

Universidad Tecnológica Nacional

Física Electrónica



Trabajo Práctico de Laboratorio

“Observación de fenómenos de difracción, interferencia y polarización, utilizando un láser de He-Ne ($\lambda=632,8\text{nm}$), como fuente luminosa.”

Curso: R-2051

Profesor:

Francisco, Diodati

Alumnos:

Juan Pablo Costa

Javier Garbini

Javier Gomez

Juan Irigoyen

Agustín Rodríguez Adami

Fecha de realización: 5 de Mayo de 2009

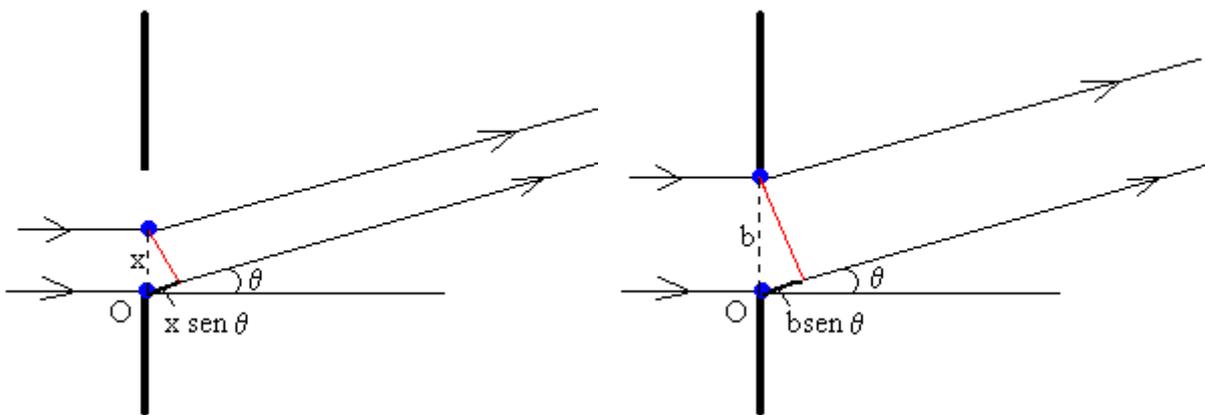
1. Difracción con ranuras

La difracción de las ondas luminosas es un fenómeno que se observa cuando un obstáculo interrumpe parcialmente la propagación de un frente de onda; sin embargo los efectos más fácilmente visibles, corresponden a situaciones, en las que por lo menos una de las dimensiones del obstáculo, es comparable a la longitud de onda. El caso más sencillo de analizar corresponde a la difracción de Fraunhofer, en la que los efectos deben observarse sobre pantallas muy alejadas del obstáculo (que permitan la simplificación de considerar señales que viajan en forma paralela). El primer ejemplo a considerar corresponde al caso de una rendija estrecha y larga, de modo de ignorar los efectos de los extremos. Se supone además que las ondas incidentes son monocromáticas y con dirección normal al plano de la rendija.

De acuerdo con el principio de Huygens, cuando la onda incide sobre una rendija todos los puntos de su plano se convierten en fuentes que emiten nuevas ondas, denominadas ondas secundarias, por lo que la explicación del fenómeno de la difracción no es cualitativamente distinto de la interferencia, aunque para analizar el fenómeno de manera sencilla, se requiere ampliar dicha descripción mediante el principio de Fresnel, en el que se incorpora el concepto de zonas de Fresnel por el cual se supera la limitación de considerar solamente fuentes puntuales.

Según la Teoría Electromagnética de la luz, se trata de fenómenos característicos de la propagación de ondas, que poseen al menos coherencia parcial.

Descripción

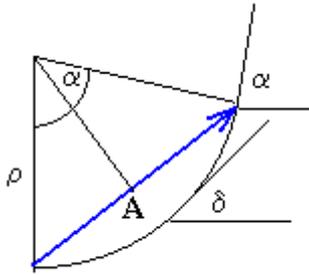


Sea b el ancho de la rendija, considerando que las fuentes secundarias de ondas se originan en cada punto de la misma.

- En la figura de la izquierda, la diferencia de caminos entre la onda secundaria originada en la fuente ubicada en el punto O y aquella originada en el punto x es, $x \cdot \sin \theta$.
- La figura de la derecha muestra que la diferencia de caminos, en este caso será $b \cdot \sin \theta$.

Si se realizara el detalle de la superposición en un punto P (teóricamente ubicado en el infinito), la suma de los fasores de amplitud incremental (en la medida que representa la contribución de cada zona de Fresnel), permitiría calcular la amplitud de onda resultante en dicho lugar. A su vez mediante el recurso analítico de tomar el valor límite, dicha suma gráfica se transforma en un arco de circunferencia, cuya cuerda es la amplitud resultante ψ_P .

El ángulo δ representa gráficamente el desfase entre el faser originado en x y aquel originado en O , cuyo valor es $kx \cdot \sin \theta$



Denominando con α al desfazaje máximo correspondiente a este ejemplo, cuyo valor será: $kb \cdot \text{sen} \theta = 2\pi b \cdot \text{sen} \theta / \lambda$. Este ángulo es el mismo que el subtendido entre los extremos del arco de circunferencia de radio ρ .

El cálculo la longitud de la cuerda, según el detalle que muestra el gráfico auxiliar es:

$$\text{cuerda } A = 2 \rho \text{sen} \frac{1}{2} \alpha = 2 \rho \text{sen} \frac{\pi b \text{sen} \theta}{\lambda}$$

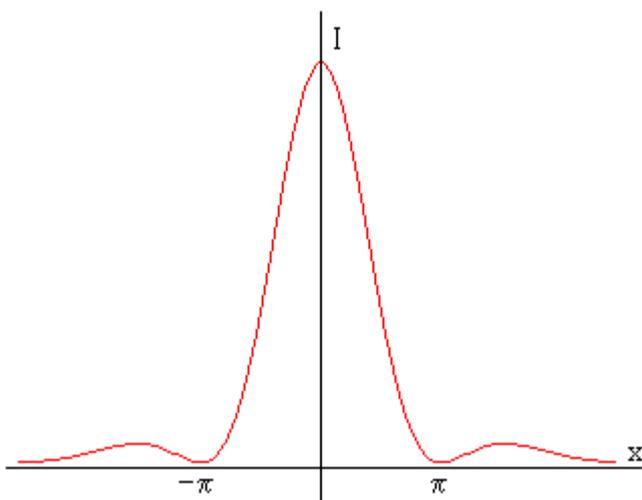
$$\text{arco } A_0 = \rho \alpha = \rho \frac{2 \pi b \text{sen} \theta}{\lambda}$$

Eliminando el radio ρ , queda

$$A = A_0 \left(\frac{\text{sen} \frac{\pi b \text{sen} \theta}{\lambda}}{\frac{\pi b \text{sen} \theta}{\lambda}} \right)$$

y como las intensidades son proporcionales a los cuadrados de las amplitudes

$$I = I_0 \left(\frac{\text{sen} x}{x} \right)^2 \quad x = \frac{\pi b \text{sen} \theta}{\lambda}$$



El máximo de la difracción se produce cuando el argumento del seno es cero, ya que

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\text{sen} x}{x} = 1$$

Para que dicho argumento sea cero, el ángulo θ debe ser cero. Por lo que el máximo de intensidad se producirá en la dirección perpendicular al plano de la rendija.

