

Capítulo 6

Modulación compleja sumando pantallas de reflexión. Configuración de Michelson

Tras haber visto los métodos que utilizan la amplitud y la fase para representar la información compleja y como éstos están limitados por las capacidades de modulación de las pantallas de transmisión de las que se dispone, en este capítulo presentamos otra alternativa, que utiliza la información compleja separada en parte real e imaginaria. Estas dos partes se pueden representar en las pantallas ferroeléctricas de reflexión, que cuentan con las configuraciones adecuadas para ello.

6.1. Modulación compleja completa sumando la parte real y la imaginaria

Además de poder representar una función compleja como amplitud y fase, también se puede separar en sus partes real e imaginaria. Así, otra forma de obtener modulación compleja completa es utilizar estas dos partes y realizar la suma de ambas para obtener la representación deseada. Para ello se necesita unas pantallas con las configuraciones adecuadas para modular solo valores reales o solo imaginarios y un sistema para tener la suma de ambas partes en el mismo plano. Las pantallas ferroeléctricas por reflexión que presentamos en el capítulo 4 cumplen con estas condiciones y, por tanto, son las que utilizaremos en este capítulo.

La información compleja que representaremos en estas pantallas de nuevo serán ho-

logramas de Fresnel. De forma similar a como se explicó en el capítulo anterior, utilizamos la transformada de Fresnel (ecuación 2.31) para retropropagar un objeto $f(x, y)$ hasta una distancia $-d$. La distribución compleja resultante, $U(x, y, -d)$, será la información del holograma que una vez iluminado con una onda plana reconstruye el objeto a una distancia d . Esta distribución se separa en su parte real e imaginaria, que serán las que usaremos para mostrar en las pantallas:

$$U(x, y, -d) = \text{Re}[U(x, y, -d)] + i\text{Im}[U(x, y, -d)] = a + ib \quad (6.1)$$

Como se vio en el capítulo 4, las pantallas ferroeléctricas de las que disponemos actúan por reflexión, y por tanto, se utiliza un divisor de haz para separar la luz de entrada y la de salida. Colocando adecuadamente un polarizador a la entrada y uno a la salida se obtiene la configuración de modulación solo real (figura 4.12). Añadiendo una lámina $\lambda/4$ a la salida se consigue la modulación solo imaginaria (figura 4.14). Para obtener la modulación compleja completa se tienen que utilizar dos pantallas acopladas, mediante un divisor de haz que además sea polarizante, de forma que se obtengan las dos configuraciones de forma simultánea. Este divisor de haz actúa como un polarizador lineal orientado en la dirección x cuando transmite y orientado en la dirección y cuando refleja la luz:

$$BS_t = P(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

$$BS_r = P\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Entonces con el montaje que se muestra en la figura 6.1, similar al de un interferómetro de Michelson, se consigue la suma de las partes real e imaginaria. Antes del divisor del haz se coloca un polarizador a 45° , de forma que los dos brazos del montaje reciban la misma cantidad de luz, así antes del divisor de haz tenemos el vector de Jones:

$$J_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

A la salida del divisor de haz tenemos la contribución de la modulación de las dos pantallas, que se corresponde a la matriz de Jones de la ecuación 4.67:

