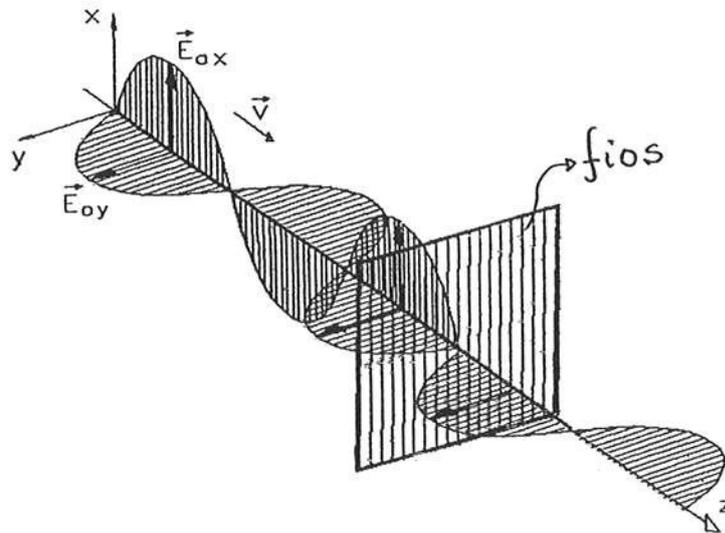


Figura 9: Polarizador de grade de fios para microondas ($\lambda \sim 1 \text{ mm}$).

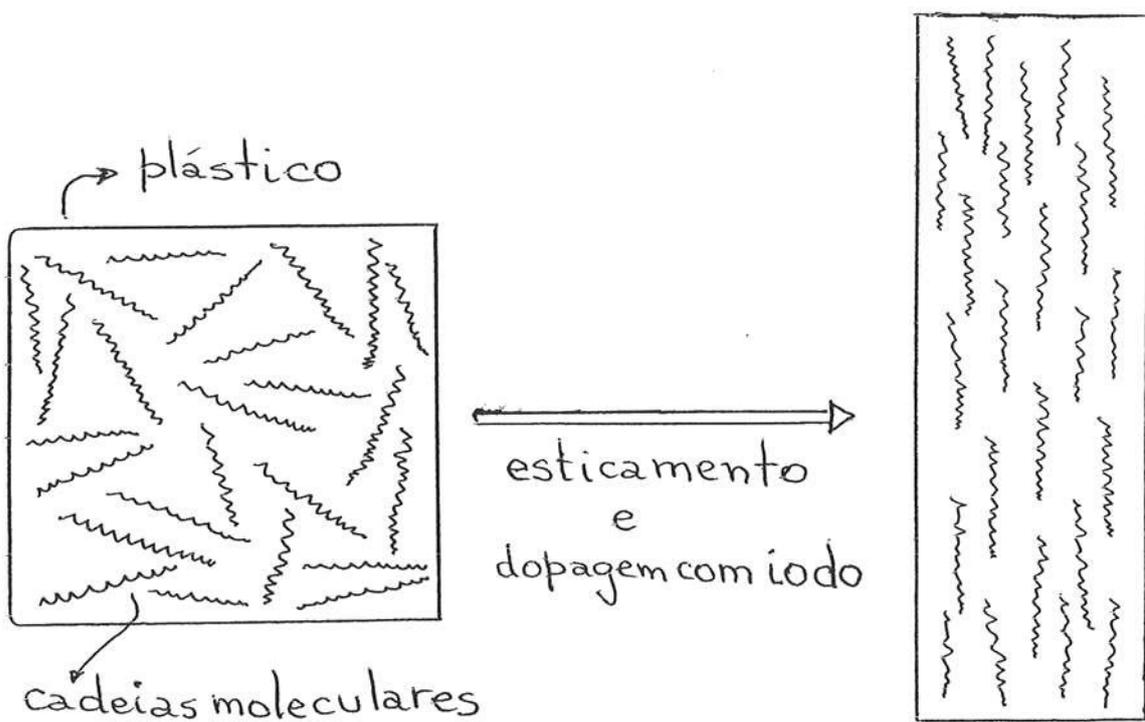


Figura 10: Princípio de fabricação do polarizador sintético.

O funcionamento do polarizador sintético para luz segue o mesmo princípio (Figura 10). O esticamento do plástico alinha as cadeias moleculares numa dada direção. Quando dopadas com iodo essas moléculas se tornam condutoras para frequências óticas ($\nu \sim 10^{14} \text{ Hz}$) e absorvem a luz polarizada na direção das cadeias moleculares.

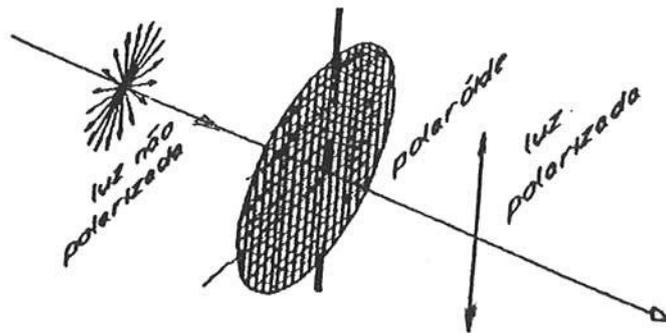


Figura 11: Efeito de um filtro polarizador.

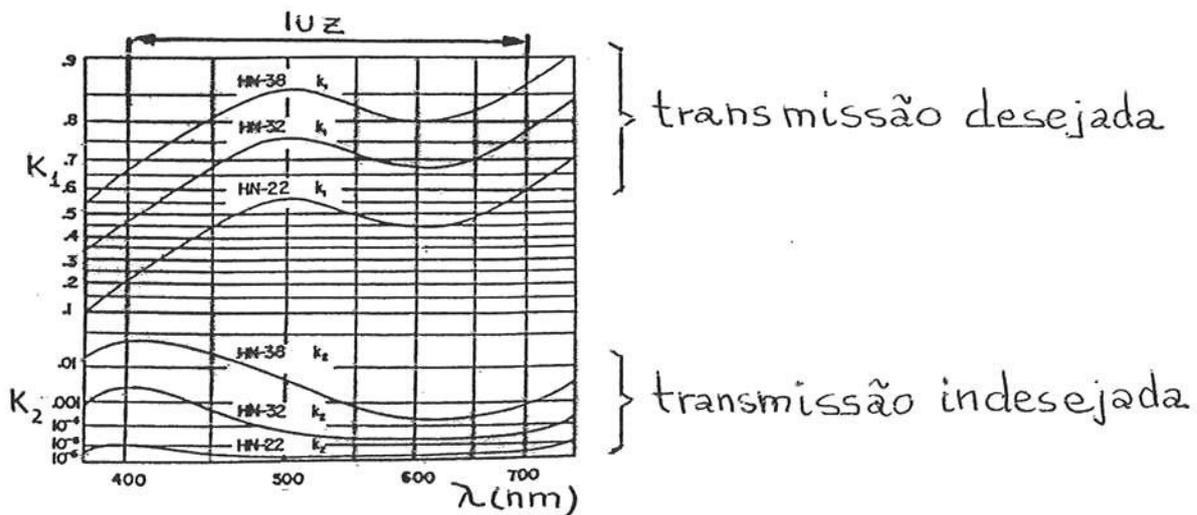


Figura 12: Exemplos de transmitâncias de polarizadores.

Um polarizador ideal transmite 50% da intensidade da luz não-polarizada incidente, uma vez que para luz completamente não-polarizada, tem-se 50% da energia da onda em cada polarização.

Um polarizador real é caracterizado por transmitâncias principais k_1 e k_2 :

k_1 é a fração transmitida da intensidade na polarização desejada ($0 \leq k_1 \leq 1$)

k_2 é a fração transmitida da intensidade na polarização não-desejada ($0 \leq k_2 \leq 1$)

k_1 deve ser maior possível e k_2 menor possível, por isso a razão k_1/k_2 pode ser considerada um indicador de qualidade do polarizador:

$$\frac{k_1}{k_2} \Rightarrow \text{indicador de qualidade.}$$

Deve ser observado que a transmitância total em relação à intensidade total incidente é

$$0,5 k_1 + 0,5 k_2 \cong 0,5 k_1.$$

A Figura 13 mostra exemplos de efeitos do polarizador.

