

HOLOGRAFIA CON LASER: EL HOLOGRAMA (II) (*)

Por MANUEL ELICES CALAFAT

Dr. Ing. de Caminos: Lic. en Físicas.

Laboratorio Central del Centro de Estudios y Experimentación de O. P.

El presente artículo es continuación del publicado en nuestro número anterior bajo el mismo epígrafe.

Introducción.

Desde que se inventó la fotografía, hace más de cien años, se han ido mejorando las técnicas para formar imágenes más perfectas y se han descubierto nuevos materiales fotográficos, pero el fundamento óptico de la fotografía apenas ha cambiado. Esencialmente, el proceso consiste en recoger la luz reflejada por un objeto tridimensional y enfocarlo sobre una superficie sensible para obtener una imagen bidimensional. Aunque el procedimiento para formar la imagen haya evolucionado desde una caja con un pequeño agujero hasta un complejo sistema de lentes, para cuyo cálculo debe recurrirse a ordenadores, el principio es el mismo.

Como es sabido, las ondas luminosas reflejadas por la superficie de un objeto contienen toda la información sobre la forma y brillo de la superficie, en función de las distribuciones de amplitud y fase de sus frentes de onda (Born y Wolf, cap. VIII). La placa fotográfica, sin embargo, solamente es capaz de detectar la distribución de la intensidad, pero no de la fase. Este inconveniente se ha superado con un nuevo procedimiento para registrar imágenes, llamado holografía (registro total), donde, además de la amplitud, se detecta simultáneamente la fase (Gabor, 1966; Born y Wolf, 8,10). En esencia el procedimiento consiste en lo siguiente: La onda reflejada por el objeto se hace interferir con un haz coherente procedente de un laser, y esta figura de interferencia se registra en una placa fotográfica (holograma). En esta fotografía solamente se ven una serie de franjas cuyo contraste es una medida de la amplitud y cuya separación es una medida de la fase. Cuando este

holograma se ilumina con un haz coherente, idéntico al de referencia, la luz difractada tendrá la misma distribución de amplitud y fase que el haz original procedente del objeto. Este frente de onda reconstruido es *indistinguible* del original y puede producir todos los fenómenos de que sería capaz el haz primitivo.

Este procedimiento fue descubierto en 1947 por D. Gabor (Gabor, 1948; 1949, 1951), al tratar de mejorar las imágenes obtenidas en microscopía electrónica, pero debido a la escasa coherencia de las fuentes luminosas disponibles el descubrimiento no resultó práctico. Recientemente, en 1963, gracias a la gran coherencia de la luz producida por el laser y con unas modificaciones de la técnica holográfica original, E. N. Leith y J. Upatnieks (Leith, 1962; 1964, 1965, 1966) consiguieron, por primera vez, hologramas que permitieron reproducir imágenes tridimensionales con una gran nitidez. Es interesante resaltar que estos científicos iniciaron sus investigaciones preocupados por problemas en la formación de imágenes por radar. Una vez más, el contacto entre campos distintos ha resultado provechoso.

Fundamento de la holografía.

Como acabamos de indicar, basta con poder reconstruir un frente de onda idéntico a un frente de onda emitido por el objeto para tener la misma impresión óptica. El proceso consta de dos partes: el registro de la información contenida en el frente de onda y la reproducción del frente de onda. Esta reproducción reconstruye en el espacio una onda idéntica a la emanada por el objeto y un observador situado en cualquier punto dentro del haz verá la misma

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a esta Redacción hasta el día 28 de febrero de 1970.

