

9 de marzo de 2003

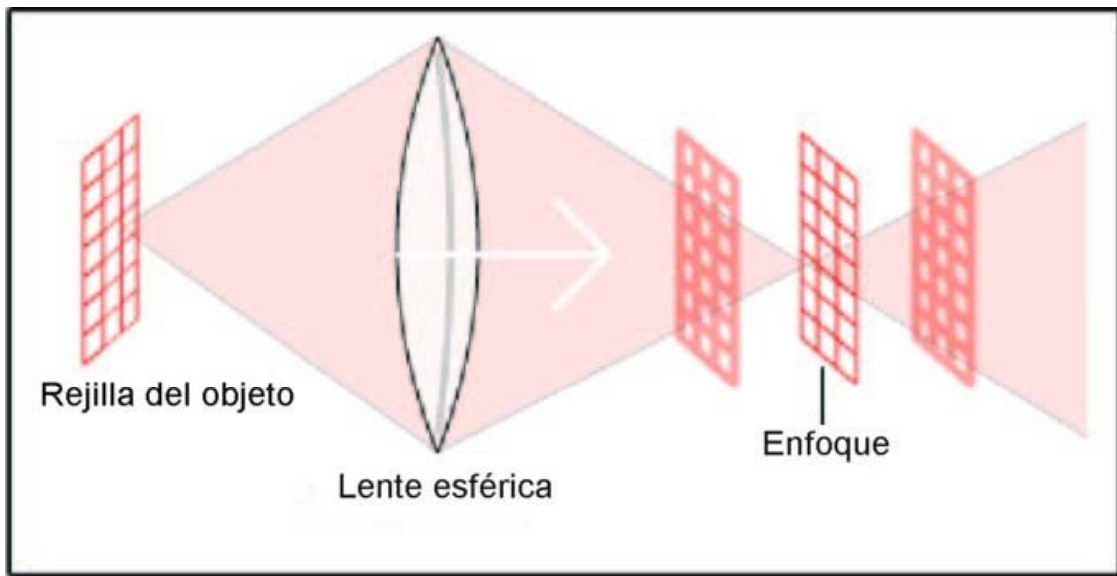
- [Introducción](#)
- [Lente esférica sin astigmatismo](#)
- [Lentes cilíndricas cruzadas con astigmatismo](#)
  - [Enfoque horizontal](#)
  - [Enfoque vertical](#)
  - [Plano de enfoque más nítido](#)
- [Implicaciones para los objetos en 3D](#)
- [¿Por qué se da el astigmatismo en holografía?](#)
  - [Hologramas en línea](#)
  - [Hologramas fuera de eje](#)
- [Notas](#)
  
- Véase también:
  - [Capítulo 10: holografía fuera de eje \(PDF\) \\*](#)
  - [Capítulo 10, apéndice: enfoque horizontal y enfoque vertical \(PDF\) \\*](#)
- [MAS450 modelo recortable de astigmatismo \(PDF\) \\*](#)

## Introducción

El astigmatismo es una aberración que se da cuando un sistema óptico enfoca dos ejes de luz ortogonales situados a distancias diferentes en el espacio. Los hologramas y los elementos ópticos holográficos producen astigmatismo de forma intencionada, o lo sufren de forma no intencionada. Sin embargo, para explicar las propiedades básicas del astigmatismo seleccionamos un modelo óptico más simple utilizando lentes esféricas y cilíndricas de refracción.