Mínimos de intensidad

Los mínimos de intensidad se producen cuando el argumento del seno es un múltiplo entero de π , es decir, cuando

$$\frac{\pi b \sin \theta}{\lambda} = n \pi$$

o bien, cuando

$$b \cdot \sin \theta = n \lambda \quad (n=1, 2, 3\dots) \quad \text{mínimos de intensidad}$$

Esta es la expresión que describe el fenómeno de difracción de Fraunhofer producido por una rendija estrecha.

Máximos secundarios

Los máximos y mínimos se calculan derivando la fórmula de la intensidad respecto de $x = \pi b \cdot \sin \theta / \lambda$

$$I = I_0 \frac{\sin^2 x}{x^2}$$

$$\frac{dI}{dx} = 2I_0 \left(\frac{\sin x}{x} \right) \left(\frac{x \cos x - \sin x}{x^2} \right)$$

- Cuando $\sin x/x = 0$ se tiene un mínimo de intensidad, pues $I=0$
- Cuando $x \cos x - \sin x = 0$ o bien, cuando $x = \tan x$ se tendrá un máximo de intensidad

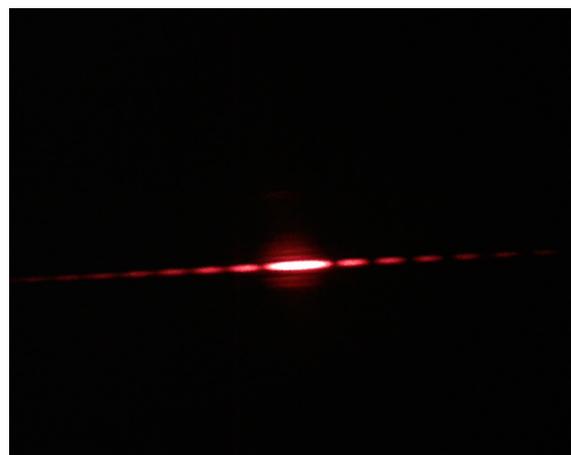
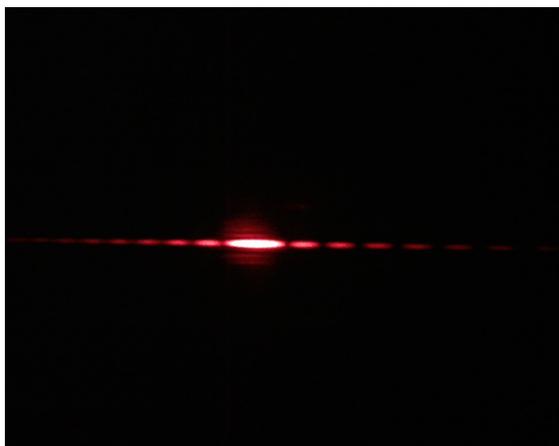


Observando el diagrama de difracción a distancia, se aprecia:

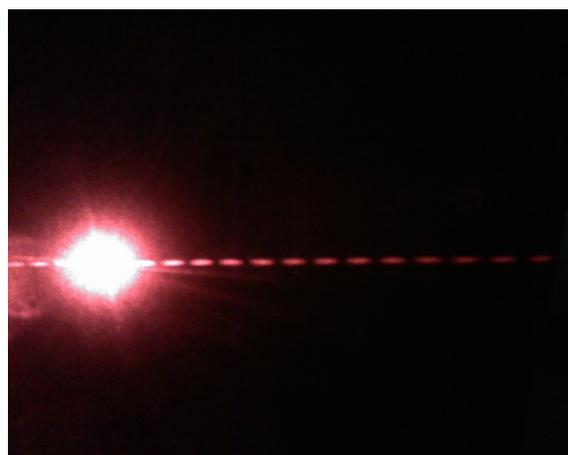
- 1) *el máximo principal*
- 2) *una "estela luminosa" horizontal indicativa de la orientación vertical de la ranura*

Acercándose a la pantalla de observación, se aprecia el detalle de los máximos principales y secundarios que se forman por la difracción de Fraunhofer por una ranura, destacándose además:

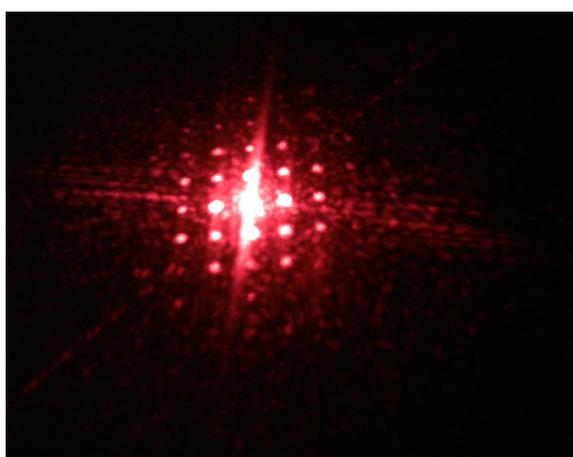
- 1) que la mancha central es más brillante y que la misma,
- 2) tiene el doble de extensión que los máximos secundarios que la flanquean.



2. Difracción por un alambre

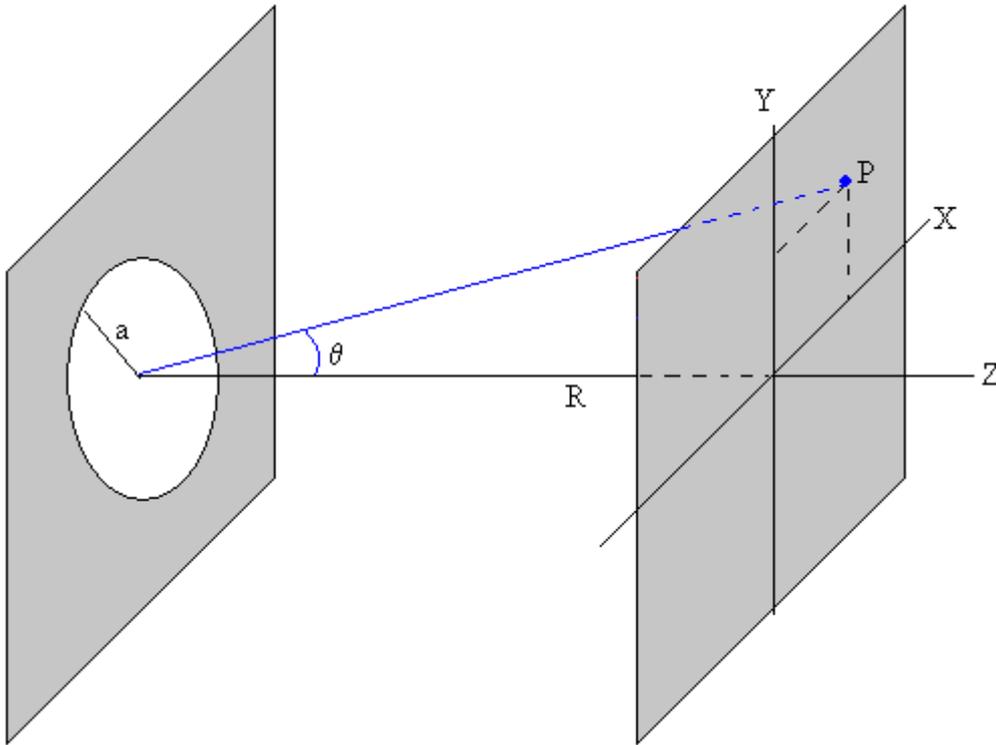


3. Malla de alambres cruzados



4. Difracción producida por una abertura circular

En la figura, se muestra el obstáculo, una abertura circular de radio a , y un punto P situado en una pantalla a una distancia R del obstáculo. La recta que une el centro del círculo y el punto, forma un ángulo θ con el eje Z.