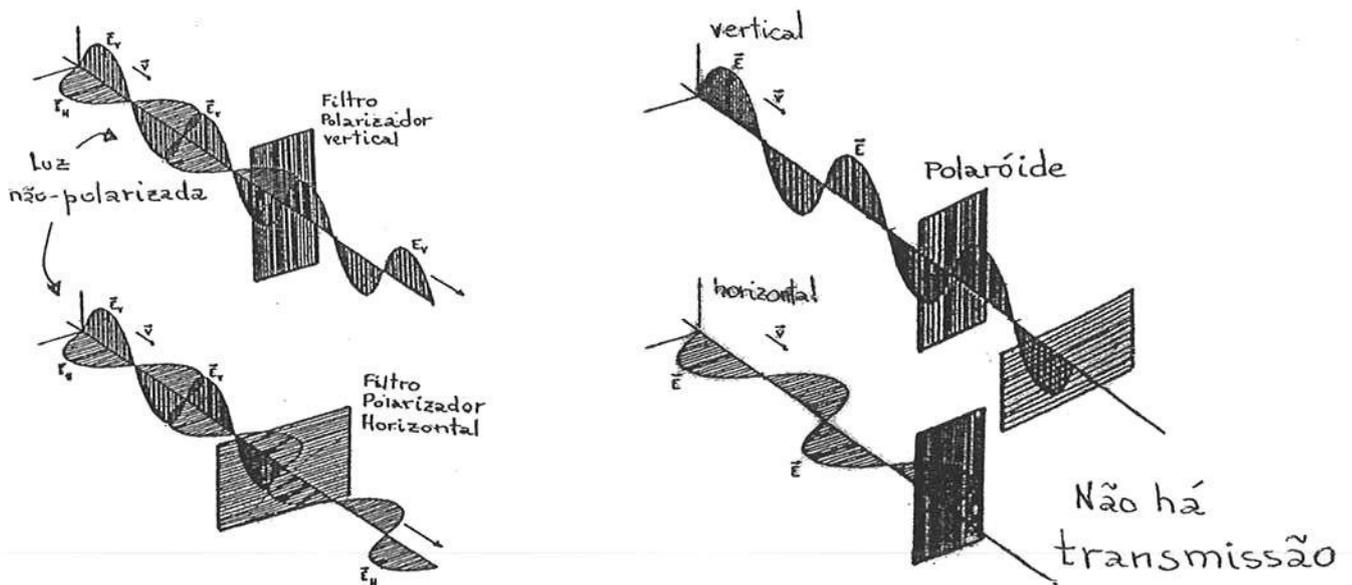


Figura 13: *Efeitos de um filtro polarizador.*

3.1.1 Aplicações polarizador sintético

O polarizador sintético tem várias aplicações importantes resumidas a seguir e explicadas em maiores detalhes ao longo do texto ou nos Apêndices.

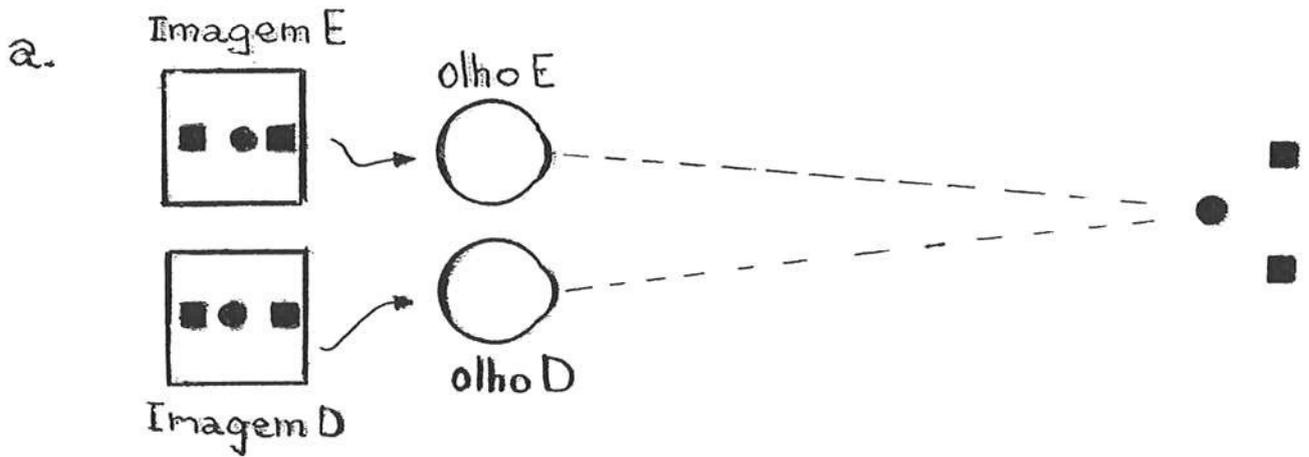
- **Mostrador de cristal líquido:** são essenciais nos mostradores TN, STN e outros.
- **Cinema 3D:** sistema de projeção e óculos polarizadores adequados
- **Óculos de pescador:** Reduz a luz refletida na água e luz espalhada pelo céu.
- **Filtros fotográficos:** reduzem reflexos e escurecem o céu.
- **Filtros para microscópio:** permitem acentuar contrastes.
- **Filtro antireflexivo:** polarizador circular permite eliminar reflexos em mostradores.
- **Chaves óticas e modulação ótica:** baseadas em efeitos Kerr, Pockels e outros.

Imagem 3D

A imagem tridimensional (3D) é sensação psicológica de imagem produzida no cérebro a partir de 2 imagens óticas formadas nas retinas dos olhos direito e esquerdo como mostrado na Figura 14. Deve ser observado que essas imagens são diferentes (paralaxes diferentes).

A imagem 3D pode ser observada num estereoscópio a partir de um par de fotografias estereoscópicas, de forma que cada olho observe uma foto. Essas fotos são obtidas de ângulos um pouco diferentes, de forma a se ter uma paralaxe adequada.

No cinema 3D, com 2 câmaras, são produzidos 2 filmes com paralaxe adequada. Na projeção, os filmes são projetados em polarizações ortogonais a 45° com a vertical. O espectador deve usar óculos com filtros polarizadores orientados igualmente, de forma que cada olho veja somente uma imagem.



Reprodução de imagem 3D com estereoscópio :

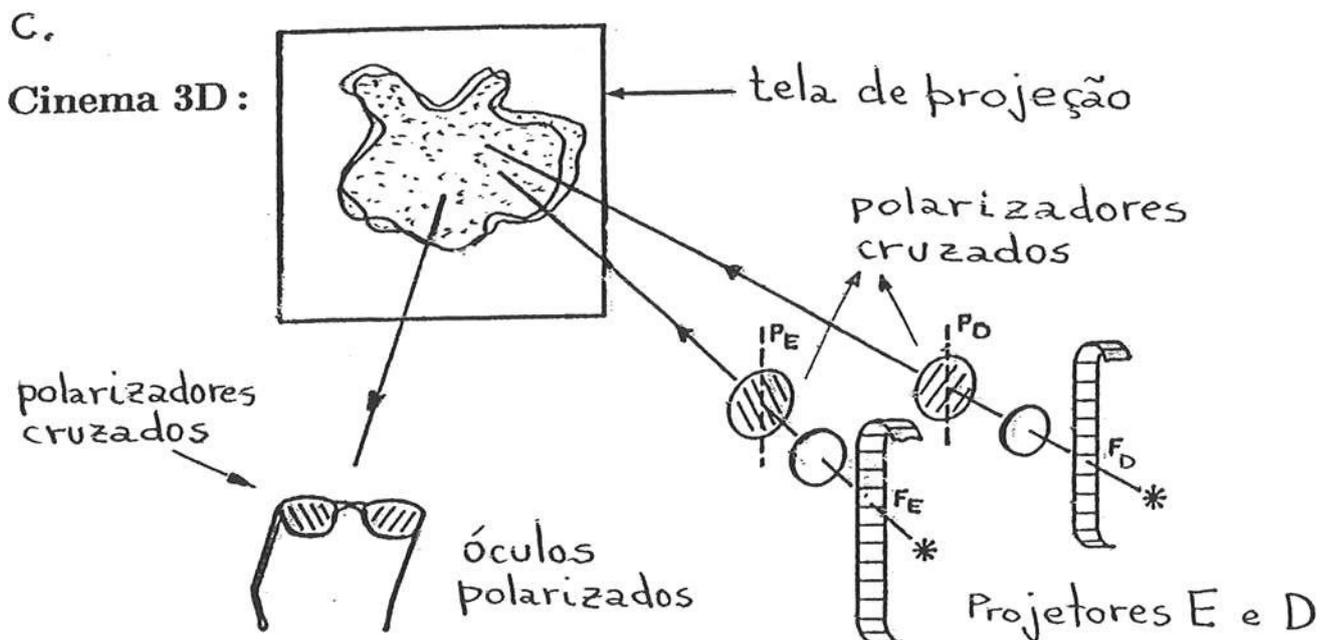
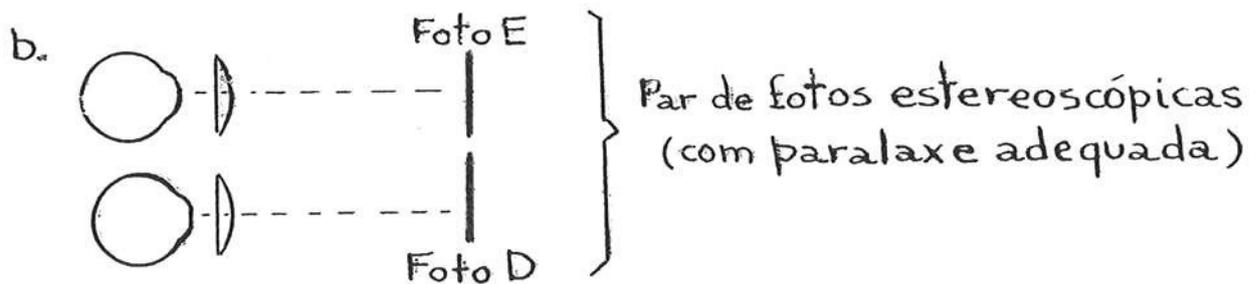