## Lentes esféricas sin astigmatismo

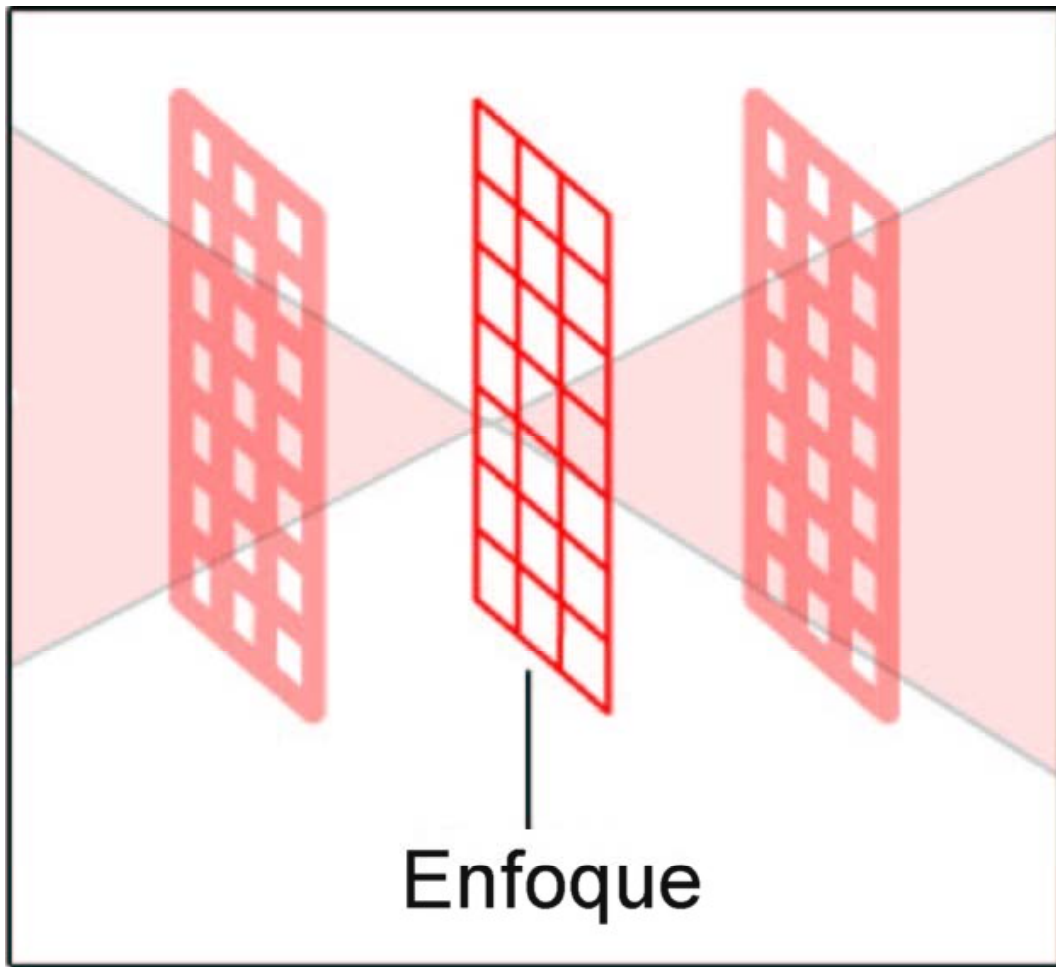
La versión ideal de la lente esférica común, como por ejemplo una lente de aumento típica, no muestra astigmatismo. La lente es simétrica en dirección vertical y horizontal (de hecho, lo es en todas las direcciones) y, por consiguiente, posee una potencia óptica que no varía dependiendo de si el ángulo con el que la luz golpea a la lente se encuentra en el plano vertical u horizontal. Respecto al enfoque, eso significa que la luz emitida desde un único punto en un objeto y capturada por diferentes partes de la lente, es redirigida por medio de la refracción de la lente y se une en único punto. El siguiente diagrama muestra este proceso de enfoque simétrico de forma esquemática.