La expresión de la intensidad $I(x, y)$ registrada en el punto P debido a la difracción de ondas planas de longitud de onda λ por el obstáculo, es

$$I(x, y) = I(0) \left(\frac{2J_1(\alpha)}{\alpha} \right)^2 \quad \alpha = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{sen } \theta$$

Donde $I(0)$ es la intensidad registrada en el origen de la pantalla

$J_n(\alpha)$ es la función de Bessel de orden n .

Máximos y mínimos

- Los máximos de intensidad se producen cuando

$$\frac{d}{d\alpha} \left(\frac{J_1(\alpha)}{\alpha} \right) = 0$$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{d}{d\alpha} J_1(\alpha) - \frac{1}{\alpha^2} J_1(\alpha) = 0$$

$$\alpha \frac{d}{d\alpha} J_1(\alpha) - J_1(\alpha) = 0$$

Las funciones de Bessel tiene la siguiente relación de recurrencia

$$x \frac{d}{dx} J_n(x) = nJ_n(x) - xJ_{n+1}(x)$$

Aplicando esta propiedad a la función $J_1(\alpha)$

$$\alpha \frac{d}{d\alpha} J_1(\alpha) = J_1(\alpha) - \alpha J_2(\alpha)$$

Se concluye que los máximos secundarios de intensidad son los ceros de la función de Bessel $J_2(\alpha)$.

$$J_2(\alpha) = 0$$

- Los mínimos de intensidad son los ceros de la función de Bessel $J_1(\alpha)$.

$$J_1(\alpha) = 0$$

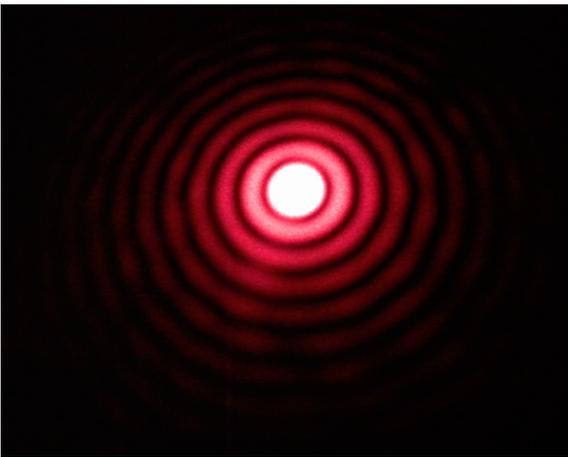
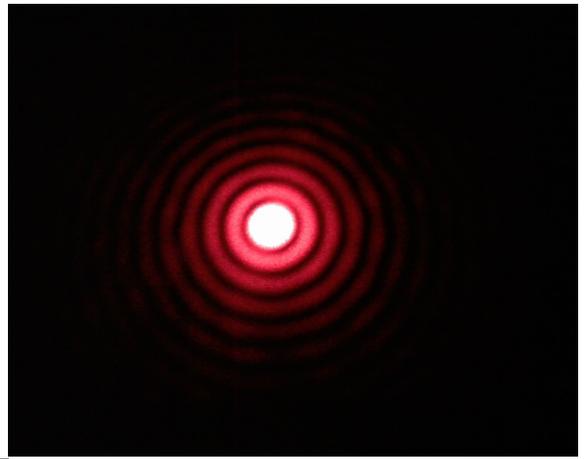
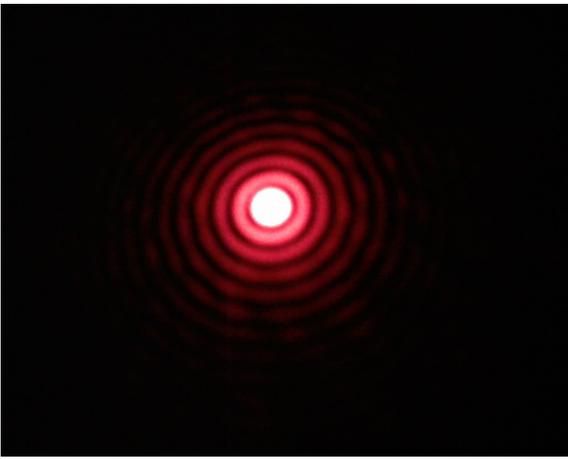
Ahora bien $J_1(\alpha)$ presenta un cero para $\alpha=0$, y este corresponde a un máximo de intensidad, ya que

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \left(\frac{2J_1(\alpha)}{\alpha} \right) = 1$$

En la siguiente tabla, se proporcionan los primeros ceros de las funciones de Bessel $J_1(x)$ y $J_2(x)$.

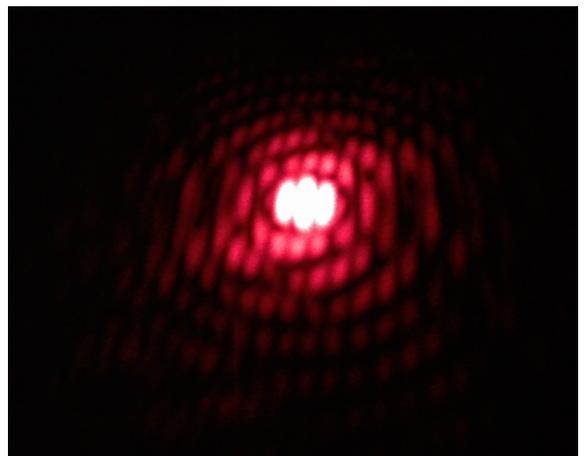
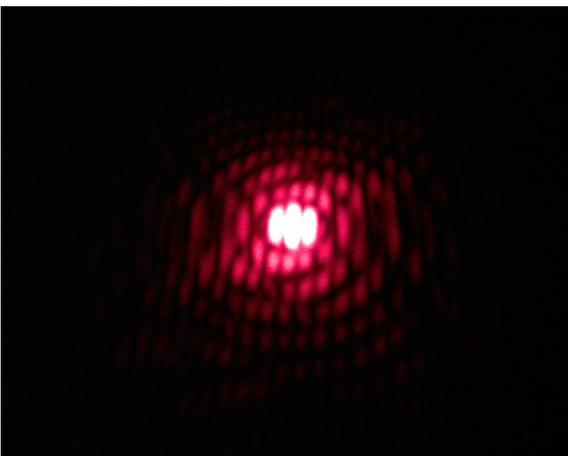
$J_1(x)$	$J_2(x)$
3.8317	5.1356
7.0156	8.4172
10.1735	11.6198
13.3237	14.7960
16.4706	17.9598
19.6159	21.1170
22.7601	24.2701
25.9037	27.4206
29.0468	30.5692
32.1897	33.7165

Registros fotográficos de la difracción producida por una abertura circular (pin hole)