$$W(\theta) = \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

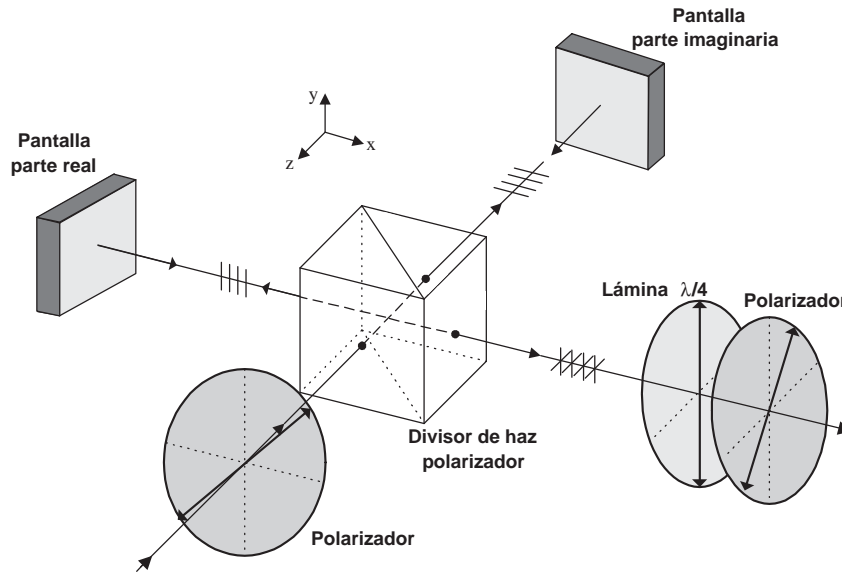


Figura 6.1: Esquema del montaje para tener modulación compleja con las pantallas de reflexión

Así, considerando el brazo para la parte real tenemos:

$$\begin{aligned}
 J_{re} &= BS_t W(\theta_{re}) BS_r J_0 = \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 2\theta_{re} & \sin 2\theta_{re} \\ \sin 2\theta_{re} & -\cos 2\theta_{re} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin 2\theta_{re} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.6)
 \end{aligned}$$

La luz al reflejarse en el divisor de haz queda polarizada en la dirección y a la entrada de la pantalla, esta la hace rotar un ángulo $2\theta_{re}$, como se muestra en la figura 6.2(a), y a la salida, al atravesar el divisor del haz, tenemos la luz polarizada en la dirección x . De forma similar, para el brazo de la parte imaginaria:

$$\begin{aligned}
 J_{im} &= BS_r W(\theta_{im}) BS_t J_0 = \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 2\theta_{im} & \sin 2\theta_{im} \\ \sin 2\theta_{im} & -\cos 2\theta_{im} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin 2\theta_{im} \end{pmatrix} \quad (6.7)
 \end{aligned}$$

En este caso la luz a la entrada de la pantalla, tras haber pasado por el divisor de haz, esta polarizada en la dirección x , la pantalla la rota un ángulo $2\theta_{im}$, como se muestra en la figura 4.2(b), y después de reflejarse en el divisor de haz, nos quedamos con la luz polarizada en la dirección y .

Tras el divisor del haz, donde obtenemos la suma de los dos brazos, se coloca una lámina $\lambda/4$, en este caso con el eje rápido en la dirección x , que se encarga de introducir un desfase de $\pi/2$ para obtener la modulación imaginaria, y finalmente un polarizador a 45° que realiza la suma de las partes real e imaginaria:

$$\begin{aligned}
 J_S &= P\left(\frac{\pi}{4}\right)L_4(0)(J_{re} + J_{im}) = \\
 &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin 2\theta_{re} \\ \sin 2\theta_{im} \end{pmatrix} = \frac{1}{2}(\sin 2\theta_{re} - i \sin 2\theta_{im}) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.8)
 \end{aligned}$$