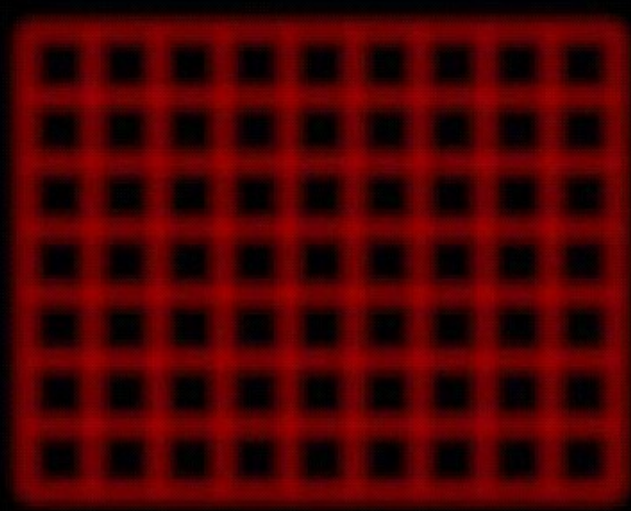

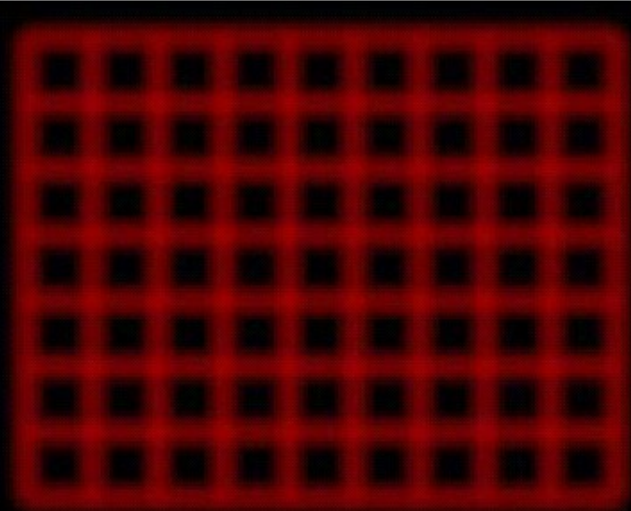
En la imagen, la luz emitida desde una rejilla de líneas horizontales y verticales se enfoca por medio de una lente esférica convexa. La luz proveniente de todos los puntos en la rejilla se enfoca hacia un punto correspondiente situado en el *plano focal*. Si se ubica la rejilla detrás de la lente a una distancia del doble de la distancia focal de la lente, la imagen nítida y enfocada de la rejilla aparecerá a la misma distancia delante de la lente.

(Nota: con esta geometría, parecerá que la imagen de la rejilla tiene el mismo tamaño que la de la rejilla del objeto original. Para los objetivos de esta discusión, ignoraremos las diferencias en tamaño y aumento a la hora de observar imágenes enfocadas, puesto que esas cuestiones son ortogonales a la comprensión del astigmatismo).

Si quisiéramos colocar una cartulina o pantalla blanca en las posiciones indicadas en el diagrama, podríamos observar la luz que proviene de la lente tal y como aparece en otras distancias y en el enfoque. A continuación, se muestra un primer plano del diagrama anterior en el que se puede observar lo que ocurre de forma conceptual, si no literal.



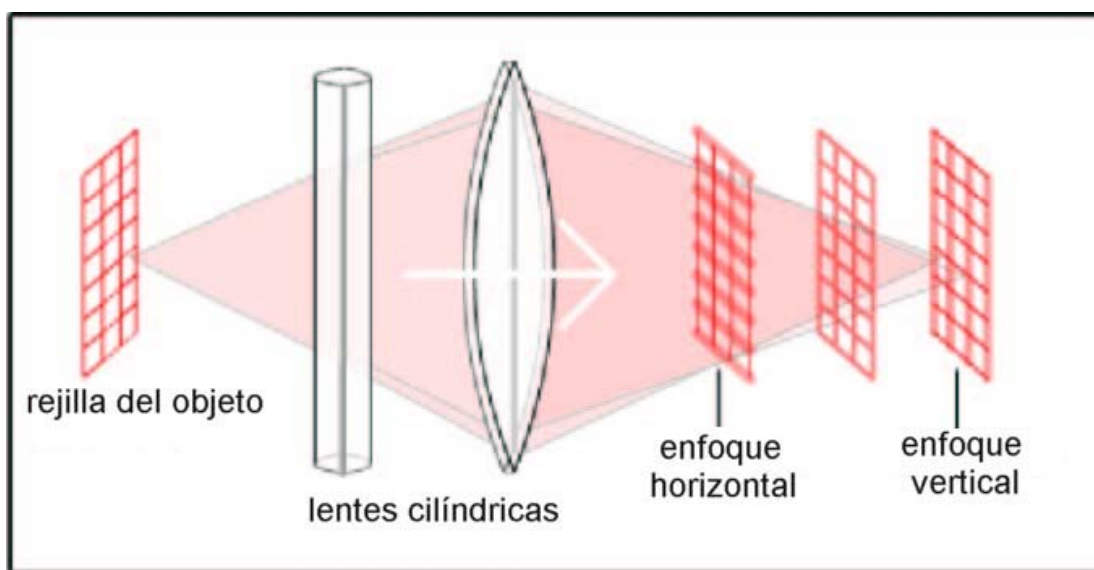
En las posiciones de delante o detrás del plano focal, la luz proveniente de cada punto en la rejilla del objeto brilla sobre un área superior a un punto simple: o bien la luz no ha convergido completamente todavía, o bien ya ha vuelto a convergir después del enfoque. Ese patrón que vemos sobre la cartulina o la pantalla lo denominamos “borrosidad”.