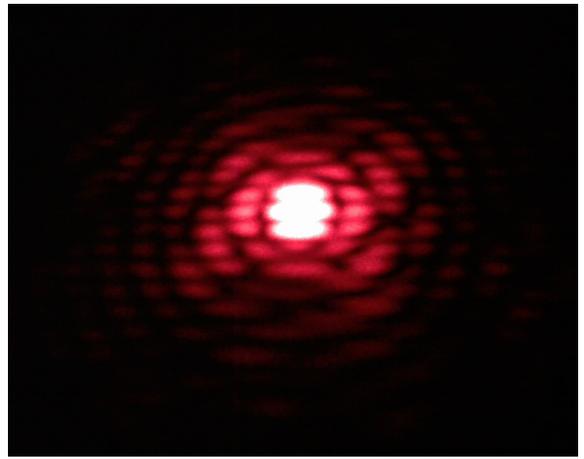
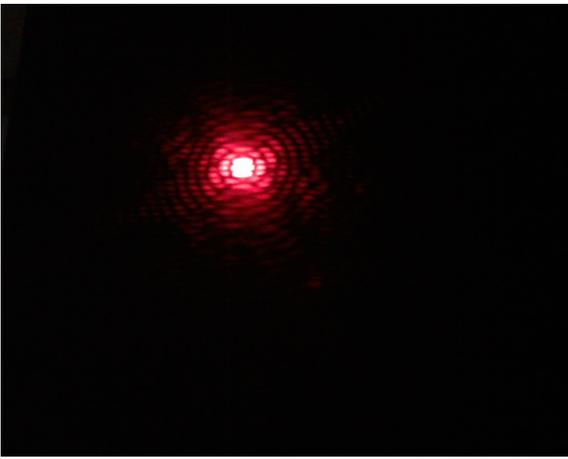


Registros fotográficos de la difracción producida por dos aberturas circulares, de diámetros “casi idénticos” y muy cercanos entre si, de modo que generan interferencias que alteran el diagrama de difracción

a) Separación horizontal

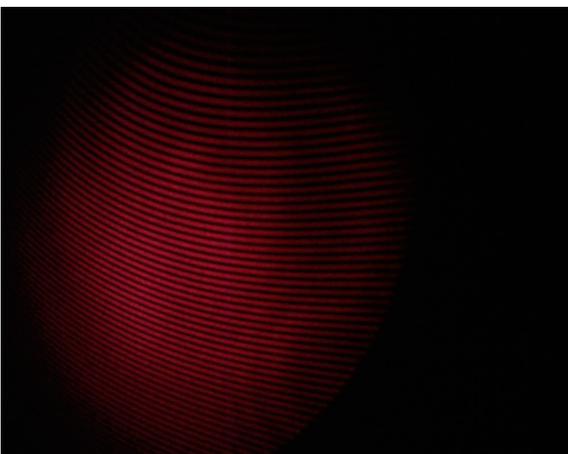


b) Separación vertical (rotando la pantalla con la doble perforación)



5. Lámina de vidrio de caras paralelas

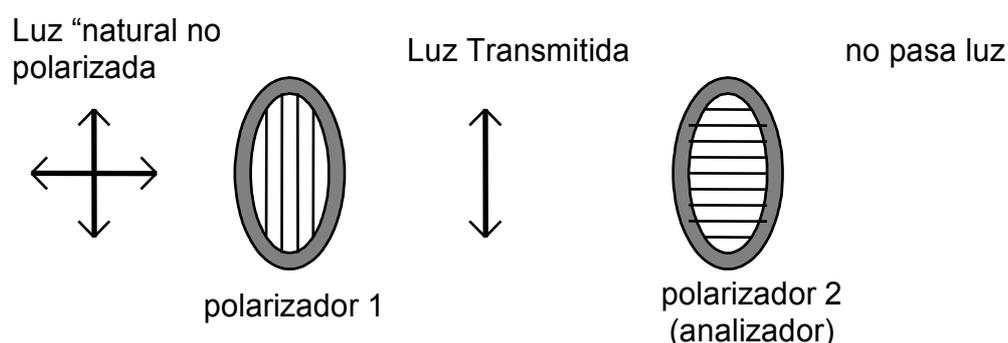
A través del diagrama de interferencia (correspondiente al tratamiento hecho en clase teórica, como lámina de caras paralelas, incidencia oblicua); se puede apreciar la calidad del componente óptico. Pues de acuerdo al modelo desarrollado, cuanto mas regular y concéntricas están las líneas de interferencia, producidas por las reflexiones parciales en cada cara de la lámina, tanto más planas y paralelas son dichas caras.



NOTA: Todas las fotografías que anteceden son registros de efectos que producen distintos obstáculos, pantallas y componentes, que interceptan parcialmente la luz de un láser. Estos “obstáculos, pantallas y componentes” fueron preparados en CITEFA, por el Técnico Óptico Sr. Osvaldo J. Vilar, a quién se deja constancia expresa del agradecimiento por su generosa colaboración.

6. Polarización de la luz. Polarizadores y láser

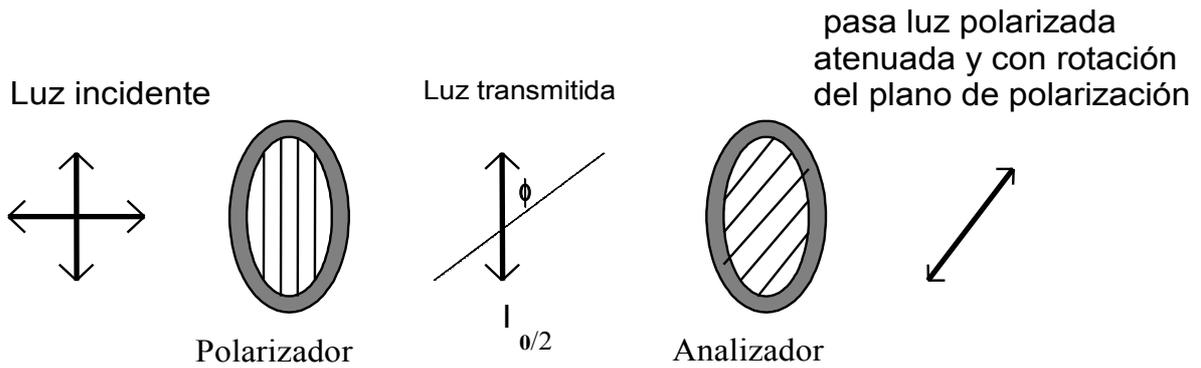
Un polarizador es un componente óptico que modifica las características de la onda luminosa que lo atraviesa. Por ejemplo si sobre el mismo incide “luz natural” (típico de la luz solar directa o la proveniente de una fuente térmica, como es una lámpara de filamento), en que el vector luminoso (vector campo eléctrico, según la teoría electromagnética) está vibrando en cualquier dirección normal a la de propagación; la luz transmitida en cambio, conservará solamente la vibración en la dirección que impone el polarizador. En este caso se dice además que la luz está rectilíneamente polarizada o con polarización plana. Ese plano está determinado por la dirección de polarización que el polarizador impone, de este modo cuando la luz pasa por un polarizador "ideal", solo la mitad de ella es transmitida (dado que en la práctica, no existen polarizadores ideales, la luz transmitida suele ser menor que la mitad de la luz incidente). Si esta luz polarizada se la hace incidir sobre un segundo polarizador cuya dirección de polarización es perpendicular a la del primero, se observará que no se transmite luz a través del segundo polarizador. Esta condición se la describe como: extinción total, producida por dos polarizadores cruzados. Destacando además que se utiliza la denominación de “analyzer” para el segundo polarizador, por la función que cumple. Esta disposición se la esquematiza en el gráfico que sigue:



Sin embargo, si el segundo polarizador está orientado en un ángulo ϕ cualquiera, respecto de la dirección vertical de transmisión del primero; en este caso el análisis se plantea considerando que solamente será transmitida, la componente del campo eléctrico en la misma dirección que tiene el eje de transmisión del analizador. Se tendrá así que luz transmitida a través del segundo polarizador, cumple la (empíricamente) conocida Ley de Malus.

$$I = I_0 (\cos \phi)^2$$

Esta situación se esquematiza en la figura inferior.