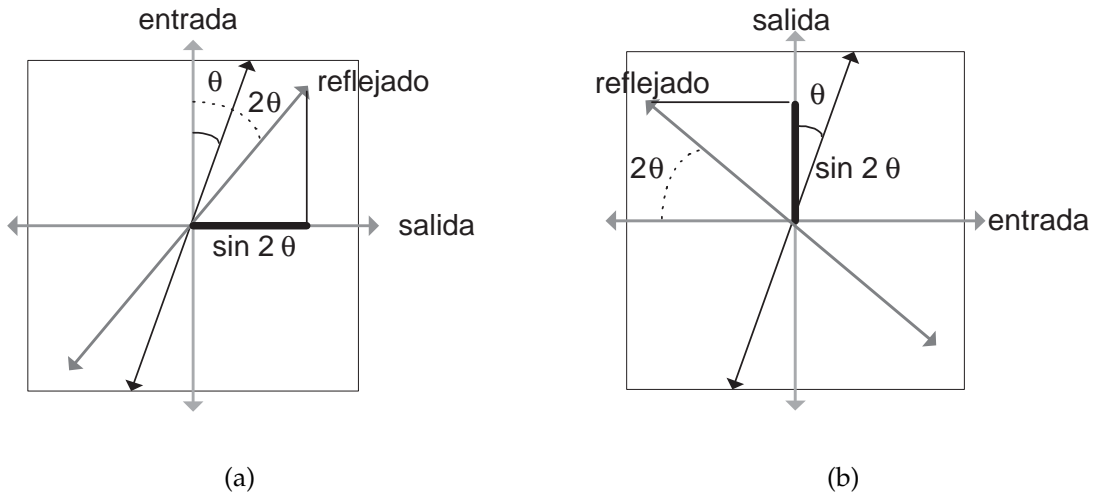


Figura 6.2: Esquema de la modulación de las pantallas de reflexión para: (a) la parte real y (b) la parte imaginaria

Con este montaje se consigue sumar la modulación real y la imaginaria y por tanto obtener la modulación del plano complejo completo. Para cada una de las partes tenemos una de las curvas de la figura 6.3, en sentido horizontal la curva para la parte real (RE) y en sentido vertical la de la parte imaginaria (IM), cada punto de la curva corresponde a un nivel de gris de la imagen que se representa en la pantalla. Así para representar el holograma, se separa la distribución compleja en sus partes real e imaginaria, y cada parte se ajusta a la curva correspondiente por mínima distancia. De esta forma se obtienen las imágenes que mostradas en las pantallas y sumadas reconstruyen el objeto a una distancia d .

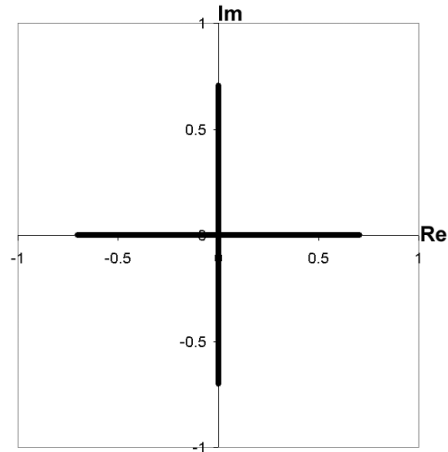


Figura 6.3: Configuraciones de las dos pantallas, que sumadas dan la modulación compleja completa

6.2. Resultados simulados

Este método para obtener la modulación compleja completa se prueba mediante una serie de simulaciones que tienen en cuenta las características de modulación de las pantallas de reflexión. Estas simulaciones consisten en reconstruir una imagen a partir de un holograma de Fresnel mostrado en estas pantallas utilizando la suma de las partes real e imaginaria, o utilizando solo una de ellas, ajustándolas a las curvas RE y IM. Las imágenes que utilizamos vuelven a ser la del pez y la del logo de la Universidad (ver figura 6.4), como las que se han utilizado en los capítulos anteriores. En este caso se escogen de 128×128 píxeles, que se corresponde a la resolución de las pantallas. Así el tamaño de píxel utilizado es de $40 \mu\text{m}$ y la longitud de onda de 658 nm , correspondiente a la del láser diodo que se utiliza con estas pantallas.

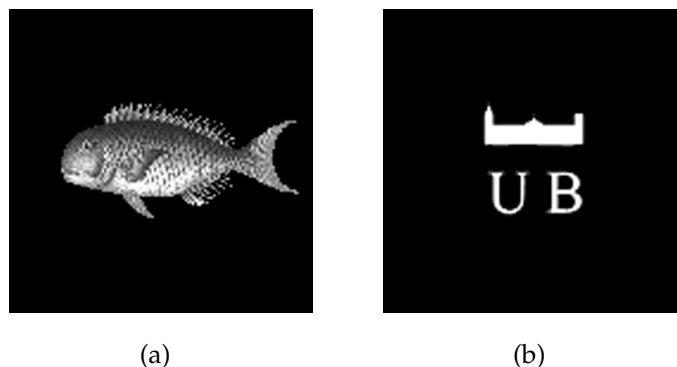


Figura 6.4: Imágenes del objeto original: (a) pez y (b) logo de la UB

Los hologramas que reconstruyen los objetos se calculan con la transformada de Fres-