Posición	Imagen
<p>Entre la lente y el plano focal aparece una imagen borrosa. (Esta imagen y todas las demás que aparecen en esta página son efectos ópticos simulados, no son reales). La imagen es relativamente oscura puesto que la energía que se hubiera enfocado abajo de una rejilla es, en su lugar, dispersada sobre un área mayor.</p>	
<p>La imagen nítida de la rejilla es proyectada en el plano focal.</p>	
<p>La imagen borrosa también es proyectada más allá del plano focal. (Recuerde que solamente estamos simulando el enfoque de la imagen y no su tamaño relativo. Si tuviésemos en cuenta el aumento de la lente, esta imagen sería mayor que la del plano focal).</p>	

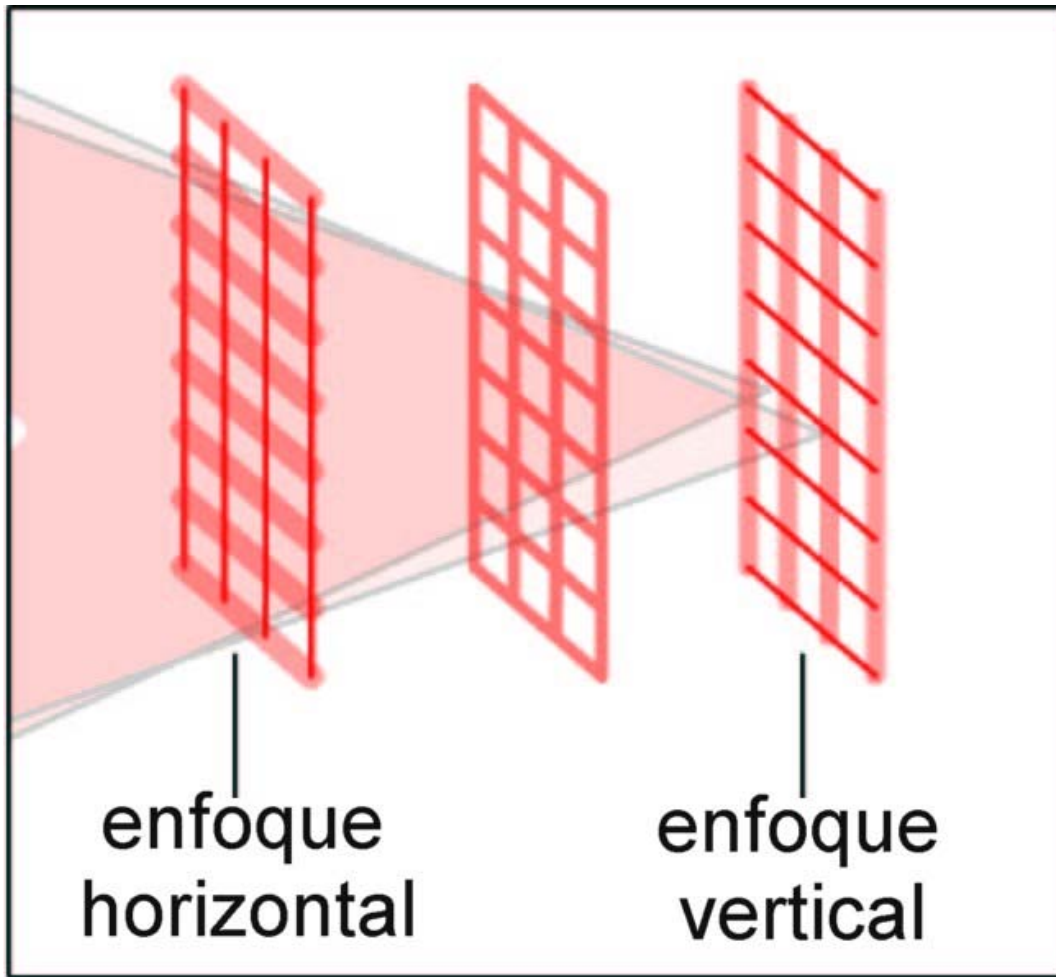
## Lentes cilíndricas cruzadas con astigmatismo