(ADVERTENCIA: en el esquema que antecede, se ha considerado que I_0 es la intensidad de la “luz natural” incidente)

Si se considera en cambio que E_0 es la amplitud del campo eléctrico transmitida por el polarizador 1, la componente del mismo que a su vez será transmitida por el polarizador 2, esta determinada por trigonometría como:

$$E = E_0 \cdot \cos \phi$$

Por lo tanto como la intensidad de la luz varía en función del cuadrado del campo eléctrico, la intensidad de la luz transmitida estará dada, como se dijo anteriormente por: $I = I_0 \cdot (\cos \phi)^2$

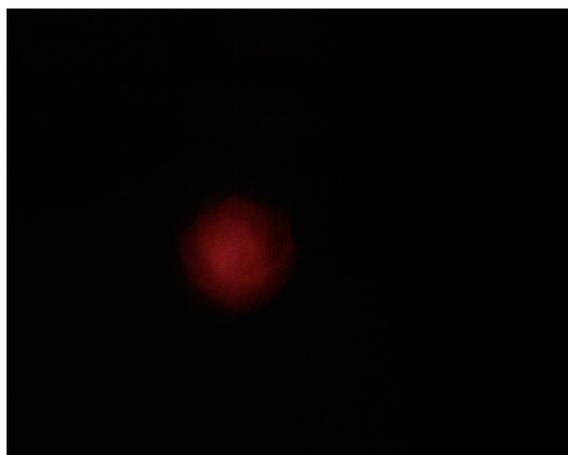
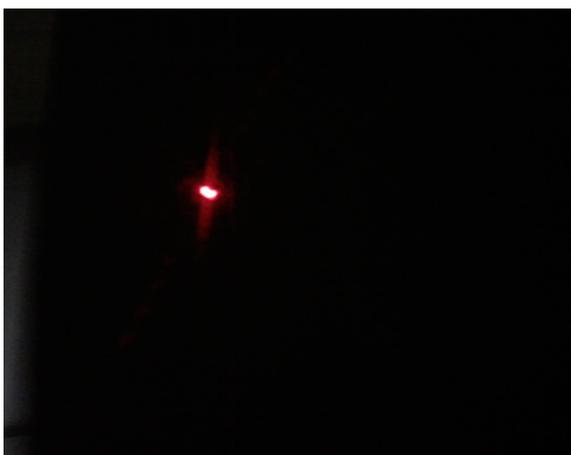
en que I_0 es la intensidad de la luz incidente y ϕ es el ángulo entre el eje del polarizador 1 y el eje del polarizador 2.

Si $\phi = 90^\circ$, entonces $\cos(90^\circ) = 0$, y no hay luz transmitida.



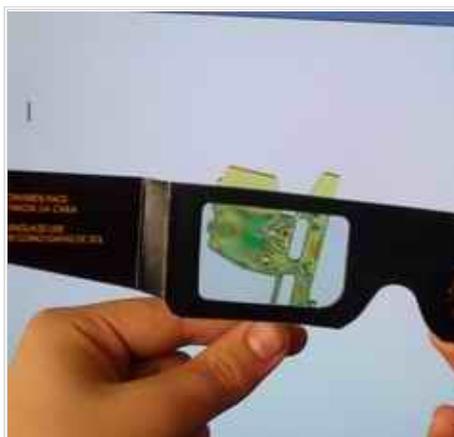
Se observan los dos polarizadores dispuestos a 90° uno del otro

Se puede apreciar además la variación de la cantidad de luz transmitida a medida que se modifica el ángulo, entre las direcciones de transmisión de los polarizadores

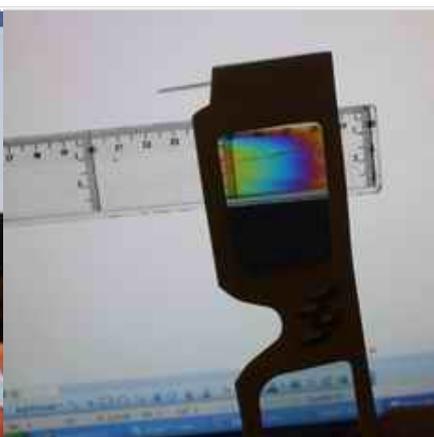


A continuación se han agregado imágenes y explicaciones de aplicaciones de efectos de polarización, en dispositivos de uso cotidiano, las que fueron tomadas de la siguiente referencia:

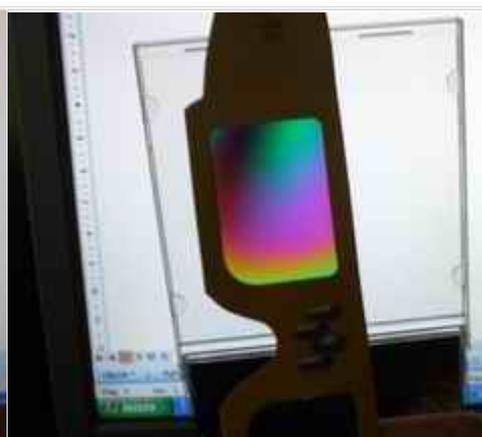
<http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid2/rc-111/rc-111b.htm>



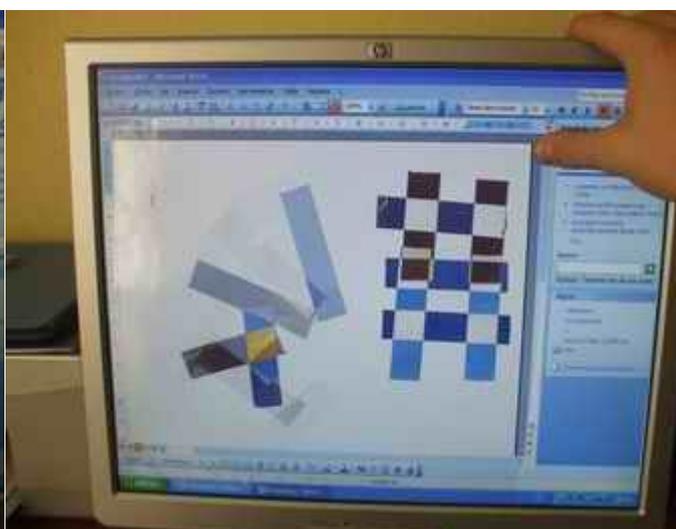
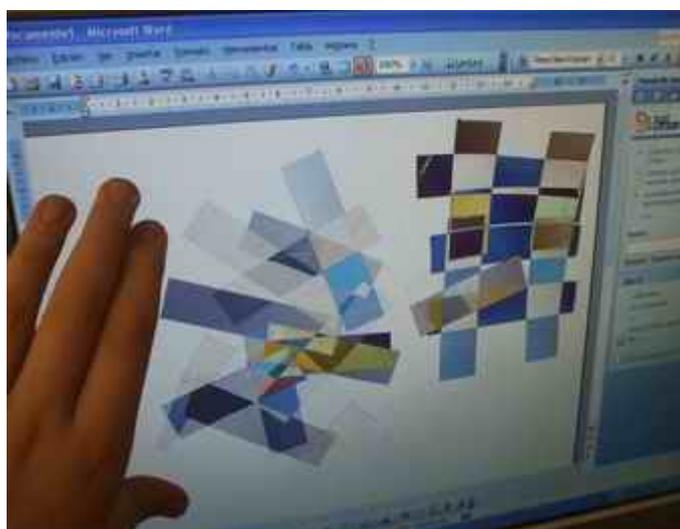
Pieza de plástico