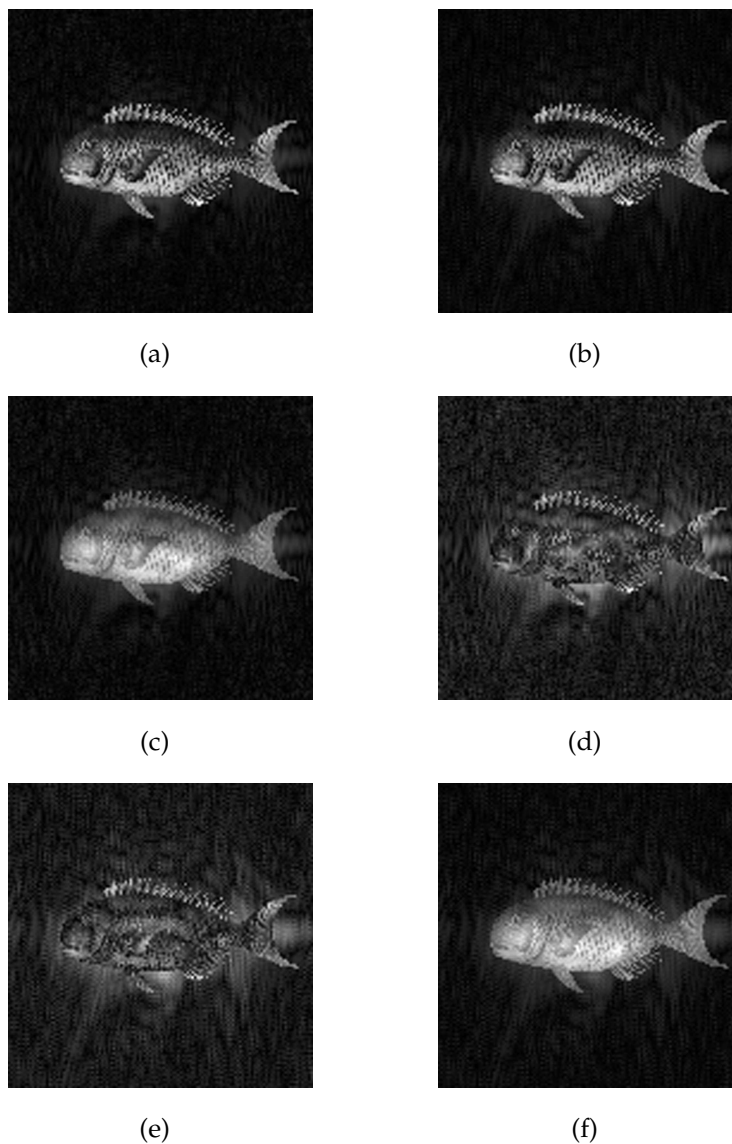


Figura 6.5: Imágenes de la amplitud de las reconstrucciones del pez (con $\lambda = 658$ nm y $\Delta p = 0,04$ mm): (a) full complex a 240.88 mm, (b) full complex a 324.838 mm, (c) parte real a 240.88 mm, (d) parte imaginaria a 240.88 mm, (e) parte real a 324.838 mm, y (f) parte imaginaria a 324.838 mm

nel, con la que se retropropagan las imágenes con el objeto a recuperar. En este caso las distancias utilizadas son 240.88 y 324.838 mm, que como se vio en el capítulo 2, corresponden a dos posiciones en las que se obtiene un mínimo error en la reconstrucción usando solo la parte real o la imaginaria respectivamente. Una vez se tiene la distribución compleja del holograma se separa en parte real, que se ajusta a la curva RE, y parte imaginaria, que se ajusta a la curva IM. Entonces, para obtener la reconstrucción compleja completa, se propaga mediante la transformada de Fresnel cada una de las partes a la distancia escogida y se suman los resultados de las