Figura 14: Formação de imagem 3D.

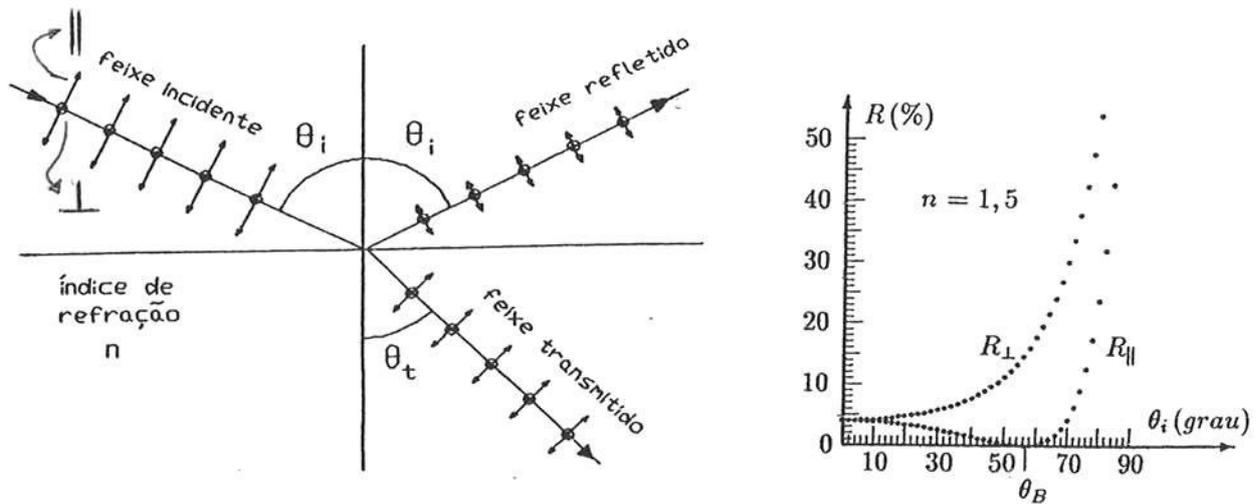


Figura 15: Coeficientes de reflexão R_{\parallel} e R_{\perp} em função do ângulo de incidência θ_i .

3.2 Polarização da luz na reflexão

O coeficiente de reflexão \mathcal{R} pode ser definido como a razão da intensidade refletida pela intensidade incidente.

Para reflexão da luz num material dielétrico, os coeficientes de reflexão para polarização perpendicular ao plano de incidência (R_{\perp}) e para polarização paralela (R_{\parallel}) são diferentes. Esses coeficientes são dados pelas chamadas fórmulas de Fresnel (Apêndice C).

Como mostra a Figura 15, o coeficiente R_{\parallel} se anula para ângulo de incidência $\theta_i \equiv \theta_B$ chamado *ângulo de Brewster*. Se n é o índice de refração relativo, ângulo de Brewster é dado por $\text{tg } \theta_B = n$. Por exemplo, para água $n = 1,33$ e $\theta_B = 53^\circ$.

Em resumo, para incidência em ângulo de Brewster, a luz refletida é completamente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência, mostra a Figura 16. Em particular, se a polarização da luz incidente é paralela ao plano de incidência, desaparece o feixe refletido.

Se a luz incidente é não-polarizada, a luz refletida é parcialmente polarizada (ou totalmente polarizada para incidência em ângulo de Brewster), exceto para incidência normal. Óculos polarizados que transmitem só a polarização vertical permitem eliminar boa parte da luz refletida. O feixe transmitido também é parcialmente polarizado, em geral.

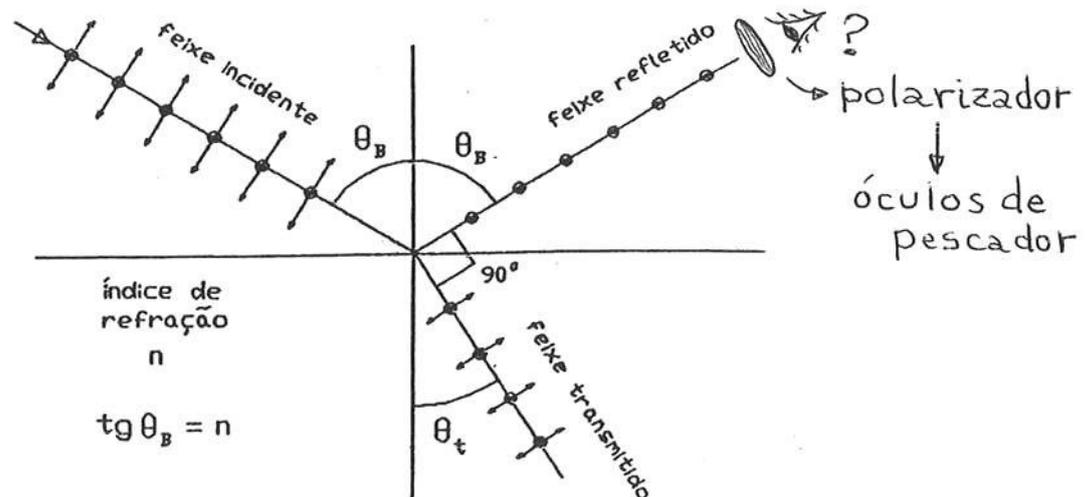


Figura 16: Reflexão em ângulo de Brewster.

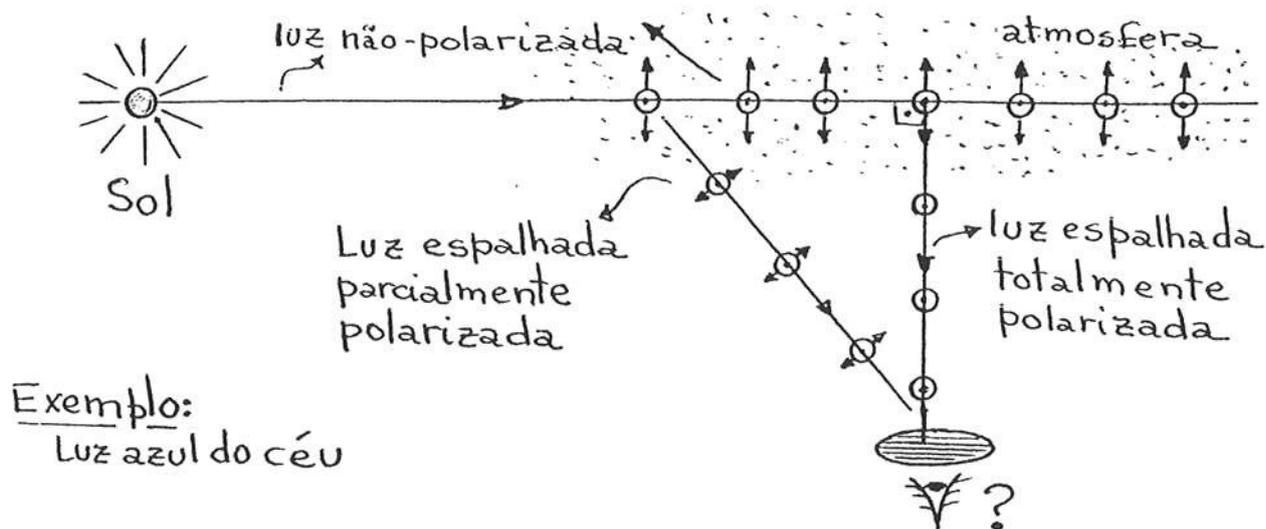


Figura 17: Polarização da luz do céu.