regla



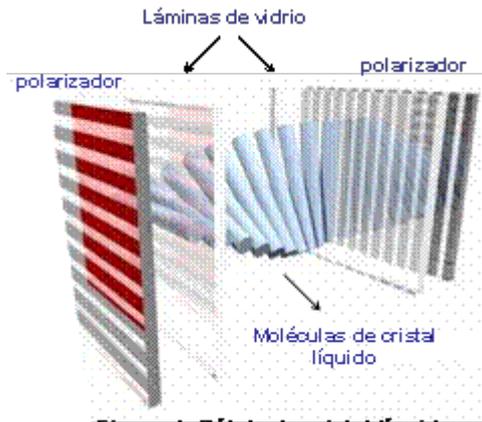
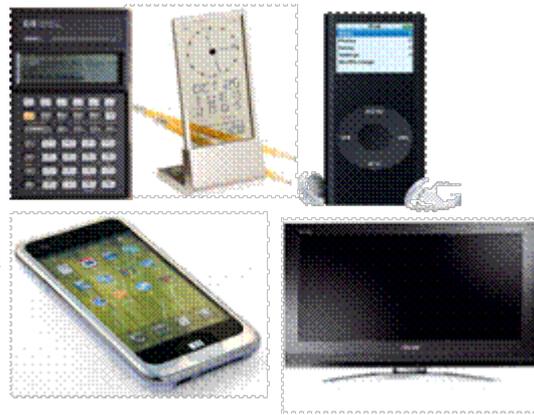
Funda rígida de CD



Efectos que causan varias tiras de papel adhesivo (cello) superpuestas iluminadas con luz polarizada y observadas a través de un polarizador

PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO (LCD: Liquid Crystal Display)

Los dispositivos electroópticos son el elemento fundamental en la construcción de las pantallas de cristal líquido (LCD). El grado de complejidad de su construcción aumenta con la sofisticación del producto final en el que se emplean, desde la simplicidad de la calculadora, hasta la última generación de TFTs del mercado, pero los principios básicos de su funcionamiento son los mismos.



El dispositivo electroóptico se construye, de forma simplificada, tomando dos láminas de vidrio en las que se realizan unas hendiduras de tamaño similar a las moléculas del cristal líquido nemático que se introduce entre ambas. Estas dos láminas al colocarse de forma perpendicular originan una orientación molecular preferente y la aparición de un eje óptico helicoidal dentro del material (Fig. 1). Dicho eje óptico es análogo al que encontramos en las mesofases colestéricas o nemáticas quirales. Por último, tras el segundo polarizador, se coloca un espejo que reflejará la luz que atraviesa el dispositivo llegando a los ojos del espectador.

Figura 1. Célula de cristal líquido

La aplicación de un campo eléctrico sobre la célula de cristal líquido va a dar lugar a las dos posiciones off / on necesarias para el funcionamiento de las pantallas de cristal líquido. Si el campo eléctrico está desconectado las moléculas de cristal líquido mantienen su orientación preferente y dejan que la luz polarizada (aquella cuyas vibraciones están restringidas a una única dirección en el espacio) atraviese la célula reflejándose en el espejo y dando lugar a una celda transparente (Fig. 2a). Sin embargo, al conectar un campo eléctrico en el dispositivo las moléculas giran y pierden su orientación para colocarse paralelas al campo eléctrico impidiendo que la luz polarizada atraviese el segundo polarizador, y por tanto no se podrá reflejar en el espejo originando una célula negra (Fig. 2b).

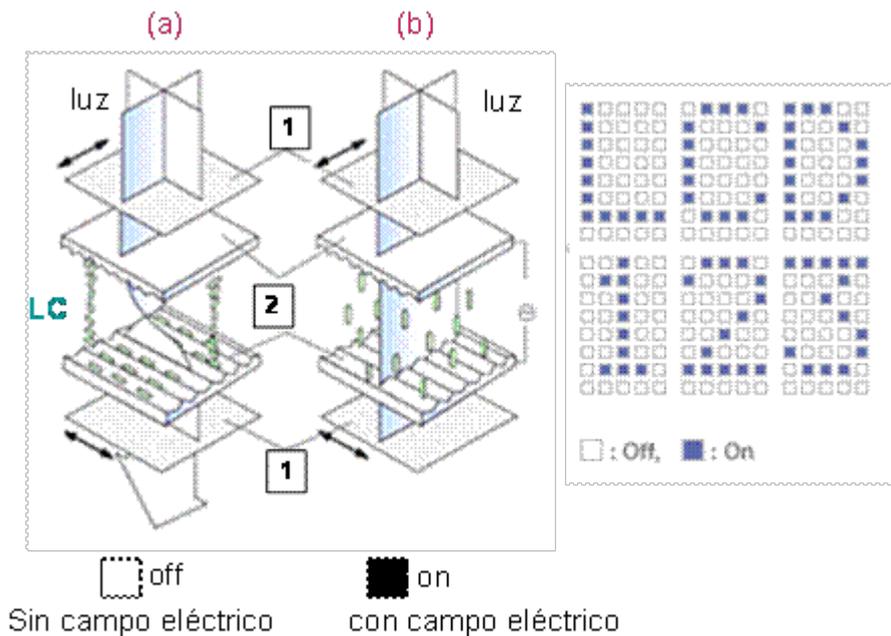


Figura 2. APLICACIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO: POSICIONES off / on. (1): polarizadores y (2): láminas de vidrio

El siguiente paso en la construcción de una pantalla LCD consiste en agregar a cada una de las células de cristal líquido, como las que se muestran en la figura 2, unos filtros de los colores básicos rojo, verde y azul. Cada una de las células junto con el filtro del color correspondiente se denomina subpíxel y a su vez el subpíxel rojo, el subpíxel verde y el subpíxel azul forman lo que se

conoce con el nombre de píxel. Dependiendo de la intensidad del campo eléctrico aplicado sobre la célula se pueden alcanzar distintos niveles de transparencia en los subpíxeles (se modula la cantidad de luz que atraviesa la célula). Si el valor del campo es máximo las moléculas se alinearán totalmente y la luz no podrá atravesar el segundo polarizador y el subpíxel estará desactivado. Si el campo es nulo, o de un valor mínimo, toda la luz atraviesa el segundo polarizador y el subpíxel será brillante. Entre los dos valores extremos de campo eléctrico se obtendrán las diferentes tonalidades de rojo, verde y azul. Por lo tanto, modificando el voltaje podremos obtener distintas tonalidades en los subpíxeles verdes, en los azules y en los rojos. Debido al minúsculo tamaño de los subpíxeles el ojo humano únicamente puede percibir un punto, es decir, un píxel cuyo color vendrá dado por la mezcla de los colores de los tres subpíxeles (Fig. 3).