A diferencia de una lente radicalmente simétrica, como una lente de aumento, una lente cilíndrica concentra la luz (es decir, posee potencia óptica) solamente en un eje. Una barra de cristal o un vaso de agua con forma cilíndrica actúan como aproximaciones a lentes cilíndricas ideales. Dado que una lente cilíndrica tiene únicamente la habilidad de hacer que la luz converja de nuevo desde un objeto a su enfoque en una dirección, la luz que va en la otra dirección no está enfocada: está borrosa, como si allí no hubiese una lente. Con un objeto de fuente, como es una rejilla (asumiendo que uno de los ejes de la rejilla esté alineado con la orientación de la lente cilíndrica), dicha lente enfocará solamente una orientación de línea, ya sea vertical u horizontal.

Si utilizamos dos lentes cilíndricas cruzadas (es decir, una orientada de forma ortogonal a la otra, en nuestro ejemplo, de forma horizontal y vertical), podemos enfocar la luz de las dos orientaciones hacia *alguna* posición, pero digamos que las posiciones de enfoque de las líneas verticales serán, en general, diferentes a las de las líneas horizontales. El punto exacto en el que la lente enfoca la luz depende de sus posiciones relativas y de sus potencias ópticas por separado. En el siguiente diagrama se muestra esta geometría óptica.