3.3 Polarização da luz no espalhamento

Os átomos e moléculas num meio material espalham uma pequena quantidade de luz de um raio luminoso que se propagam no meio. Um exemplo familiar é a luz que se propaga na atmosfera terrestre. Considerando um raio luminoso da luz solar numa dada direção, uma pequena fração da luz é espalhada em outras direções. Este fenômeno é chamado espalhamento de Rayleigh e ocorre mais intensamente para comprimentos de onda mais curtos. Isto é, luz azul, cian ou verde sofrem espalhamento bem maior luz vermelha ou amarela. Por isso, o céu é cian.

A luz espalhada em ângulo de 90° com o feixe original é completamente polarizada na direção perpendicular ao plano definido pelo feixe original e pelo observador, como mostrado na Figura 17.

No Apêndice C é apresentada uma discussão um pouco mais detalhada do espalhamento em termos de dipolos oscilantes.

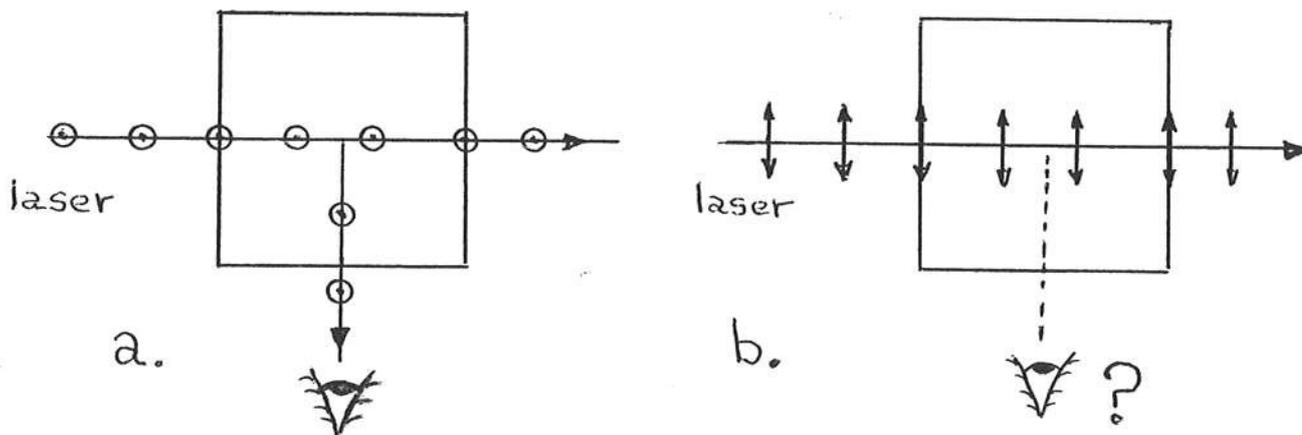


Figura 18: Espalhamento de um feixe de laser num bloco de resina. A luz espalhada desaparece se a polarização é paralela ao plano de observação (caso b).

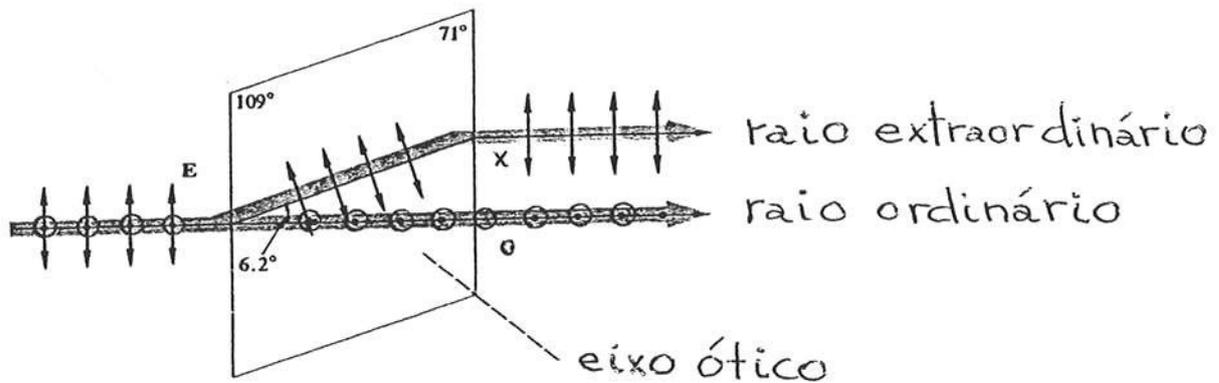


Figura 19: Separação do feixe incidente em 2 feixes polarizados num cristal de calcita.

3.4 Polarização da luz por meio de cristais birrefringentes

Certos cristais apresentam *dupla refração*, também chamada de *birrefringência*. Tais materiais são anisotrópicos e apresentam índices de refração diferentes para a polarização da luz perpendicular ao eixo ótico (n_o) e para a outra polarização (n_x). A refração para a luz polarizada perpendicularmente ao eixo ótico é chamada *refração ordinária*, enquanto que a refração para a luz polarizada num plano que contém o eixo ótico é chamada *refração extraordinária*. As direções dos raios refratados podem ser diferentes, devido às diferenças nos índices de refração (n_o e n_x) e conseqüentemente, diferentes velocidades de fase. Assim, um feixe luminoso pode ser separado em dois feixes perpendicularmente polarizados. Desta maneira pode-se obter feixes linearmente polarizados a partir de luz não-polarizada.

A Figura 19 representa a obtenção de feixes polarizados num cristal de calcita, por meio de birrefringência. A separação dos feixes é pequena. Por isso, um cristal de calcita só permite separar diretamente as polarizações para um feixe bastante estreito, tal como um feixe de laser. Em geral, são utilizados prismas engenhosos tais como os mostrados no Apêndice D.

Birrefringência em lâmina birrefringente é discutida em mais detalhes no Apêndice F.

4 Mostrador de cristal líquido nemático torcido

(Twisted Nematic Liquid Crystal Display - TNLCD)

4.1 Cristal líquido nemático

Cristais líquidos foram descobertos há cerca de 100 anos por Reinitzer e Lehman. Entretanto, aplicações significativas só foram descobertas nos últimos 40 anos, sendo a aplicação prática mais importante o seu uso no mostrador de cristal líquido TN, STN e outros, que atualmente são extensivamente usados.

Um cristal é uma estrutura bem ordenada de átomos ou moléculas chamada rede cristalina. Aumentando a temperatura, ao se chegar na temperatura de fusão (T_F) a estrutura cristalina desmorona e a substância passa para a “fase líquida” em que se tem desordem quase total das partículas que ficam com velocidades aleatórias e se orientam aleatoriamente. A desordem só não é total porque existe alguma energia de ligação entre partículas no líquido¹⁰.

¹⁰Desordem total se tem num gás, onde além de velocidades e orientações aleatórias, a ligação entre as partículas é desprezível e o gás se expande indefinidamente quando não confinado.

Cristais comuns: transição direta de cristal para líquido

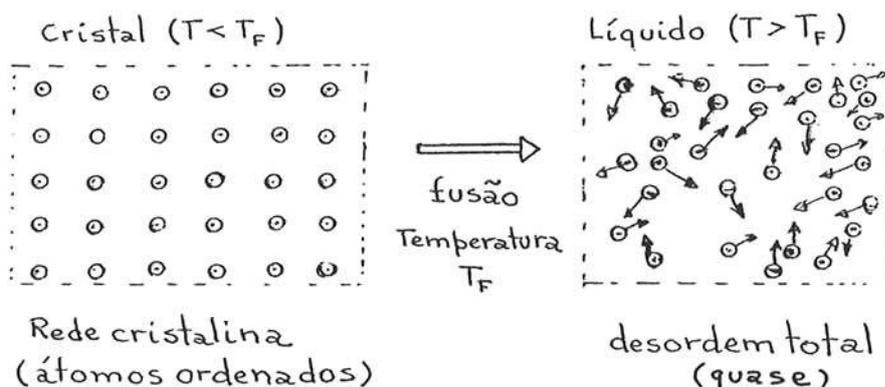


Figura 20: Transição entre fase cristalina e fase líquida na temperatura de fusão.