dos propagaciones. En las figuras 6.5(a), (b) y 6.6(a), (b) se muestran respectivamente las imágenes de las reconstrucciones para el pez y el logo a las dos distancias. Estas imágenes se corresponden perfectamente a la de los objetos originales, solo con una pequeña diferencia en los niveles de gris, debido a la discretización y normalización que se llevan a cabo al ajustar los valores complejos a las configuraciones de las pantallas. Si se considera el uso de solo una pantalla que representa la parte real o la parte imaginaria obtenemos distintos resultados dependiendo de la distancia de reconstrucción. A 240.88 mm las imágenes obtenidas usando solo la parte real (figuras 6.5(c) y 6.6(c)) presentan una reconstrucción aceptable, con un poco de ruido, en cambio con la parte imaginaria (figuras 6.5(d) y 6.6(d)) la imagen es mucho más ruidosa y se obtiene una peor reconstrucción. A 324.838 mm la situación se invierte y se obtiene una reconstrucción mejor con la parte imaginaria (figuras 6.5(f) y 6.6(f)) que con la parte real (figuras 6.5(e) y 6.6(e)). Este comportamiento se corresponde con el caso ideal al usar solo una de las partes, debido a las interferencias que se producen y que se explicaron en el apartado 2.6.2, y por tanto en este caso se observa que el ajuste a una de las configuraciones de las pantallas no afecta de forma considerable al resultado ideal.

6.2.1. Reconstrucción a distintas distancias

El método que usa por separado las partes real e imaginaria también puede ser utilizado para representar un holograma que contenga la información de distintos objetos a distintas distancias. En nuestro caso consideramos las letras UB y la silueta del edificio de la imagen del logo (figura 6.4(b)) como dos objetos distintos a reconstruir a distancias distintas. Para obtener el holograma que contendrá a los dos, primero retropropagamos las letras una distancia de 240.88 mm y luego el edificio una distancia de 324.88 mm. La suma de las dos distribuciones complejas que se obtienen forma el holograma que reconstruye cada objeto a la distancia correspondiente. Este holograma se separa en sus partes real e imaginaria, y se ajustan a las curvas RE y IM, respectivamente. En la figura 6.7(a) se muestra la reconstrucción que se obtiene al propagar y sumar las dos partes hasta 240.88 mm, en la que las letras aparecen enfocadas mientras que el edificio está totalmente desenfocado. La figura 6.7(b) muestra la reconstrucción a 324.838 mm, en este caso es el edificio el que aparece enfocado y las letras desenfocadas. Estas reconstrucciones se han obtenido utilizando la modulación compleja completa, en el caso de utilizar solo la parte real se obtiene una buena reconstrucción de las letras (figura 6.7(c)), ya que es una distancia que corres-