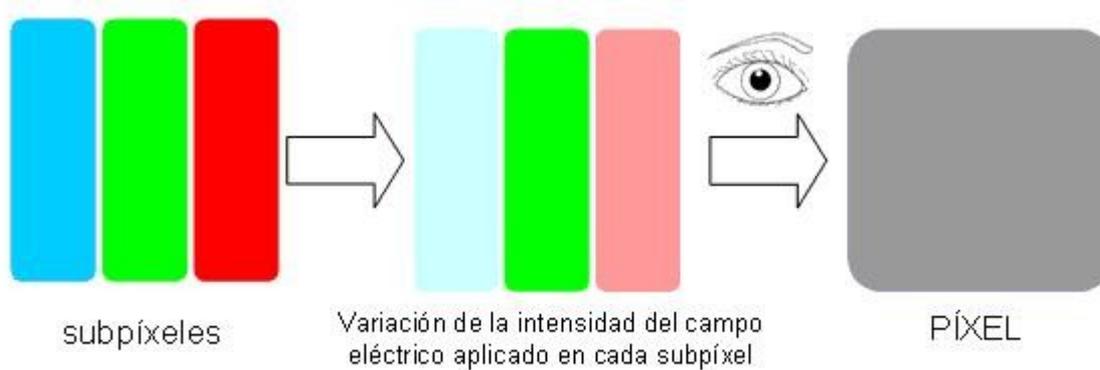


Figura 3. Subpíxeles y píxel

En resumen, si la luz polarizada atraviesa la célula de cristal líquido, por ejemplo, con el filtro rojo el subpíxel rojo estará activo y el ojo observará la tonalidad correspondiente a la cantidad de luz que lo atraviesa. Si la luz polarizada no puede atravesar el segundo polarizador, el subpíxel estará desactivado y el color resultante del píxel que verá nuestro ojo no contendrá al color rojo tal como se observa en la figura 4.1

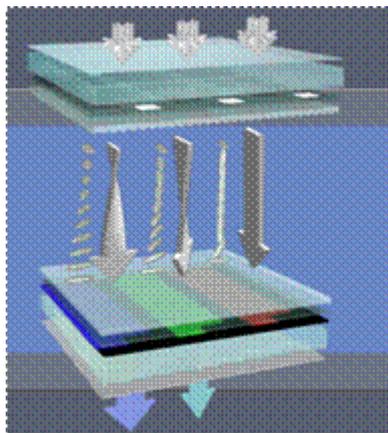


Figura 4

La imagen se forma en la pantalla gracias a la presencia de una multitud de minúsculas células de cristal líquido (tres por cada píxel, Fig. 4). El número de píxeles que contiene una pantalla dependerá de su tamaño y de la resolución final (Fig.5).

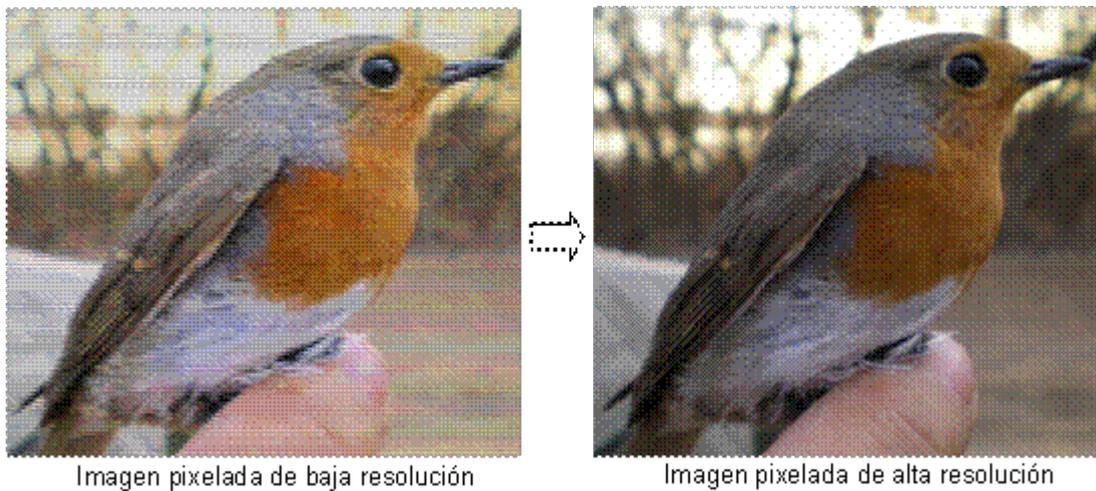


Figura 5. La imagen en un LCD se obtiene a través de píxeles

Las primeras pantallas de cristal líquido que se comercializaron fueron las llamadas DSTN (Super Twisted Nematic Display) o también denominadas de MATRIZ PASIVA utilizadas hasta hace unos años en los ordenadores portátiles. El sistema de control está formado por una lámina de vidrio cubierta con un óxido de metal transparente el cual opera como un sistema enrejado de filas y columnas de electrodos a través de los que pasa la corriente necesaria para activar y desactivar los píxeles de la pantalla. El sistema de control de los monitores de matriz pasiva tiene un problema de velocidad de respuesta, ésta es muy lenta cuando los cambios en la pantalla o el movimiento de ratón son muy rápidos produciendo borrones o estelas en la pantalla. Debido a estos problemas, muchas compañías comenzaron a desarrollar la tecnología TFT (Thin Film Transistor) o MATRIZ ACTIVA, en este tipo de pantallas se incorpora una lámina extra de transistores conectados al panel de cristal líquido por lo que cada píxel está controlado de forma independiente eliminando los problemas de sombras y respuesta lenta de los DSTN y mejorando a un nivel muy elevado todas las variables, entre ellas el ángulo de visión. La tecnología LCD – TFT ha avanzado sustancialmente en los últimos años, actualmente podemos encontrar en el mercado diferentes tipos de pantallas TFT (Fig. 5) según su utilización: TFT – VA (Vertically-Aligned) que se utiliza en televisores, TFT – TN (Twisted Nematic) utilizadas en móviles y PDAs y por último las TFT – IPS (In Plane Switching) que se utilizan en la tecnología informática.