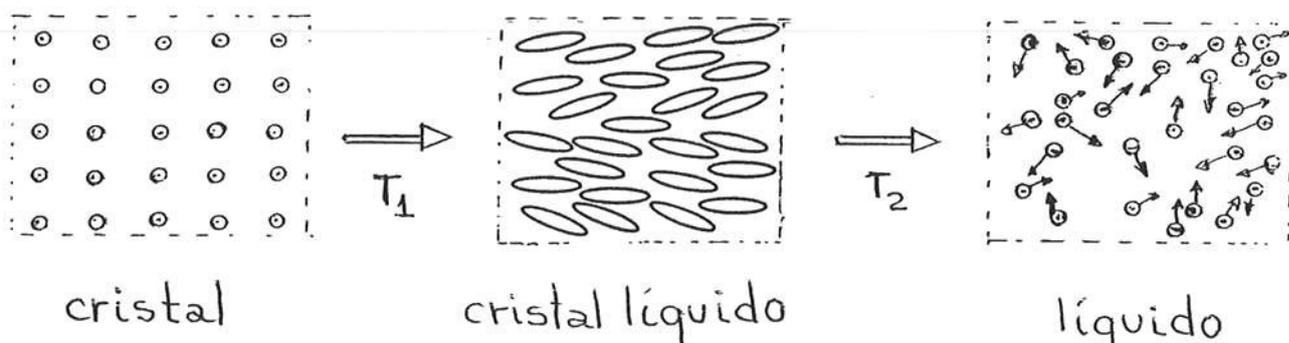


Figura 21: Transições entre fase cristalina, fase cristal líquido e fase líquida.

Nem sempre a transição da fase sólida para a fase líquida ocorre diretamente, como na Figura 20. Para certas substâncias pode ocorrer uma “fase intermediária” chamada “cristal líquido”. Como mostrado na Figura 21, na temperatura de fusão passa-se da fase cristalina para a fase cristal líquido e depois para a fase líquida propriamente. Na fase cristal líquido uma certa ordem é mantida entre as moléculas da substâncias.

O cristal líquido mais simples é o chamado cristal líquido nemático, com moléculas simples e alongadas em forma de charuto. Na fase cristal líquido as moléculas tendem a ficar alinhadas entre si como mostrado na Figura 21. O versor da direção de alinhamento das moléculas é chamado *diretor*.

É bastante fácil induzir alinhamento das moléculas do nemático. Por exemplo, basta esfregar uma lâmina de vidro numa direção para que as moléculas do nemático colocado nela fiquem alinhadas na direção do esfregamento. Por exemplo, pode-se criar uma estrutura torcida 90° como mostrado na Figura 22, colocando o nemático entre duas lâminas de vidro previamente esfregadas em direções perpendiculares. As camadas de nemático que ficam junto ao vidro ficam com diretores perpendiculares. Nas camadas intermediárias, o diretor vai girando e formando a estrutura torcida. A Figura 22 mostra a “rotação” do diretor para um cristal líquido torcido 90° .

Um fenômeno físico essencial no funcionamento de um TNLCD é que se se a luz polarizada entra num cristal líquido nemático torcido alinhada com as moléculas (*diretor*), a polarização acompanha a direção das moléculas. Isto é, se luz polarizada entra no nemático torcido 90° alinhada com as moléculas, a luz sai com polarização girada 90° .

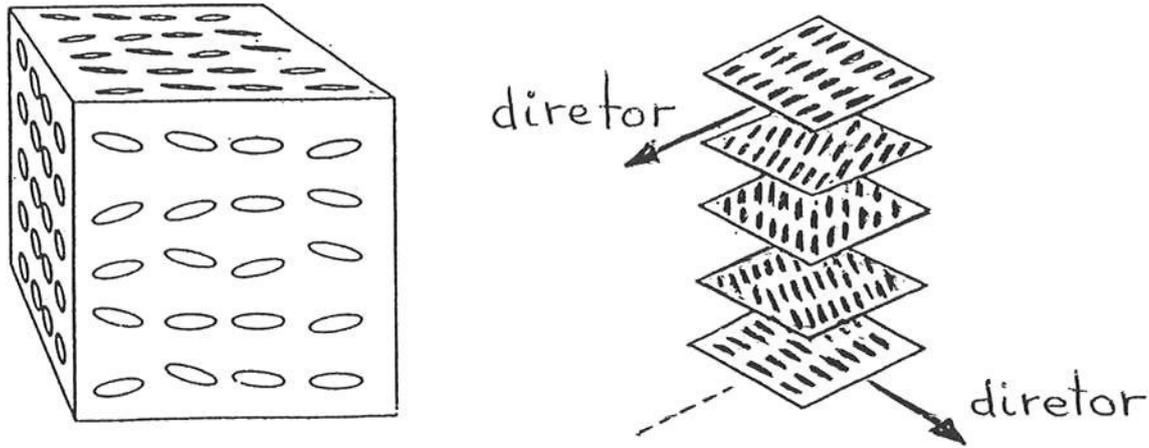


Figura 22: Cristal líquido nemático torcido 90° (TN).

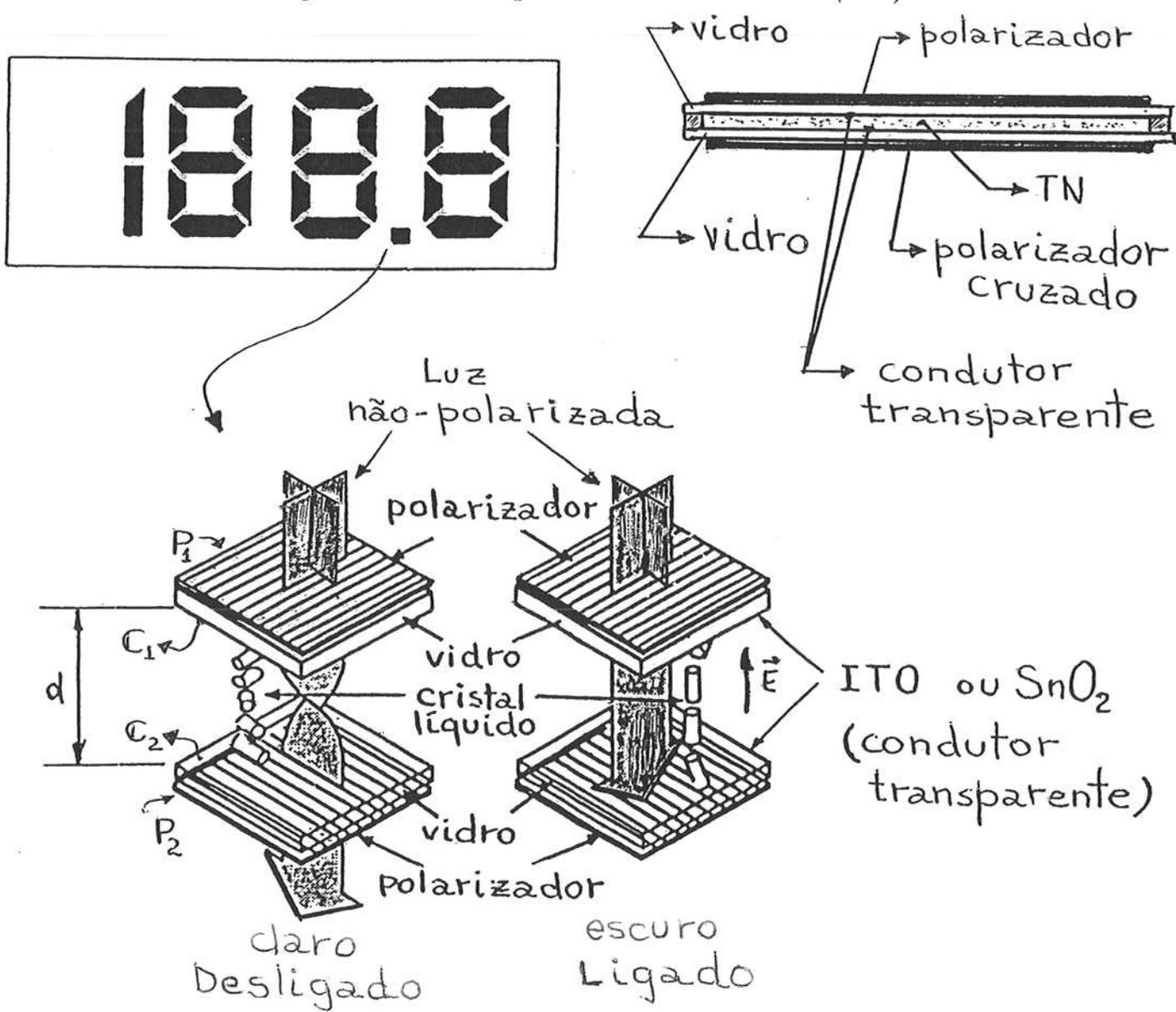


Figura 23: Funcionamento do TNLCD.