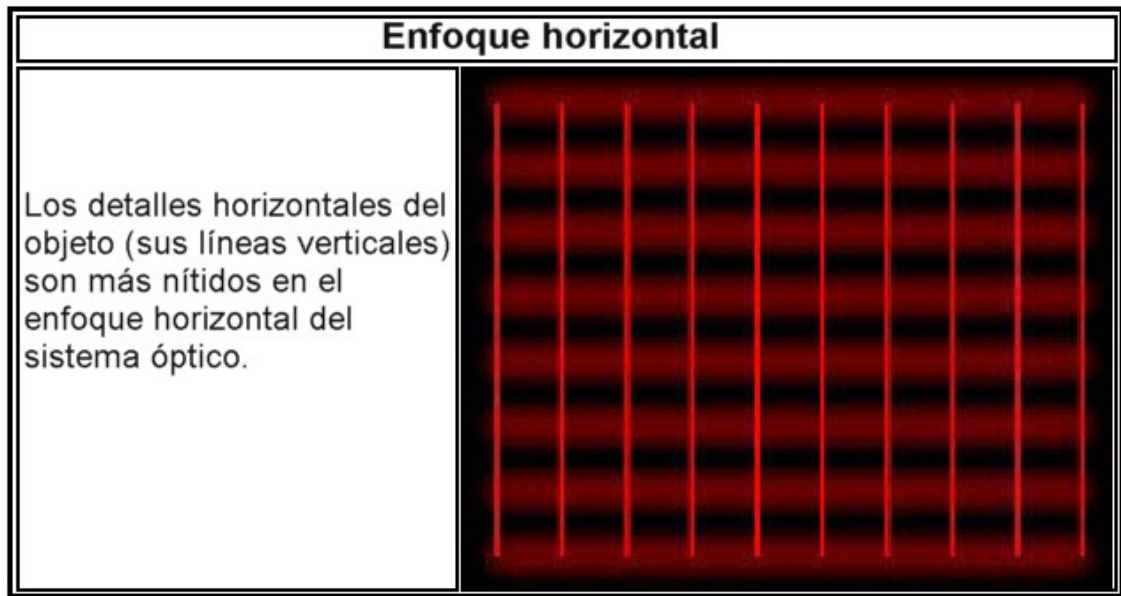


La lente más cercana al objeto es una lente con una forma aproximada a la de un tubo vertical. Esta lente concentra la luz únicamente en la dirección horizontal (dentro o fuera del plano de este diagrama). Verticalmente, la luz proveniente de cada punto en la rejilla del objeto continua su expansión. La segunda lente cilíndrica está orientada de tal forma que concentra la luz únicamente en el eje vertical. Dado que las lentes están offset y poseen potencias diferentes, los enfoques horizontal y vertical caen en planos diferentes en el espacio. A continuación, se muestra un primer plano conceptual del área de alrededor de los enfoques:



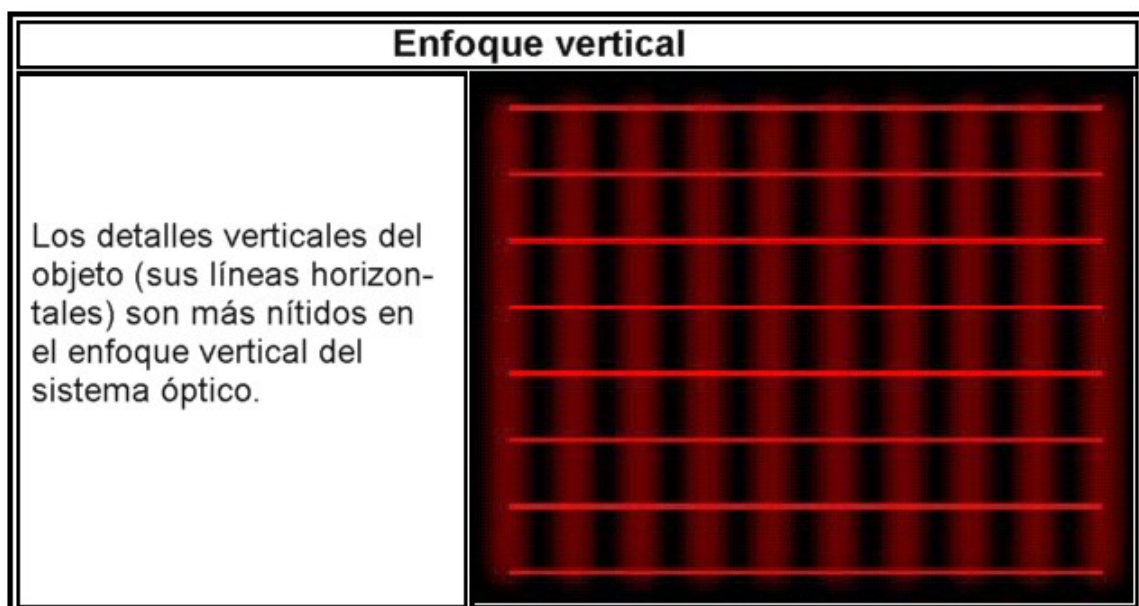
## Enfoque horizontal

En el enfoque de la primera lente vertical cilíndrica, las líneas verticales de la rejilla aparecen nítidas. Las líneas horizontales aparecen borrosas, puesto que todavía no han convergido completamente en esa profundidad. Las líneas verticales representan el detalle horizontal del objeto. La posición en la que se enfoca este *detalle horizontal* se denomina *enfoco horizontal* del sistema óptico. En sistemas de formación de imágenes tridimensionales, como por ejemplo los hologramas de exhibición, el detalle horizontal (las líneas verticales) proporciona al cerebro humano información que sus mecanismos de análisis de imagen estereoscópica pueden utilizar para extraer profundidad. Por esta razón, en ocasiones nos referimos al enfoque horizontal como *foco de paralaje*.