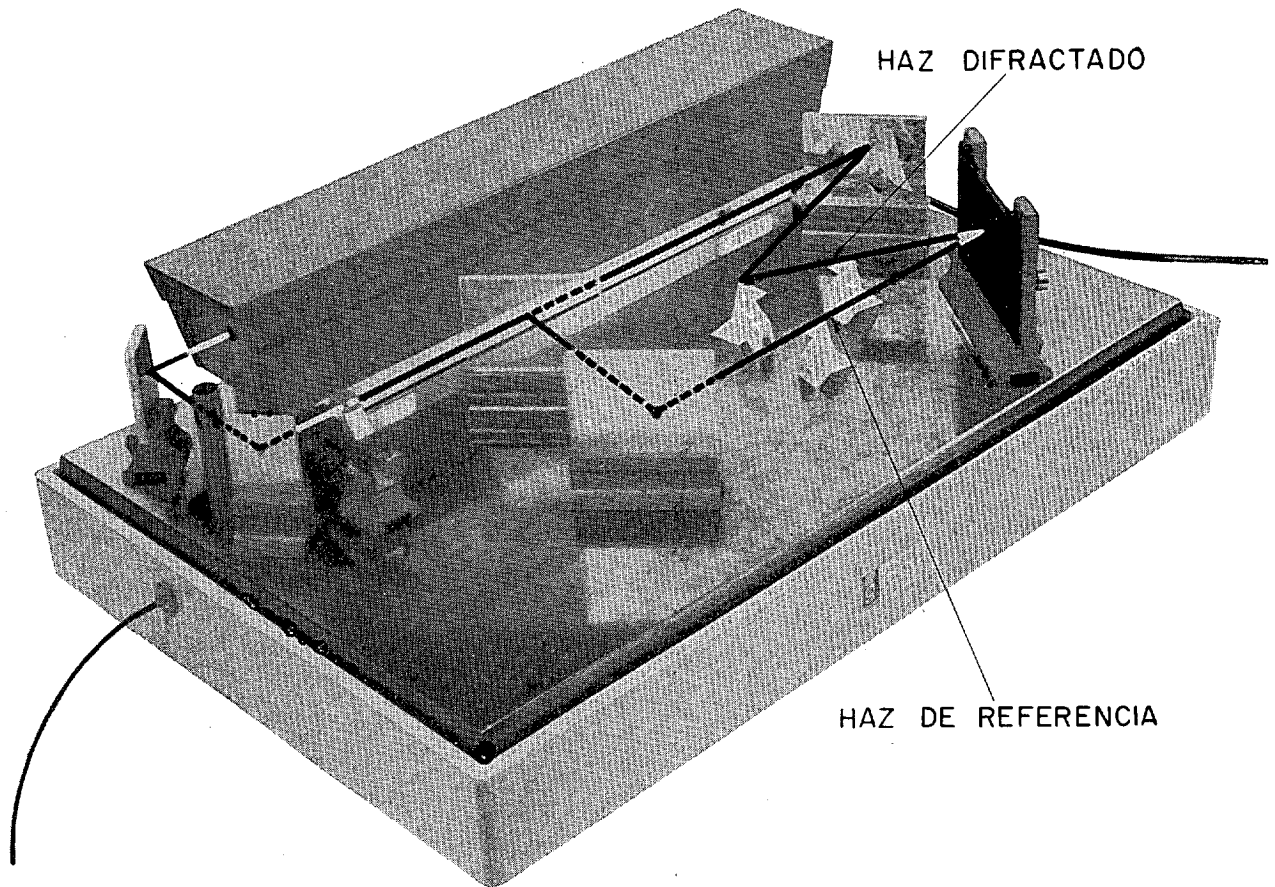


Fig. 1. — Montaje holográfico. El soporte es antivibratorio. (Equipo adquirido por la Escuela de Ingenieros de Caminos para el laboratorio de Física.)

imagen que vería si estuviera el objeto real. Para la visión binocular, como este resultado es válido para cada ojo, el relieve queda totalmente restablecido.

A) *Registro.* (Véase fig. 1 y fig. 2, a.)

Parte de un rayo de luz, emitido por un laser, incide sobre el objeto y se produce una onda difractada de amplitud A_0 . La otra parte del rayo, que llamaremos haz de referencia, de amplitud A_r se hace interferir con A_0 , y la figura producida es el holograma, que se registra en la placa fotográfica.

La distribución de la luz del haz difractado, al incidir sobre la placa, viene dada por:

$$A_0 = a_0(x, y) \cos[\omega t + \varphi_0(x, y)]$$

donde a_0 y φ_0 son, respectivamente, las funciones que caracterizan la distribución de la amplitud y fase. Toda la información relativa al ob-

jeto está contenida en estas dos funciones. En una fotografía ordinaria solamente aparece la información relativa a la amplitud. En efecto, la intensidad es proporcional al valor medio del cuadrado de la amplitud:

$$I \sim \langle A_0^2 \rangle = a_0^2(x, y) / 2$$

como se ve, la función $\varphi_0(x, y)$ no aparece en esta expresión.

La distribución de la luz del haz de referencia, al incidir sobre la placa, vendrá dada por:

$$A_r = a_r \cos(\omega t - \alpha x)$$

donde a_r puede considerarse prácticamente constante, y αx indica la variación de fase en el plano.

Cuando los dos haces interfieren la amplitud resultante vendrá dada por:

$$A_0 + A_r = a_0(x, y) \cos[\omega t + \varphi_0(x, y)] + a_r \cos(\omega t - \alpha x)$$