4.2 Mostrador de cristal líquido nemático torcido (TNLCD)

A Figura 23 mostra esquematicamente um pixel de mostrador de cristal líquido nemático torcido 90° (TNLCD). Uma camada de cristal líquido de espessura d da ordem de grandeza de uma dezena de μm é confinada entre lâminas de vidro revestidas com litografia de condutor transparente¹¹. Os polarizadores são cruzados e o cristal líquido é torcido 90° de forma que o diretor é alinhado com o polarizador P_1 na entrada e com P_2 na saída. No caso, trata-se de um display de *contraste positivo*, significando mostrador “normalmente claro”, isto é, mostrador claro no modo desligado. Basta alinhar o polarizador P_2 com P_1 , para transformar o display em “normalmente escuro” (contraste negativo).

A luz não-polarizada se torna linearmente polarizada no polarizador de entrada P_1 , que está alinhado com o diretor do cristal líquido na camada de condutor transparente C1. A polarização linear da onda “acompanha” o diretor ao atravessar a camada de cristal líquido e sai do cristal líquido alinhada com o polarizador P_2 . Assim, a célula LC fica clara.

Quando uma tensão elétrica suficiente é aplicada aos eletrodos de condutor transparente C1 e C2, o campo elétrico tende a alinhar o diretor com a direção de propagação da onda e a rotação de 90° na polarização inicial deixa de ocorrer. Assim, a polarização da luz deixa de girar 90° , o polarizador P_2 estará perpendicular à polarização e a célula fica escura.

O TNLCD descrito funciona para *transmissão* da luz (“modo transmissivo”). Acrescentando uma película de alumínio na parte traseira o mostrador funcionará igualmente no chamado “modo reflexivo”, como mostrado na Figura 24.

A Figura 25 representa um mostrador de cristal líquido matricial tipo matriz passiva. Quando se aplica tensão num dado eletrodo de linha e em outro de coluna, no cruzamento da linha com a coluna, o elemento (pixel) fica escuro, por exemplo no caso do mostrador normalmente claro.

A grande vantagem do TNLCD é também a sua grande desvantagem. Cada **pixel** (elemento de imagem) do TNLCD é uma “chave de luz” que fica claro ou escuro. O consumo de corrente para manter o pixel claro ou escuro, ou para comutar de claro para escuro é extremamente baixo. Mas a grande desvantagem é que o TNLCD não emite luz. Necessita de iluminação ambiente ou fontes luminosas e essa é a grande desvantagem. Telas de TV e monitores de vídeo baseados em LCD, devem ter um sistema de iluminação traseira (“backlight”), geralmente construído a partir de lâmpadas fluorescentes. Mostradores menores, tais como relógios ou calculadoras, costumam ter placas eletroluminescentes.

5 Fotoelasticidade em amostras bidimensionais

Por fotoelasticidade entende-se efeitos sobre a polarização da luz devidos a deformações elásticas num meio transparente. Mais precisamente, tensões internas num material transparente produzem birrefringência¹² o que leva a modificações na polarização da luz. Pode-se considerar por exemplo uma placa de acrílico entre 2 polarizadores alinhados tal como na Figura 26. Na ausência de tensões mecânicas, a luz é transmitida e o conjunto fica transparente. Se forem aplicadas forças em pontos da placa, pode ocorrer, por exemplo, que numa

¹¹Indium and Thin Oxide (ITO) ou SnO_2

¹²Lâminas birrefringentes são discutidas um pouco mais detalhadamente no Apêndice F.

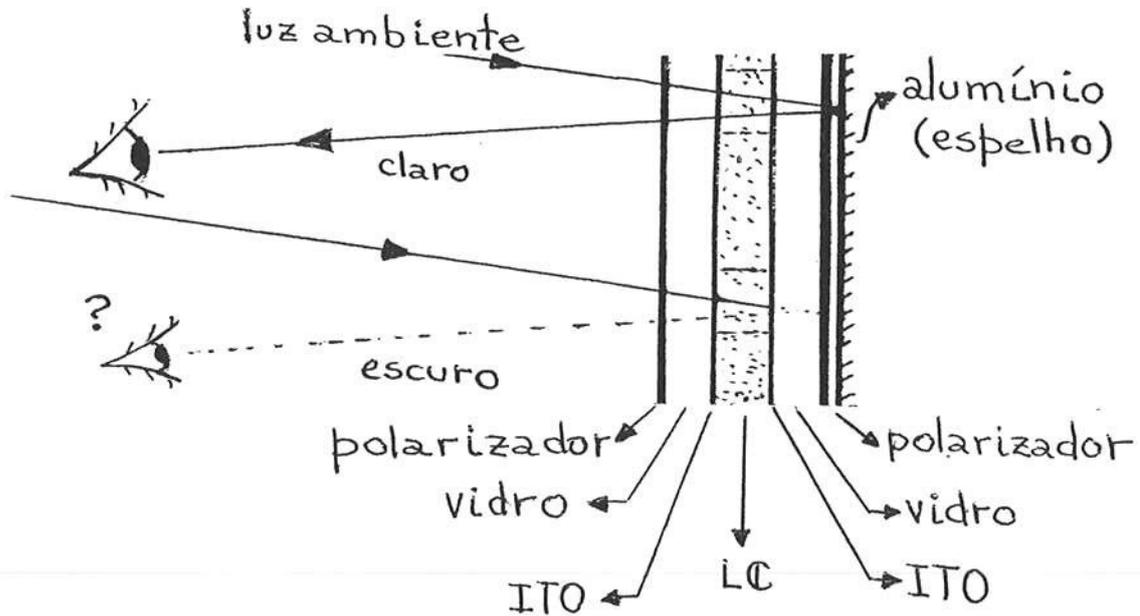


Figura 24: TNLCD no modo reflexivo.

determinada região a polarização da luz girar 90° devido à tensão mecânica. Assim, nesta região não há transmissão de luz: a polarização da luz que sai do 1º polarizador gira 90° e estará cruzada com o 2º polarizador e portanto tem-se uma região escura. A Figura 27 mostra franjas numa placa de acrílico sob fortes tensões.

Deve ser observado que o efeito fotoelástico depende do comprimento de onda. Isto significa que dependendo do material transparente, espessura da amostra e das tensões existentes, pode ocorrer extinção para algumas cores e transmissão para outras. Assim, resulta em geral padrões de franjas coloridas. Mas se o efeito da birrefringência não é muito grande resulta um padrão de franjas branco-e-preto.

Certos materiais apresentam tensões internas permanentes, independentes da aplicação de forças externas. Nestes casos, basta colocar a amostra entre polarizadores para observar o efeito fotoelástico. Como exemplos, apresentam birrefringência plásticos comuns como polipropileno, policarbonato, fita adesiva transparente, transparência de retroprojeter. Materiais como vidro ou acrílico apresentam efeito fotoelástico apenas quando submetidos a tensões.

Referências

1. W. A. Shurcliff and S. S. Ballard, "Polarized Light", Van Nostrand Princeton (1964).
2. W. Swindell (Editor), "Polarized Light", Dowden, Hutchinson and Ross Inc., Stroudsburg (Pennsylvania) (1975).
3. E. Collett, "Polarized Light - Fundamentals and Applications", Marcel Dekker, Inc., New York (1993).
4. E. Hecht and A. Zajac, *Optics*, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company (1987).
5. R. D. Guenther, *Modern Optics*, John Wiley, New York (1990).