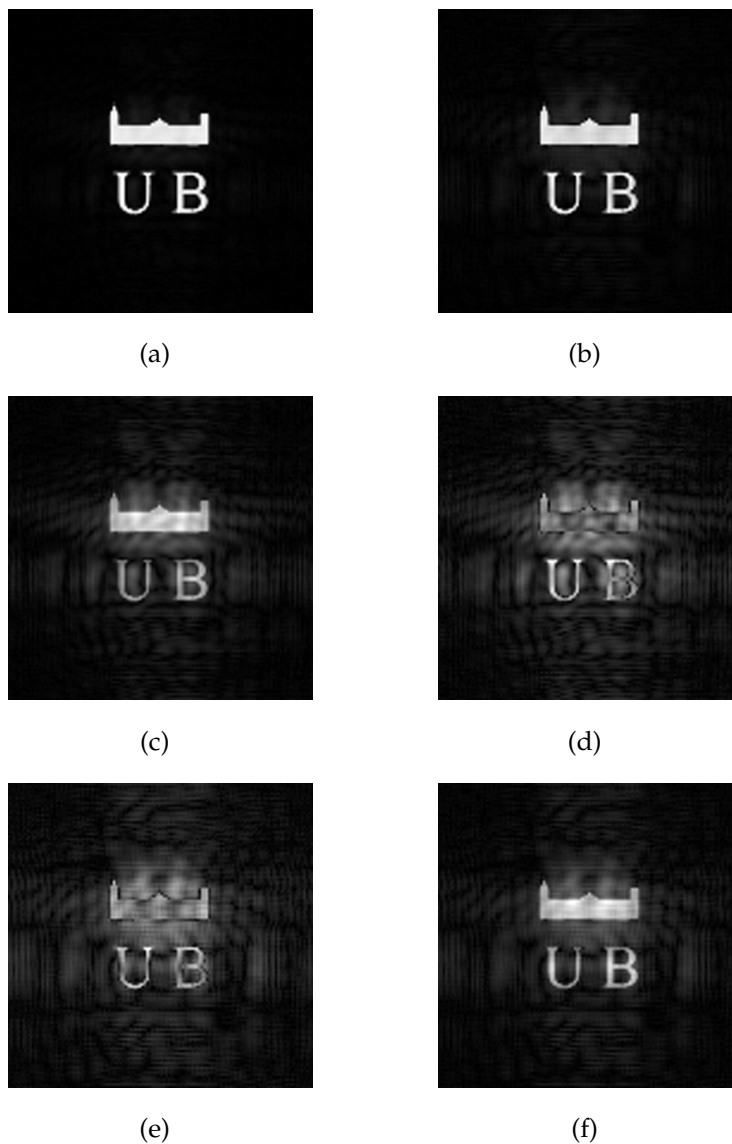


Figura 6.6: Imágenes de la amplitud de las reconstrucciones del logo (con $\lambda = 658$ nm y $\Delta p = 0,04$ mm): (a) full complex a 240.88 mm, (b) full complex a 324.838 mm, (c) parte real a 240.88 mm, (d) parte imaginaria a 240.88 mm, (e) parte real a 324.838 mm, y (f) parte imaginaria a 324.838 mm

ponde a un mínimo de error para la parte real, pero por contra no se obtiene una buena reconstrucción del edificio (figura 6.7(d)) ya que la distancia corresponde a un máximo de error para la parte real. De forma similar sucede al utilizar solo la parte imaginaria (figuras 6.7(e) y 6.7(f)). Así, para realizar una reconstrucción en un plano determinado existe la posibilidad de usar solo la parte real o la imaginaria, pero para reconstruir la información de un volumen, o de varios planos a distintas distancias simultáneamente es necesario utilizar la modulación compleja completa, que emplea las dos pantallas.