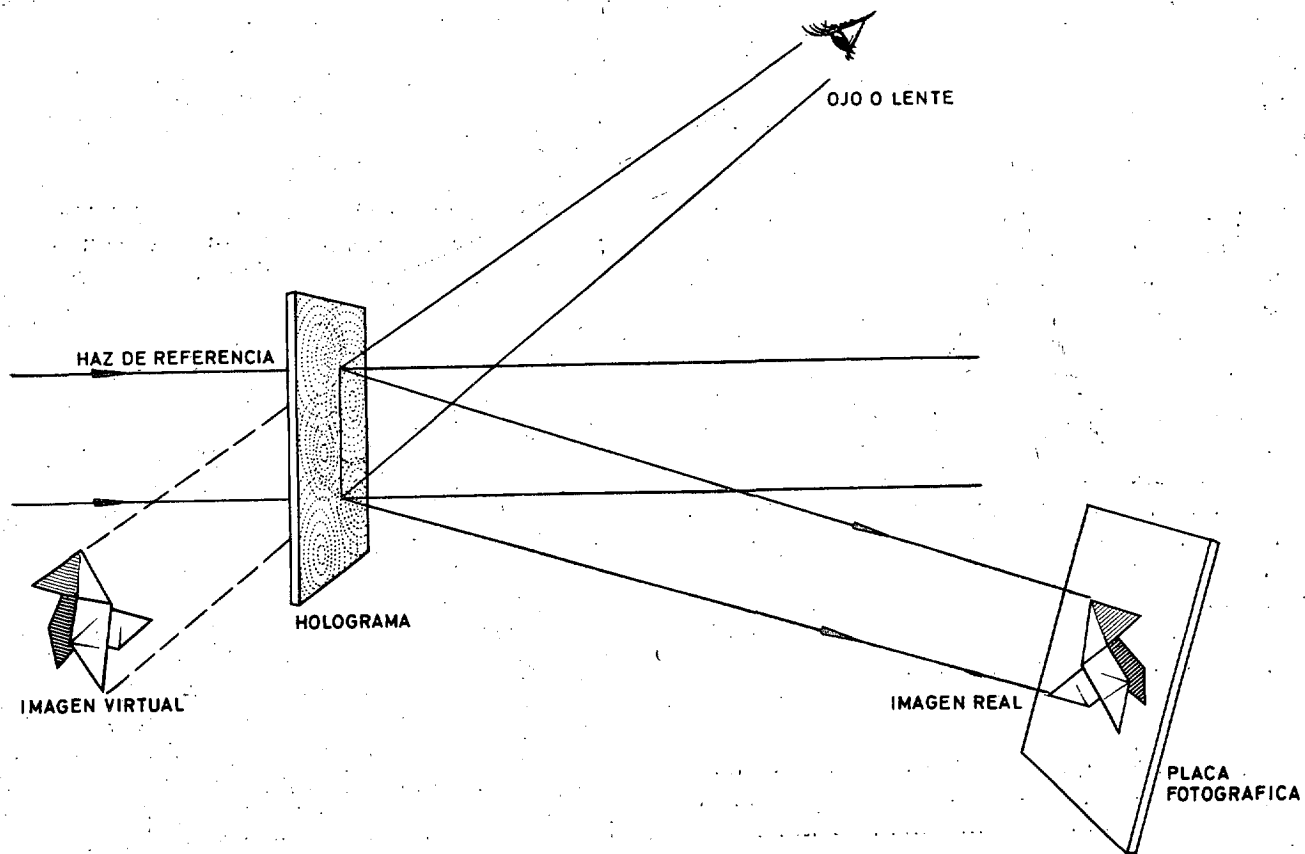
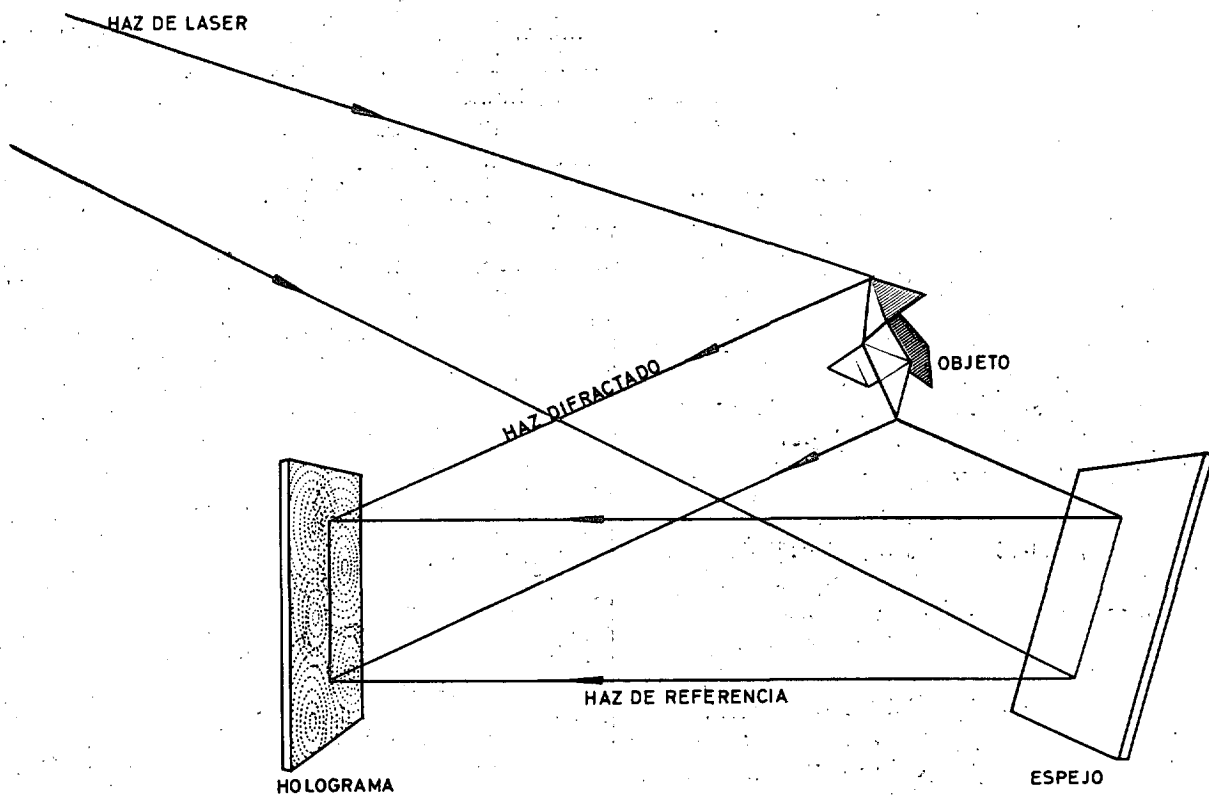


Fig. 2. — a) Formación de un holograma. b) Reconstrucción del holograma.

y el valor medio de la intensidad:

$$I \sim \langle (A_0 + A_r)^2 \rangle = \\ = \alpha_0^2(x, y) / 2 + \alpha_r^2 / 2 + \alpha_r \alpha_0(x, y) \cos[\varphi_0(x, y) + \alpha x]$$

El ennegrecimiento de la placa es función de tres términos. Normalmente la relación de intensidades entre el haz difractado y el de referencia es de 1 a 10, por lo que el primer término puede despreciarse frente a los otros dos. El segundo término es prácticamente constante y el tercer término es el importante, porque contiene las funciones $\alpha_0(x, y)$ y $\varphi_0(x, y)$. Con un tiempo correcto de exposición, el valor de la transparencia de la placa fotográfica vendrá dada por:

$$T = A + 2B \alpha_r \alpha_0(x, y) \cos[\varphi_0(x, y) + \alpha x]$$

B) *Reproducción del frente de onda.* (Véase figura 2, b.)

Iluminando el holograma con un haz idéntico al de referencia, pero propagándose en sentido contrario, $A'_r = \alpha_r \cos(\omega t + \alpha x)$, obtendremos una onda transmitida dada por:

$$A_t = T A_r = A \alpha_r \cos(\omega t + \alpha x) + \\ + B \alpha_r^2 \alpha_0(x, y) \cos[\omega t + \varphi_0(x, y) + 2\alpha x] + \\ + B \alpha_r^2 \alpha_0(x, y) \cos[\omega t - \varphi_0(x, y)]$$

El primer término representa a la onda incidente, atenuada.

El segundo término, excepto el factor de proporcionalidad $B \alpha_r^2$, representa un frente de onda igual al frente de onda emitida por el objeto. Si se mira a través del holograma se tendrá la misma impresión que en presencia del objeto, se verá una imagen tridimensional. Esta imagen será virtual porque se forma detrás de la placa. El término $2\alpha x$ que no aparece en la A_0 , indica solamente un desplazamiento angular de la imagen.

El tercer término, excepto el factor de proporcionalidad, es análogo al del frente de onda difundido por el objeto. La diferencia estriba en que la fase está cambiada de signo, lo cual significa que se formará una imagen conjugada y, por lo tanto, el frente de onda reproducirá una imagen real.