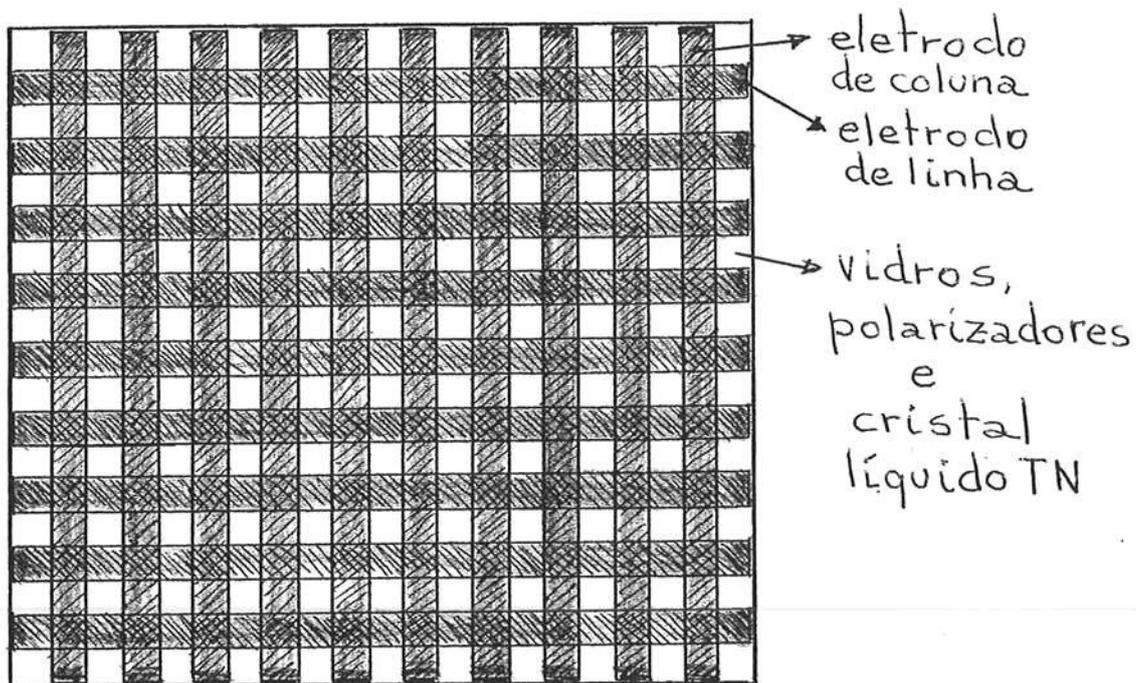


Figura 25: *Mostrador matricial tipo matriz passiva.*

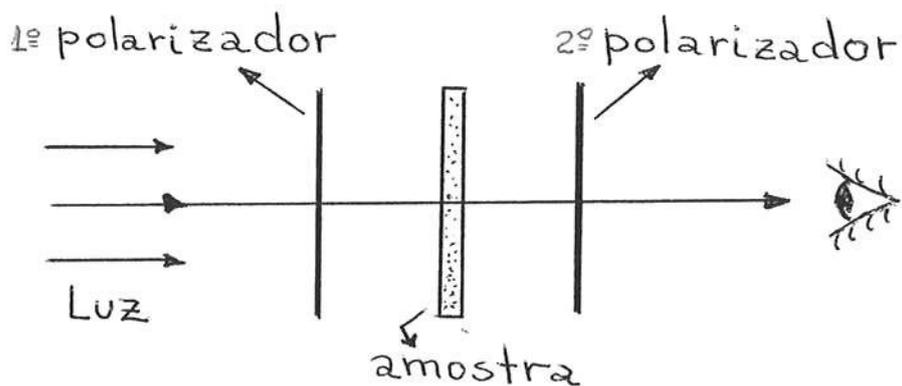


Figura 26: *Observação de fotoelasticidade em amostras planas transparentes.*

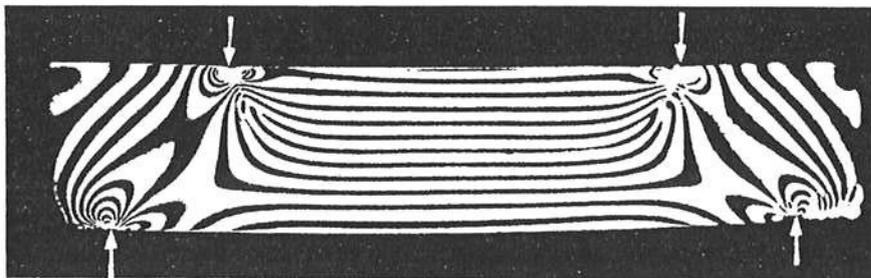
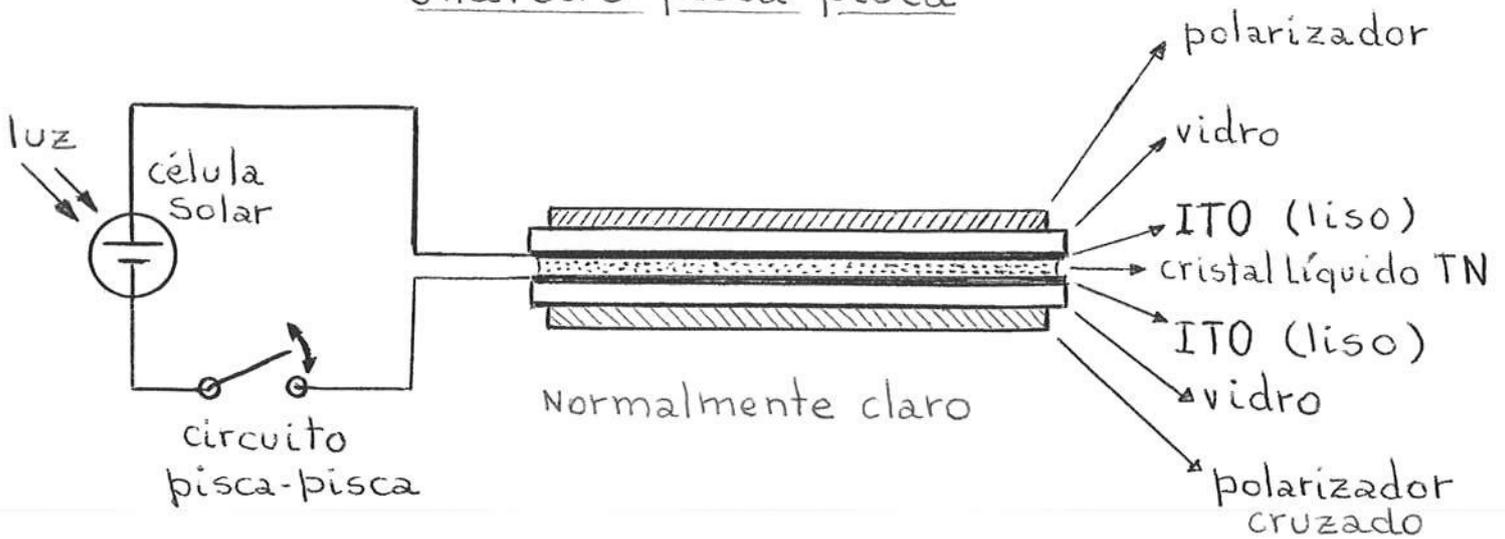
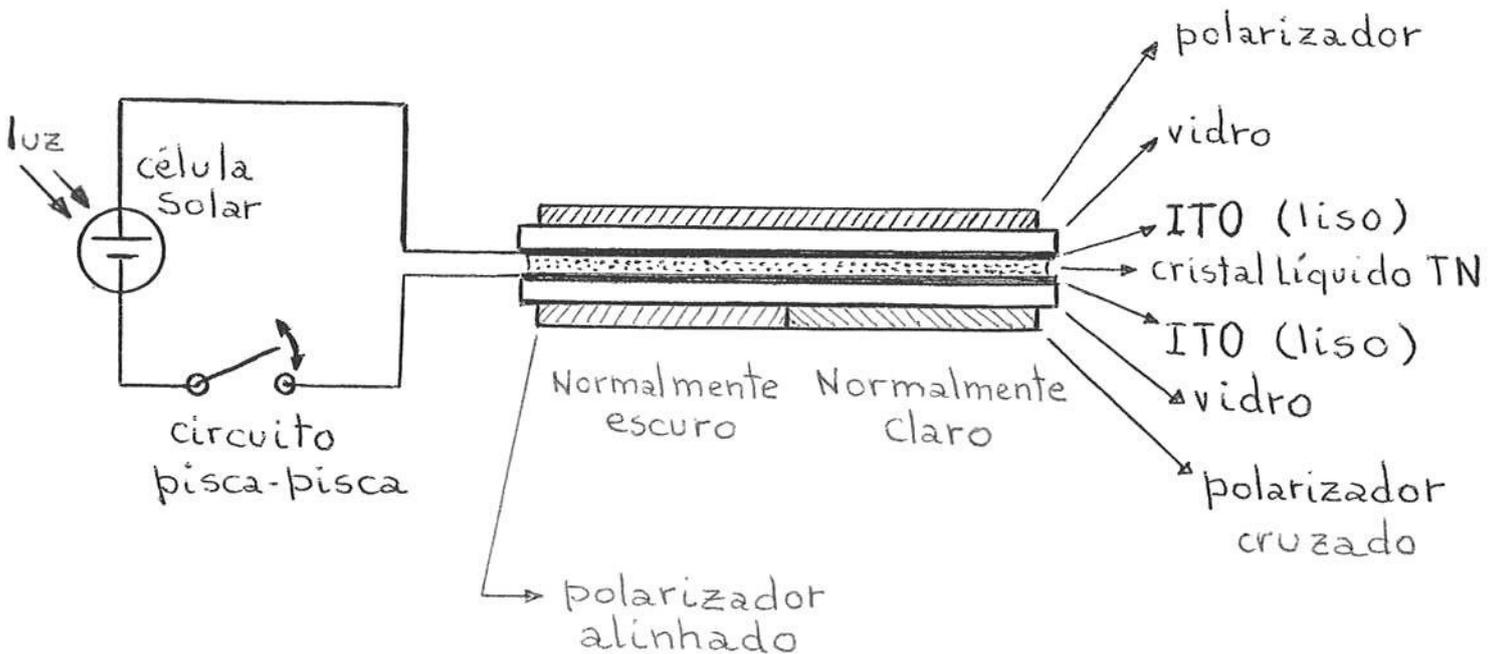