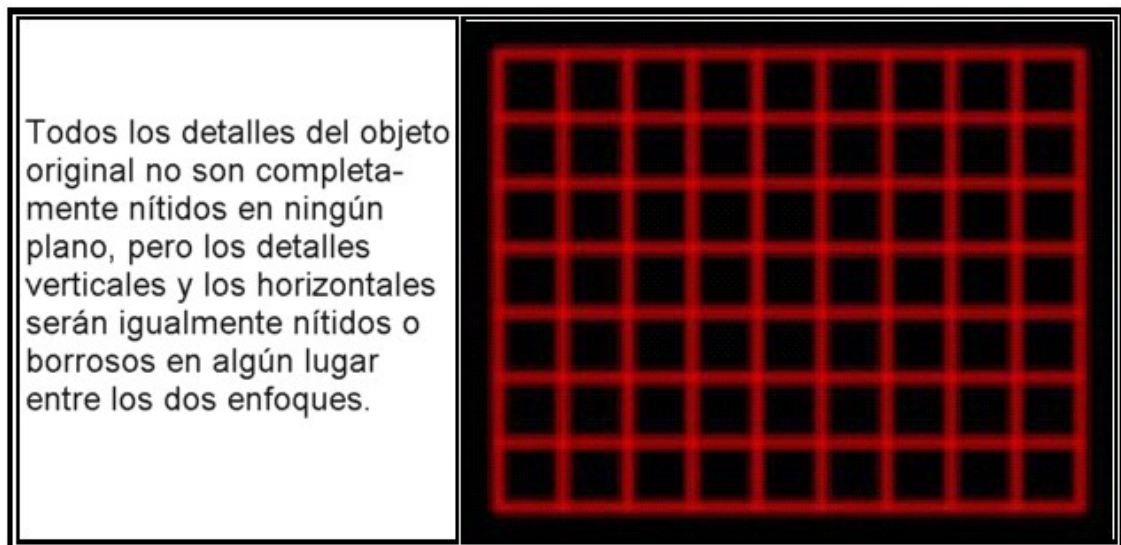
## Enfoque vertical

De forma similar, el *enfoque vertical* es la posición en la que el detalle vertical (las líneas horizontales) aparece nítido. En el plano del enfoque vertical, los rayos de luz que convergieron en el enfoque horizontal ya están divergiendo y aparecen borrosos. En la holografía de luz blanca fuera de eje, el enfoque vertical es importante para determinar dónde se enfocan imágenes de colores diferentes. Dado que los hologramas se iluminan generalmente de arriba a abajo, la dispersión cromática (borrosidad de color) provocada por la difracción tiene lugar principalmente en dirección vertical. Las líneas horizontales son más vulnerables a esta borrosidad de color porque cada longitud de onda se enfoca hacia un enfoque vertical diferente. Por esta razón, en ocasiones, los hológrafos denominan al enfoque vertical *enfoque de color*.



## Plano de enfoque más nítido

La nitidez de los detalles de un objeto varía continuamente a través del espacio en el sistema óptico astigmático y también en el esférico. Puesto que los enfoques vertical y horizontal se encuentran en dos posiciones diferentes, no existe ninguna posición en el espacio en la que todos los detalles verticales y horizontales sean completamente nítidos. Sin embargo, en algún lugar entre los planos focales vertical y horizontal, la cantidad de borrosidad horizontal y vertical será la misma. En ocasiones, la posición se conoce como plano de enfoque más nítido.



## Implicaciones para objetos tridimensionales

El objeto de rejilla fue seleccionado para los ejemplos que se han citado anteriormente, debido a que tiene detalles horizontales y verticales intensos y reconocibles y, además, porque era bidimensional. En general, en holografía, nuestro interés radica en la creación de imágenes bidimensionales y tridimensionales de objetos. Las lentes (y sus equivalentes holográficos) siguen funcionando de la misma forma para los objetos tridimensionales: las líneas horizontales y verticales en el caso de un objeto tridimensional se enfocan en el espacio que se encuentra más allá de la lente. Sin embargo, en el caso astigmático, las líneas horizontales y verticales son desplazadas longitudinalmente las unas de las otras por una distancia proporcional al astigmatismo del sistema óptico.

Sin embargo, nada previene la superposición del detalle vertical de una parte por el detalle horizontal de otra. El astigmatismo simplemente afirma que el detalle horizontal y vertical proveniente de la *misma* parte del objeto no caerá en el mismo plano. En ocasiones, esta superposición de diferentes enfoques de las diferentes

partes de un objeto puede hacer que el análisis visual de una imagen astigmática proyectada sea difícil y confuso.