Para reproducir un holograma hacen falta varios requisitos. Ya hemos comentado la falta de éxito de los primeros hologramas debido a la escasa longitud de coherencia de la luz dis-

ponible. Las fuentes de luz usadas en la holografía deben tener una longitud de coherencia, por lo menos, igual a la máxima diferencia de caminos luminosos entre el haz del objeto y el haz de referencia. Esta condición se cumple, en general, usando un haz de luz producido por un laser.

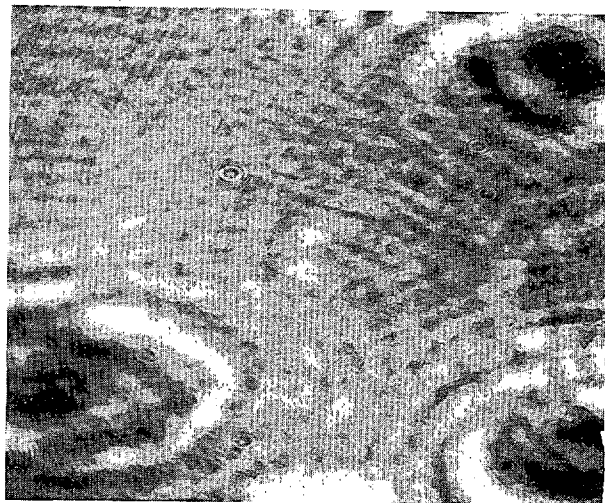


Fig. 3. — Holograma obtenido con el equipo de la figura 1. Las estructuras que se observan en el holograma son figuras de difracción producidas por partículas de polvo. Las dos pajaritas son irreconocibles.

La placa fotográfica también debe ser especial, ya que debe ser capaz de registrar fenómenos de las dimensiones de la longitud de onda utilizada para que puedan apreciarse los detalles. Únicamente permiten esta definición placas de muy poca sensibilidad (de 0,25 a 0,5 ASA), que exigen exposiciones prolongadas.

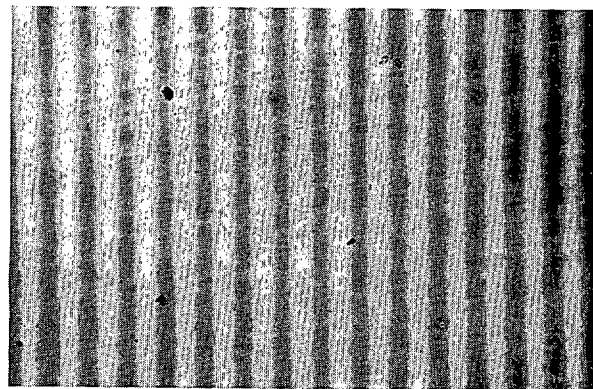


Fig. 4. — Porción del holograma de la figura 3 vista al microscopio. El contraste y la separación de las franjas permiten recuperar las variaciones de amplitud y de fase del frente de onda, que en este caso es, prácticamente, una onda plana.

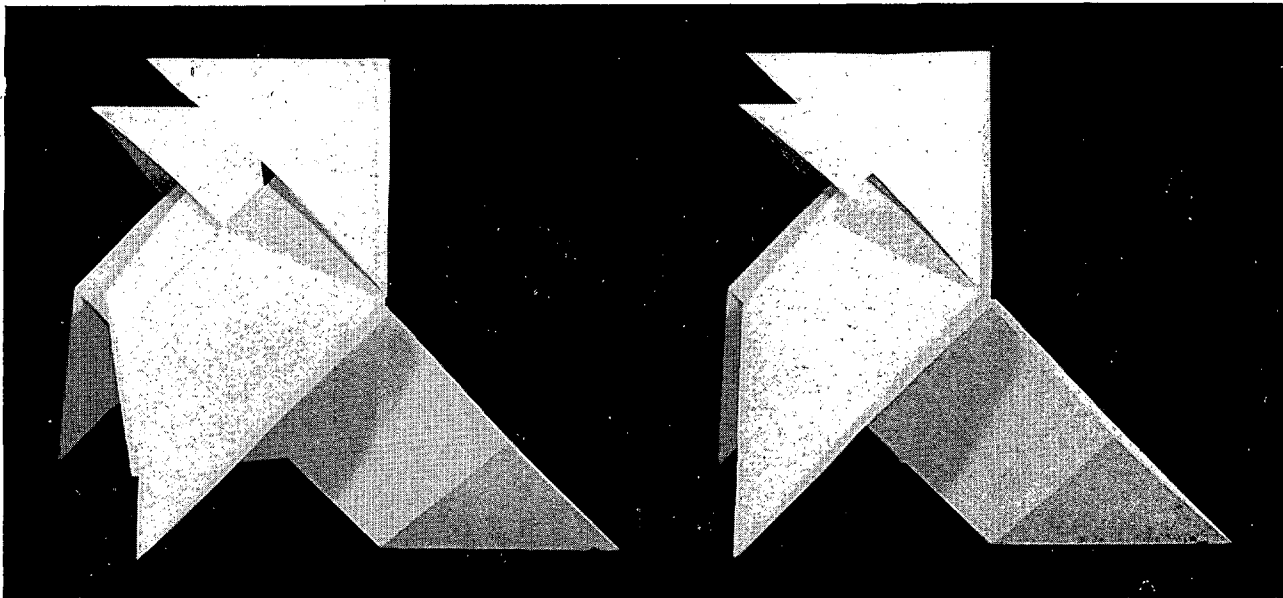


Fig. 5. — Efecto de paralaje que se obtiene al observar la misma imagen producida por el holograma desde dos puntos de vista.

Para que el registro sea posible, es preciso que el desfase entre la onda difundida y la onda de referencia permanezca constante en cada punto de la placa durante la exposición. Ello obliga a que el conjunto placa-objeto no admita, durante este tiempo, un movimiento relativo del orden de la longitud de onda utilizada. Los montajes deberán ser rígidos y antivibratorios. En determinadas circunstancias el objeto no puede permanecer quieto —por ejemplo, un proyectil, e incluso un organismo vivo—, en estos casos es imposible hacer un holograma con un laser continuo. Sin embargo, pueden obtenerse hologramas con menos profundidad de campo usando tiempos de exposición más cortos y fuentes luminosas más intensas procedentes de lasers pulsantes (F. Wuerker, 1965).