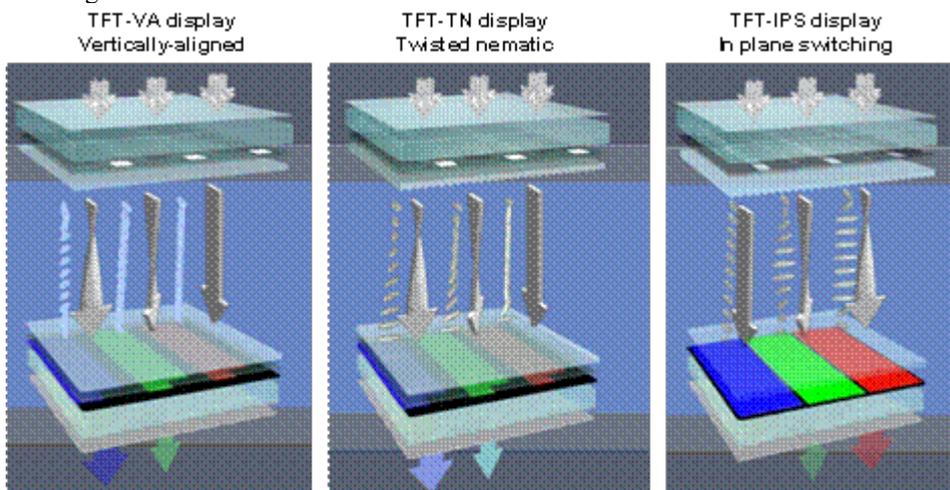


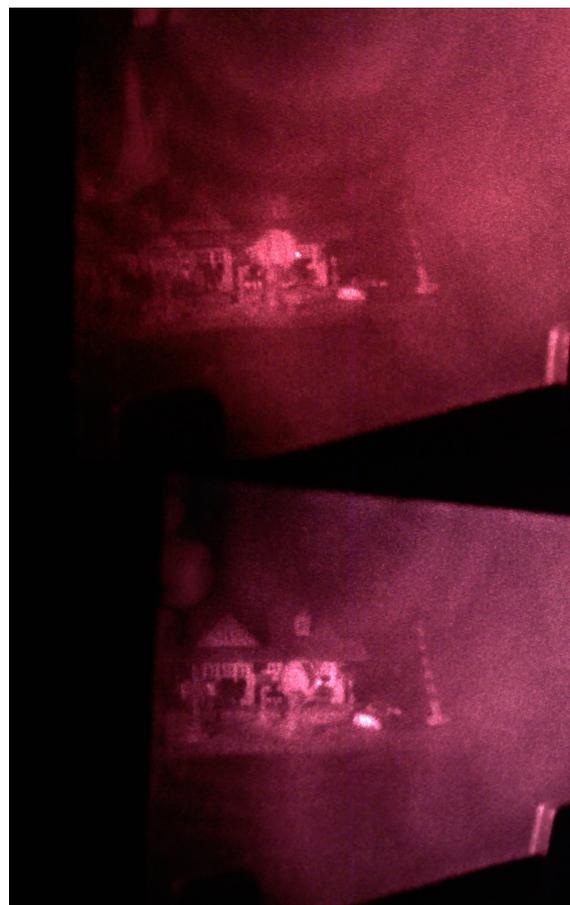
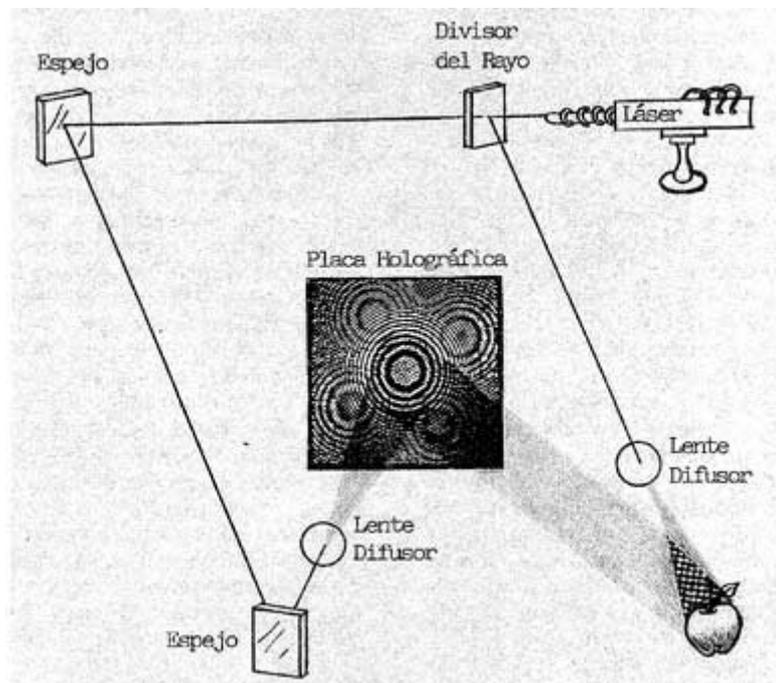
Figura 5. TECNOLOGÍA TFT

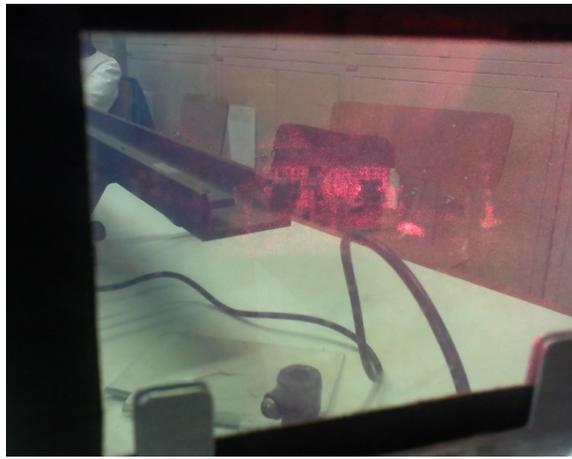
Las pantallas LCD – TFT proporcionan al usuario numerosas ventajas como son: menor tamaño (pantallas más delgadas), menor consumo o eliminación del parpadeo. Por ejemplo en un monitor CRT (Tubo de Rayos Catódicos) la imagen se crea mediante barridos horizontales y verticales en la pantalla de fósforo, la pantalla se refresca o re – dibuja un número de veces determinado por segundo, mientras que en el monitor LCD se aplica un campo eléctrico continuo y los píxeles se encienden o apagan de forma independiente. Esta diferencia de funcionamiento supone una reducción de problemas visuales ya que se elimina el parpadeo de las imágenes que causan sobre esfuerzo y fatiga en los ojos y sobre todo un aumento de la calidad de las imágenes, las pantallas poseen una superficie plana por lo que las distorsiones en los extremos se eliminan.

Holograma

El holograma es un registro que permite lograr el efecto de “una fotografía tridimensional”. Se lo realiza sin enfocar la luz incidente sobre la placa de registro, como sucede en la fotografía convencional. Para obtenerlo se requiere que una emulsión fotográfica(especial), sea iluminada simultáneamente por dos haces, separados a través de un espejo parcialmente reflector, de la luz proveniente de una misma fuente luminosa coherente (láser). Uno incide en forma directa, para ello se lo desvía a través de un par de espejos y luego se lo expande para que ilumine totalmente la placa holográfica. Con el segundo haz, luego de expandirse se ilumina un objeto tridimensional, en cuya superficie se generan reflexiones que son parcialmente interceptadas también por la placa holográfica. En la superposición de ambas señales se produce un diagrama de interferencias, quedando registrado el mismo en la emulsión fotográfica de la placa, creando un patrón microscópico que contiene toda la información tridimensional del objeto. Cuando se ilumina la placa luego del procesado(revelado, fijado, lavado y secado) de la misma, se obtiene una imagen “flotante en el espacio” que puede ser inspeccionada a su alrededor desde diferentes ángulos, apreciándose el novedoso efecto de cambiar la posición relativa de los detalles, dando la sensación de tridimensionalidad característica de los hologramas. Estos presentan a su vez otra curiosidad y es que, a partir de un fragmento de la placa es posible reproducir la imagen total del objeto, es decir el “todo” está entonces registrado en “cada parte”.

Por último, el registro holográfico aparece ante nuestros ojos como un esquema “caprichoso” de líneas oscuras de interferencia, que a simple vista no “parece” registrar ninguna “información”, hasta que es iluminado por un haz de luz coherente que rescata una imagen cambiante con la dirección de observación, “dando la sensación” tan llamativa de una imagen en las tres dimensiones.





Con la luz encendida se puede ver a través del holograma