## ¿Por qué tiene lugar el astigmatismo en holografía?

Esta pregunta tiene difícil respuesta en una moda de carácter intuitivo y no analítico. Comencemos por calificar nuestra respuesta considerando los hologramas en línea y los hologramas fuera de eje por separado.

### Hologramas en línea

Generalmente, los hologramas en línea, en los que las fuentes de referencia del objeto y de iluminación se encuentran ubicados en una línea que es perpendicular a la placa holográfica, no padecen de ningún tipo de astigmatismo. No se da ninguna asimetría entre los ejes horizontal y vertical del holograma. Si no podemos distinguir visualmente entre el montaje óptico que se ve desde el lateral o desde arriba, no hay forma de que el holograma sepa la diferencia. El patrón que se ha formado, una placa de área circular, no tiene ninguna orientación rotacional preferente. Aún más, cualquier cambio en la distancia de iluminación modificará de la misma forma las direcciones horizontal y vertical del rayo. Incluso un cambio en la longitud de onda solamente meterá o sacará un poco el punto enfocado, manteniéndolo simétrico con el centro del patrón de zona de Gabor de la placa.

En resumen, no hay forma de distinguir los ejes verticales de los horizontales.

(Aparte de esto, los hologramas en línea *pueden* padecer aberraciones, como por ejemplo, la aberración esférica. La distorsión resulta ser simétrica como el patrón de zona de la placa).

### Hologramas fuera de eje

Los hologramas fuera de eje son vulnerables al astigmatismo, pero normalmente sólo cuando tiene lugar un cambio entre la exposición y la iluminación. Si el holograma se ilumina desde la misma posición que la fuente de referencia, la longitud de onda de la iluminación coincide con la exposición y la placa y la emulsión no quedan afectadas de forma extraña. La imagen de orden  $m = 1$  aparecerá en la posición del objeto vertical, tanto horizontalmente como verticalmente (no hay astigmatismo). El astigmatismo puede ocurrir si cambia cualquiera de estos parámetros.

A continuación, se expone una idea básica de por qué tiene lugar el astigmatismo en la holografía fuera de eje. El gran offset angular de las fuentes de referencia y del objeto produce un frecuencia espacial elevada en la placa en la dirección vertical, pero una mucho más pequeña horizontalmente a lo largo de ésta. Además, el patrón básico de las frecuencias espaciales es lateralmente simétrico (ya que el objeto está normalmente centrado horizontalmente respecto a la placa), pero verticalmente asimétrico (la parte superior de la placa puede estar a un ángulo diferente al de la fuente de iluminación o de referencia que el de la parte inferior).

Incluso peor, generalmente, los cambios entre la iluminación de la exposición son más significativos en la dirección vertical que en la horizontal. Para compensar un cambio en la longitud de onda, por ejemplo, podemos variar el ángulo de referencia de iluminación. Ese cambio no altera el componente horizontal de las direcciones de la luz del rayo, golpeando la placa en gran medida, pero los componentes verticales de todos los rayos cambian. Los cambios en la longitud de onda resultan también en cambios asimétricos en el enfoque: aunque es posible minimizar el astigmatismo para una longitud de onda en holografía fuera de eje, no es posible eliminarla en todas las longitudes de onda. Lo mejor que se puede hacer es predecir los efectos del astigmatismo y diseñar nuestros montajes ópticos para minimizar sus consecuencias perjudiciales.

## Notas

- Las imágenes son simuladas, no capturadas de forma óptica. Las intensidades no son literales en relación con lo que ve, pero transmiten la idea básica de borrosidad y enfoque.
- En las imágenes y en los diagramas se ignora el aumento de las imágenes basado en la distancia de la lente y en los cambios de intensidad que la acompañan.
- Las regiones de los diagramas esquemáticos que muestran el paso de la luz de la rejilla de un objeto a través de la lente y enfocando hacia abajo, así como las imágenes desenfocadas, son esquemáticas y no literales. En particular, la borrosidad en los planos desenfocados que se muestra en los dibujos sería mucho más aguda que la indicada en los diagramas.

.....

\*Rogamos vuelva a consultar la sección CMS de lecturas.