Figura 27: *Exemplo de padrão observado numa placa de acrílico sob fortes tensões.*

Chaveiro pisca-pisca



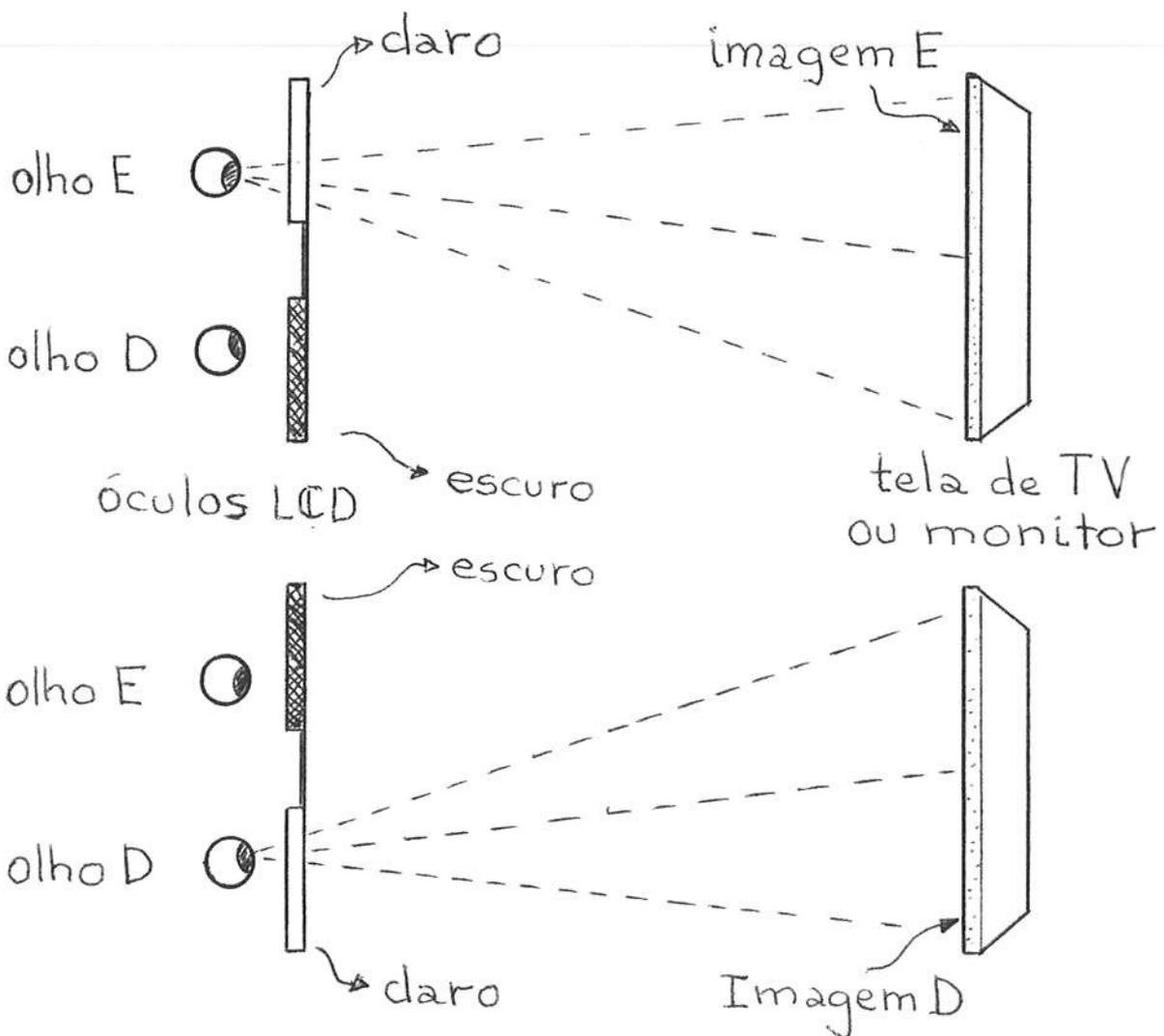
Chaveiro pisca-alternado



Televisao ou monitor de video 3D

(Esquema de quadros alternados sequenciais)

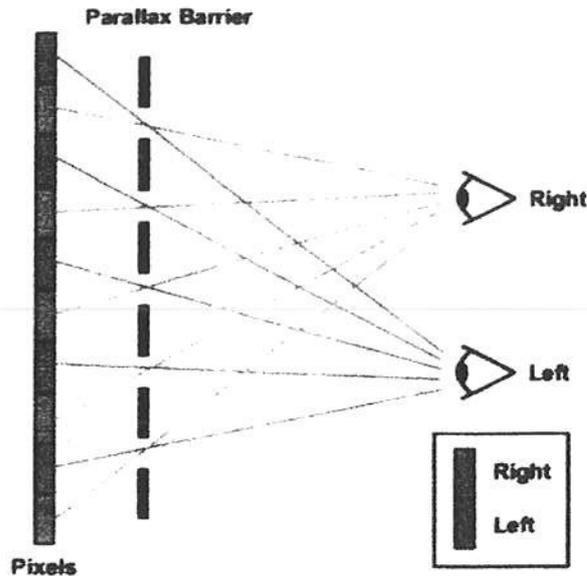
- Quadros D e E produzidos alternadamente pela TV
- Óculos LCD com obturadores alternados sincronizados com a TV



Visão 3D

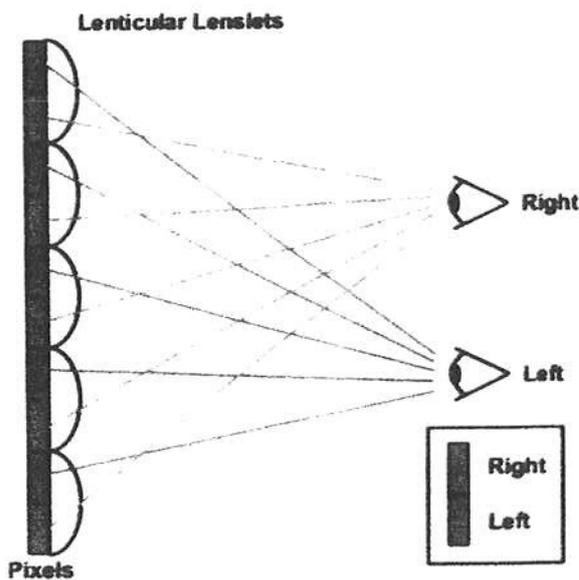
Sistemas autoestereoscópicos (sem óculos)

- Barreira de paralaxe



Method of operation for an autostereoscopic parallax barrier

- Sistema lenticular



Method of operation for an autostereoscopic lenticular lens