Propiedades de los hologramas.

Al observar un holograma con luz ordinaria da la sensación de una placa más o menos velada y es imposible obtener ninguna pista de la imagen que está codificada dentro de él (figura 3). A veces se observan figuras jaspeadas o anillos concéntricos; estas estructuras no tienen nada que ver con el holograma, son figuras de difracción producidas por partículas de polvo o defectos en los espejos. La verdadera in-

formación embebida en la placa fotográfica sólo puede verse con un microscopio y está formada por franjas irregulares que aparentemente no guardan ninguna relación con el objeto (fig. 4). Solamente cuando el holograma se sitúa dentro de un haz de luz coherente se revela la imagen.

La característica más llamativa de una imagen producida por un holograma es su naturaleza tridimensional. Mirando a través del holograma desde distintos puntos de vista, se ven distintas perspectivas del objeto reconstruido (figura 5). Este efecto de paralaje no se puede obtener con un par de fotografías estereoscópicas convencionales. Incluso, cuando se observan sucesivamente planos situados a distintas profundidades, es preciso ir enfocando la vista cada vez. Las únicas limitaciones que tenemos para explorar la imagen son: el tamaño del holograma y la iluminación que pudimos dar al objeto durante la construcción del mismo.

A diferencia de la fotografía ordinaria, en la holografía no se usa ninguna clase de lentes. Cada punto del objeto refleja luz a toda la placa fotográfica, y viceversa; cada punto de la placa recibe luz procedente de todo el objeto. Por consiguiente, cada parte del holograma, aunque sea pequeña, puede reproducir toda la imagen. Si un holograma se rompe en pequeños fragmentos, cada uno de ellos sirve para volver

a reconstruir una vista ligeramente distinta de la imagen. Sin embargo, la resolución se irá perdiendo a medida que los pedazos vayan siendo menores.

Otra propiedad extraña de los hologramas es que no necesitan positivarse. Tanto el holograma directo como el "positivo" (si quisiera hacerse) reconstruirían la misma imagen, igual que un "positivo" de una red de difracción, forma el mismo espectro que la red original. Ello es debido a que la información contenida en la red, o en el holograma, sólo es función del contraste entre las franjas y del espaciado de las mismas. Ninguna de estas dos variables se altera al positivar.

Por último, añadiremos que para reconstruir un holograma no es preciso un haz de la misma longitud de onda que la usada para construirlo. Con un haz coherente de distinta longitud de onda obtendremos una imagen análoga, pero con un aumento angular proporcional a la relación de longitudes de onda.

mente cada imagen puede reconstruirse por separado.

Hasta ahora, hemos supuesto que el holograma era bidimensional; en realidad, cuando los detalles son muy finos se produce un holograma tridimensional, ya que las figuras de interferencia varían dentro del espesor de la placa. En este caso, solamente se puede reconstruir el frente de onda si el haz de referencia tiene la misma longitud de onda, dirección y curvatura que el original, ya que, en esencia, se produce el mismo fenómeno de difracción Bragg, como cuando se ilumina un cristal con rayos X. Ahora la posibilidad de almacenar imágenes sin que se interfirieran es todavía mucho mayor. Este registro tridimensional es análogo al de las emulsiones usadas por Lippmann, en 1881, en sus experiencias de fotografía en color. Siguiendo estos procedimientos G. W. Stroke y A. E. Labeyrie han demostrado que se pueden hacer hologramas en color, usando emulsiones

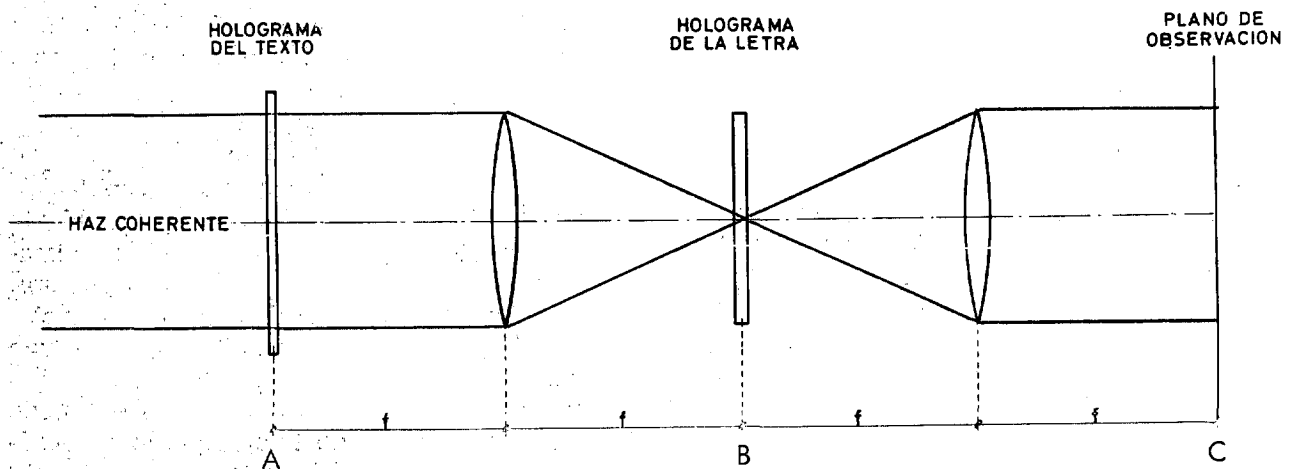


Fig. 6. — Esquema del montaje holográfico para el reconocimiento de siluetas.

Aplicaciones de la holografía.

Además de la obtención de imágenes tridimensionales, la holografía puede prestar un gran servicio a la ciencia y a la ingeniería. Las aplicaciones pueden clasificarse en tres grupos:

A) Aplicaciones basadas en la gran capacidad de información de un holograma.

Una placa holográfica puede archivar más de una imagen con tal de que se usen haces de referencia con distintas direcciones. Posterior-

fotográficas gruesas y tres lasers de distintos colores. (Lin; 1966, 1967).

Mediante un montaje algo distinto al descrito se obtienen unos hologramas llamados de Fourier. Aunque nos llevaría demasiado espacio describir su fundamento (Stroke, 1965), vale la pena esbozar una de sus aplicaciones. Este tipo de holograma es especialmente interesante para clasificar información y para reconocer formas. Imaginemos un dispositivo como el indicado en la figura 6 y supongamos que queremos detectar una letra determinada en un texto. Bastará situar en B un holograma de dicha letra

para que, automáticamente, aparezcan en \hat{C} una serie de puntos brillantes, exactamente en las posiciones que ocupa dicha letra en el texto A. Su utilidad es muy diversa: desde reconocer un carácter en un texto chino, o la silueta de un carro de combate (o una pieza de artillería) en una fotografía aérea, hasta para reconocer y clasificar los cromosomas.

B) Aplicaciones del holograma como elemento óptico.

Un holograma puede usarse para crear haces luminosos con distribuciones especiales en intensidad y dirección (Upatnieks, 1966). Por ejemplo, pueden hacerse placas fotográficas para compensar grandes aberraciones en las lentes. El sistema lente-holograma puede considerarse como un sistema óptico sin aberraciones, que produce imágenes de gran definición. Desgraciadamente este sistema no posee simetría axial.

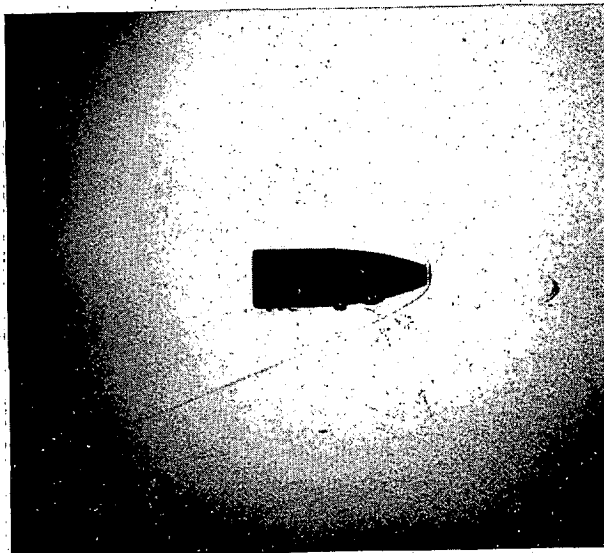
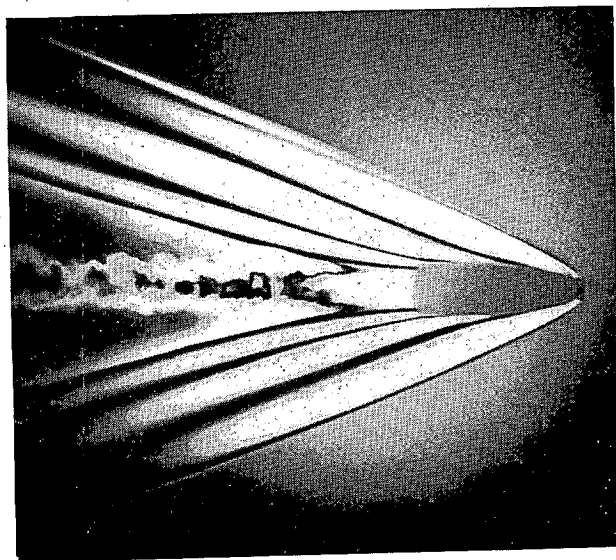
Otro aspecto de la holografía, muy interesante, es la posibilidad de usarla en aquellos casos donde los métodos normales para formar imágenes son impracticables. Estas situaciones se dan al alejarnos de la banda visible del espectro. En la región de microondas se está

desarrollando un radar que permite "ver" las imágenes. Con este dispositivo se pueden dibujar mapas, con curvas de nivel, por un procedimiento análogo al de la fotografía aérea. En el otro extremo, en la zona de los rayos X, siempre ha sido un sueño poder construir lentes capaces de enfocar esta radiación, con ellas podrían verse las estructuras atómicas. La holografía brinda la posibilidad de formar estas imágenes, pero todavía no se ha construido un laser (xaser) para estas longitudes de onda.

C) Aplicaciones del holograma a la interferometría.

Puesto que en un holograma está toda la información contenida en un frente de onda, un holograma sirve como archivo de la forma del objeto en el momento de su fotografía. Por consiguiente, es posible comparar la forma de un mismo objeto al cabo de un intervalo de tiempo sin más que comparar los hologramas correspondientes. Al superponer las dos imágenes se notará si hubo algún cambio, y si éste es pequeño, se producirán figuras de interferencia. Existen varias técnicas.

La primera (Marquet, 1966; Stetson, 1966)



(R. E. Brooks, L. O. Heflinger y R. F. Wuerker, de T. R. W. Inc.)

Fig. 7. — Fotografía de la imagen virtual de un holograma obtenido por la superposición de dos "instantáneas" conseguidas con un láser de rubí que emite impulsos de duración 100 nanosegundos. En la primera exposición la bala no estaba presente. El holograma es una figura de interferencia de un frente de onda perturbado y otro imperturbado. Esta interferencia produce la imagen de la onda de choque y de la turbulencia en la estela de la bala. A la derecha se muestra la figura producida por un holograma, con una sola exposición, de una bala idéntica en pleno vuelo. Se ve mal la estructura de la onda de choque y no se aprecia la estela. La velocidad de la bala era de unos 1 000 m./seg.

consiste en hacer un holograma del objeto a estudiar. Después de revelado se coloca el holograma exactamente en la misma posición, este es el mayor inconveniente del método. Al iluminarlo con el haz de referencia se obtiene una imagen virtual que recubre exactamente el objeto. Un ligero desplazamiento o una ligera deformación producen figuras de interferencia entre la luz reflejada por el objeto y la luz que forma la imagen virtual. La ventaja de este método es que permite observar las deformaciones a medida que van ocurriendo.

El segundo método (Wuerker, 1965) consiste en hacer dos registros sobre la misma placa. Uno del objeto no deformado y otro después de la deformación. La reconstrucción del holograma de dos imágenes virtuales que interfieren y las franjas de interferencia son una medida de la deformación. El inconveniente de este método estriba en que no puede usarse para un control dinámico. Usando este procedimiento y un laser de rubí, que emite impulsos muy cortos que permiten "congelar" el movimiento, se han obtenido fotografías muy detalladas de la onda de choque y de la estela producida por una bala en pleno vuelo (fig. 7). También se ha podido fo-



(R. E. Brooks, L. O. Heflinger y R. F. Wuerker, de T. R. W. Inc.)

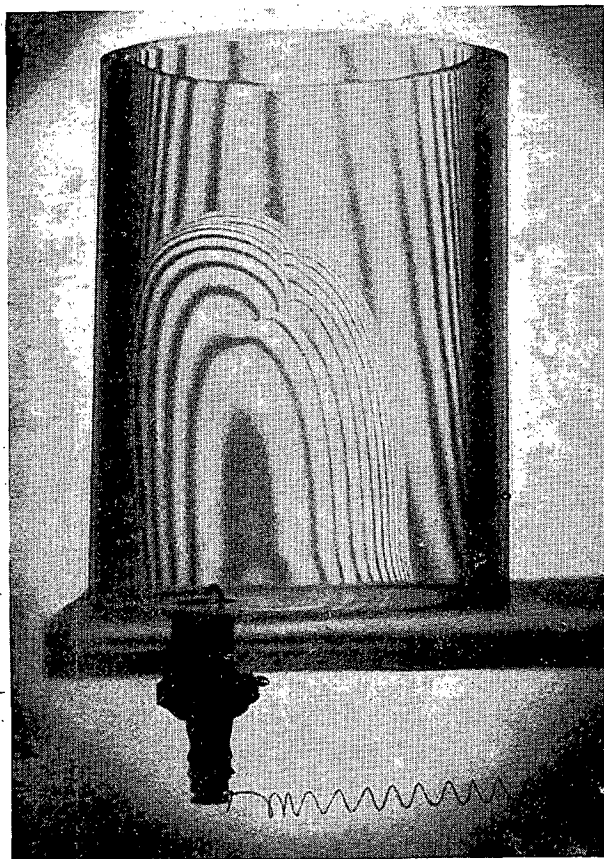
Fig. 8. — Fotografía de la imagen virtual formada por la reconstrucción de un holograma, obtenida con la misma técnica de la figura anterior. Las bandas verticales son parte de la onda de compresión producida por el aleteo de la mosca.

tografiar las ondas de compresión producidas por el aleteo de una mosca (fig. 8). En la figura 9 se han registrado las deformaciones en las paredes de un tubo, dentro del cual se ha producido una pequeña explosión.

Un tercer método consiste en dar grandes tiempos de exposición (Powell, 1965). Así como la fotografía de un coche a gran velocidad, si se da mucha exposición, es una mancha irreconocible, no sucede lo mismo con un péndulo cuyas posiciones extremas aparecen claras. Análogamente, un holograma hecho por este procedimiento, de un objeto que vibre, registrará los frentes de onda de las posiciones extremas más densamente. La figura de interferencia dará una medida de la amplitud de vibración.

Existen muchas aplicaciones de estas técnicas en nuestra ingeniería. Por ejemplo: (McNish, 1964; Haines, 1966; Wuerker, 1965; Burch, 1966; Archbold, 1967; Lurie, 1968; Shajenko, 1968). Por este procedimiento pueden estudiarse las deformaciones en una estructura (real o modelo reducido). Los efectos de la fluencia, de la fatiga o de la deformación térmica, pueden estudiarse directamente en la obra sin necesidad de un modelo. El método tiene la ventaja de que pueden hacerse medidas simultáneamente sobre toda la superficie del objeto, y de que pueden usarse materiales reales sin tener que recurrir a plásticos, u otros compuestos, que no poseen necesariamente las mismas propiedades mecánicas que los materiales reales, ya que este método aprecia corrimientos del orden de la longitud de onda de la radiación luminosa generada por el laser. Por último, comentaremos una aplicación en el campo de la Geotecnia. Se sabe que los temblores de tierra van acompañados, a menudo, de profundas fallas, cuya longitud puede alcanzar decenas de kilómetros. Las dos caras de la falla experimentan un deslizamiento relativo, y parece ser que una fracción importante de la energía liberada por el sismo es absorbida en forma de trabajo por esfuerzo cortante a lo largo de la falla (Rothé, 1962). En las regiones donde la corteza terrestre todavía no se ha estabilizado, los temblores de tierra podrían ser el resultado de un aumento lento de las tensiones internas que se aliviarían mediante desplazamientos brutales en aquellas zonas donde el terreno ya no podría resistirlas. Las fallas serían un testimonio. Se cree (Press, 1966) que de la observación de las deformaciones lentas del suelo, tomando como

base algunos kilómetros, se podría indicar la aparición y el crecimiento de las tensiones internas que originan los seísmos. Para tal fin se ha instalado una estación de medida en la célebre falla de San Andrea (aparecida durante el terremoto de San Francisco y que se extiende



(R. F. Wuerker. - TRW).

Fig. 9. — Reconstrucción de un holograma, con doble exposición, de un tubo de plástico deformado por una detonación en su interior. Las franjas de interferencia que se observan en la fotografía permiten calcular las deformaciones de las paredes.

370 Km. a lo largo de la costa de California). Esta estación está provista de un interferómetro de rayos laser, que permite medir variaciones de distancia entre dos puntos situados a ambos lados de la falla y separados 10 Km.

Dos aplicaciones inmediatas, que no hemos comentado, son la televisión y el cine tridimen-

sionales. Es posible, en principio, fabricar un sistema de televisión basado en la holografía, ya que un holograma puede registrarse en la superficie fotosensitiva de una cámara de televisión de la misma manera que en una placa fotográfica. Además, estos datos podrían transmitirse y reconstruirse en un receptor que nos mostraría imágenes virtuales tridimensionales. Sin embargo, la realización práctica, tanto en televisión como en cine, sobrepasa las posibilidades del arte y de la técnica actuales.

Al principio de este artículo se ha comentado una de las últimas hipótesis sobre los mecanismos cerebrales de almacenamiento de información. Ahora podemos comprender por qué ciertos resultados experimentales se han relacionado con la holografía. Se ha comprobado (Pribram, 1969) que la información se distribuye sobre extensas áreas y que, si posteriormente gran parte de ellas se dañan, basta una pequeña región para reconstruir el recuerdo; la posibilidad de "superponer" distintos tipos de recuerdos y luego poder evocar una imagen al cabo de un cierto tiempo mediante un estímulo adecuado (haz de referencia); que las neuronas no actúan independientemente y pueden superponer sus potenciales formando una microestructura post-sináptica (que puede considerarse como un "frente de onda" con posibilidad de interferir con otros). Todos estos datos, junto con otras experiencias, han sugerido a los biólogos la atrevida hipótesis de que la memoria puede estar almacenada en forma de holograma.

La holografía ha sido un campo de gran actividad durante estos últimos años, y continúa estimulando la imaginación de los científicos. Varios descubrimientos están todavía bajo secreto militar y otros han pasado del laboratorio a la industria. Se ha dicho que una fotografía vale más que mil palabras. Un holograma puede valer más que mil fotografías.

Agradecimiento.

Deseo expresar mi agradecimiento a Ralph F. Wuerker de Systems Group of TRW por haberme facilitado amablemente las fotografías de las figuras 7, 8 y 9.

1. ARTICULOS DE INTRODUCCION

- El Sum, H. M. A. (1967): "Uses for Holograms". *Science and Technology*, pág. 50.
- Ennos, A. E. (1967): "Holography and its Applications". *Contemp. Phys.*, vol. 8, núm. 2, pág. 153.
- Gabor, D. (1966): "Holography or the Whole Picture". *New Scientist*, págs. 74-78.
- Leith, E. N., y Upatnieks, J. (1965): "Photography by Laser". *Scientific American*, vol. 212, núm. 6, pág. 24.
- Pribram, K. H. (1969): "The Neurophysiology of Remembering". *Scientific American*, vol. 220, núm. 1, pág. 73.
- Stroke, G. W. (1967): "Holography". *The Science Teacher*, volumen 34, núm. 7.

2. ARTICULOS ESPECIALIZADOS

- Archbold, E., Burch, J. M., y Ennos, A. E. (1967): *J. Sci. Instrum.*, vol. 44.
- Born, M., y Wolf, E. (1965): *Principles of Optics*, 3.^a edición. Pergamon Press.
- Burch, J. M., Ennos, A. E., y Wilton, R. J. (1966): *Nature*, volumen 209, pág. 1015.
- Gabor, D. (1948): *Nature*, vol. 161, pág. 777; (1949): *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 197, pág. 454; (1951): *Proc. Roy. Soc. B*, vol. 64, pág. 449.
- Haines, K. A., Hildebrand, B. P. (1966): "Surface Deformation Measurement Using the Wavefront Reconstruction Technique". *Applied Optics*, vol. 5, núm. 4, pág. 595.
- Leith, E. N., y Upatnieks, J. (1962): *Journal of the Optical Society of America*, vol. 52, núm. 10, pág. 1123.
- Leith, E. N., y Upatnieks, J. (1964): "Wavefront Reconstruction with Continuous Tone Objects". *Journal of the Optical Society of America*, vol. 53, núm. 12, pág. 1377.
- Leith, E. N., Upatnieks, J., y Haines, K. (1965): "Microscopy by Wavefront Reconstruction". *Journal of the Optical Society of America*, vol. 55, núm. 8, pág. 981.
- Leith, E. N., Kozma, A.; Upatnieks, J.; Marks, J., y Massey, N. (1966): "Holographic data Storage in Three-Dimensional Media". *Applied Optics*, vol. 5, núm. 8, página 1303.
- Lin, L. H., Pennington, K. S., y Stroke, G. W. (1966): "Multicolor Holographic Image Reconstructions with White Light Illumination". *A. E. Labeyrie-Bell System Technical Journal*, pág. 659.
- Lin, L. H., y Lo Bianco, C. V. (1967): "Experimental Techniques in Making Multicolor White Light Reconstructed Holograms". *Applied Optics*, vol. 6, núm. 7, pág. 1255.
- Lurie, M., y Zambuto, M. (1968): "A verification of Holographic measurement of vibration", *Appl. Optics*, volumen 7, núm. 11, pág. 2323.
- Marquet, M. (M^{me}); Bourgeon, M. H. (M^{lle}), y Saget, J. C. (1966): "Interférométrie par Holographie". *Revue d'Opt*, volumen 45, págs. 501-506.
- McNish, A. G. (1964): "Accurate Length Measurement of Meter Bar with He-Ne Laser". *Science*, vol. 146, páginas 1672-1673.
- Powell, R. L., y Stetson, K. A. (1965): *J. Opt. Soc. Am.*, volumen 55, pág. 612 y pág. 1593.
- Press, F., y Brace, W. F. (1966): "Earthquake Prediction". *Science*, vol. 152, págs. 1575-1584.
- Rothe, J. (1962): "Séismes et Volcans". *Press Universitaires de France*.
- Shajenko, P., y Johnson, C. D. (1968): "Stroboscopic Holographic Interferometry". *Appl. Phys. Letters*, vol. 13, página 44.
- Stetson, K. A., y Powell, R. L. (1966): "Hologram Interferometry". *Journal of the Optical Society of America*, volumen 56, núm. 9, pág. 1161.
- Stroke: "Lensless Fourier Transform for Optical Holography". *Applied Physics Letters*, núm. 6, pág. 201.
- Upatnieks, J.; Wander Lugt, A., y Leith, E. (1966): *Appl. Opt.*, volumen 5, pág. 589.
- Wuerker, R. F., Heflinger, L. O., y Brooks, R. E. (1966): "Holographic Interferometry". *J. Appl. Phys.*, vol. 37, número 2, pág. 642.