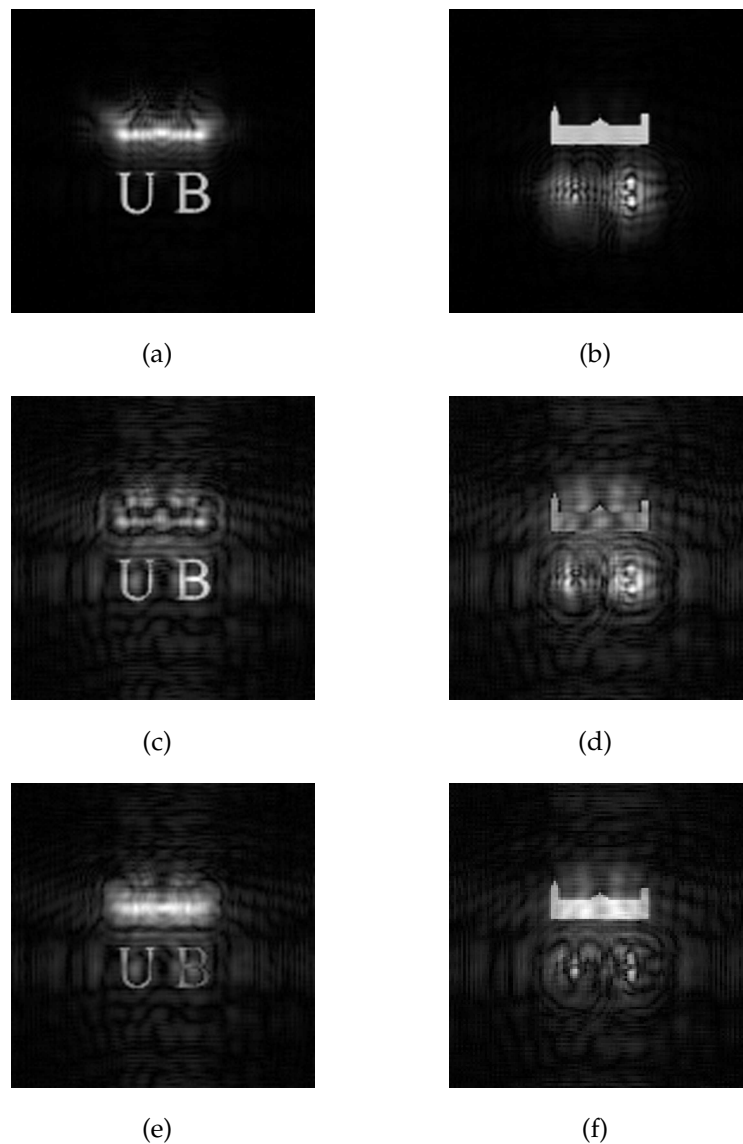


Figura 6.7: Imágenes de la amplitud de las reconstrucciones a 240.88 mm (primera columna, donde focalizan las letras) y a 324.838 mm (segunda columna, donde focaliza el edificio) usando: (a) y (b) full complex, (c) y (d) parte real y (e) y (f) parte imaginaria

6.3. Evaluación del método

De forma similar a como se hizo en el capítulo anterior, hemos realizado un estudio de la modulación compleja completa, en este caso con el método que utiliza la suma de los ajustes de las partes real e imaginaria. Para ello de nuevo se calculan los errores RMS entre las amplitudes reconstruidas y las ideales para el pez y el logo de la UB (figura 6.4), primero variando la distancia de reconstrucción d entre 0 y 3000 mm (3000 puntos) y luego en una zona 2λ alrededor de los 240.88 mm (500 puntos),

que corresponde a una de las distancias de reconstrucción del apartado anterior. La longitud de onda utilizada es de 658 nm y las imágenes son de 128×128 píxeles, con un tamaño de píxel de $40 \mu\text{m}$. En este caso tras retropropagar el objeto una distancia $-d$ se separa la distribución compleja que se obtiene en sus partes real e imaginaria y se ajustan a las curvas RE y IM respectivamente. Luego propagando cada parte a una distancia d y sumando las dos distribuciones se obtiene la reconstrucción del objeto. También consideramos los resultados de las reconstrucciones obtenidas utilizando solo la parte real o la parte imaginaria ajustadas.

En las figuras 6.8(a) y 6.8(c) se muestran los resultados del error RMS para las reconstrucciones entre 0 y 3000 mm para el pez y el logo de la UB respectivamente. En ambos casos el error que se obtiene al utilizar la suma de los ajustes de ambas partes es prácticamente nulo, lo que da una reconstrucción próxima a la ideal, solo limitada por la discretización de los niveles de gris que se lleva a cabo durante el ajuste. Además en este caso no aparecen las oscilaciones dependiendo de la distancia que aparecían en los métodos que utilizaban la multiplicación de las configuraciones de las pantallas de transmisión, que se vieron en el capítulo anterior. Si se utiliza solo la parte real o la parte imaginaria los errores de las reconstrucciones oscilan entre una zona de mínimo error y una de máximo error, en los gráficos de las figuras 6.8(b) y 6.8(d) se pueden ver en detalle estas oscilaciones alrededor de los 240.88 mm para el pez y para el logo respectivamente. Las oscilaciones tienen un periodo de $\lambda/2$ y se corresponden exactamente con las oscilaciones que se producen en el error de las reconstrucciones al utilizar la parte real o la parte imaginaria ideales, sin realizar el ajuste a las configuraciones de las pantallas, que se vieron en el capítulo 2.

Estos buenos resultados en la modulación compleja completa se deben a las configuraciones que presentan las pantallas de reflexión, que son capaces de representar los valores de la parte real y de la parte imaginaria correctamente. Esto se puede comprobar al realizar el ajuste de la distribución test del plano complejo unidad y ver las imágenes de las distintas partes ajustadas, como se hizo en el capítulo anterior. En la figura 6.9 se muestran las imágenes de amplitud, fase, parte real y parte imaginaria del plano complejo unidad ideal (primera fila), ajustando la parte real a la curva RE y la parte imaginaria a la curva IM y realizando la suma de ambos ajustes (segunda fila), ajustado solo a la curva RE (tercera fila) y ajustado solo a la curva IM (última fila). La suma de los ajustes por separado de las dos partes da un resultado prácticamente igual al del plano ideal, solo hay una pequeña discrepancia en los valores de

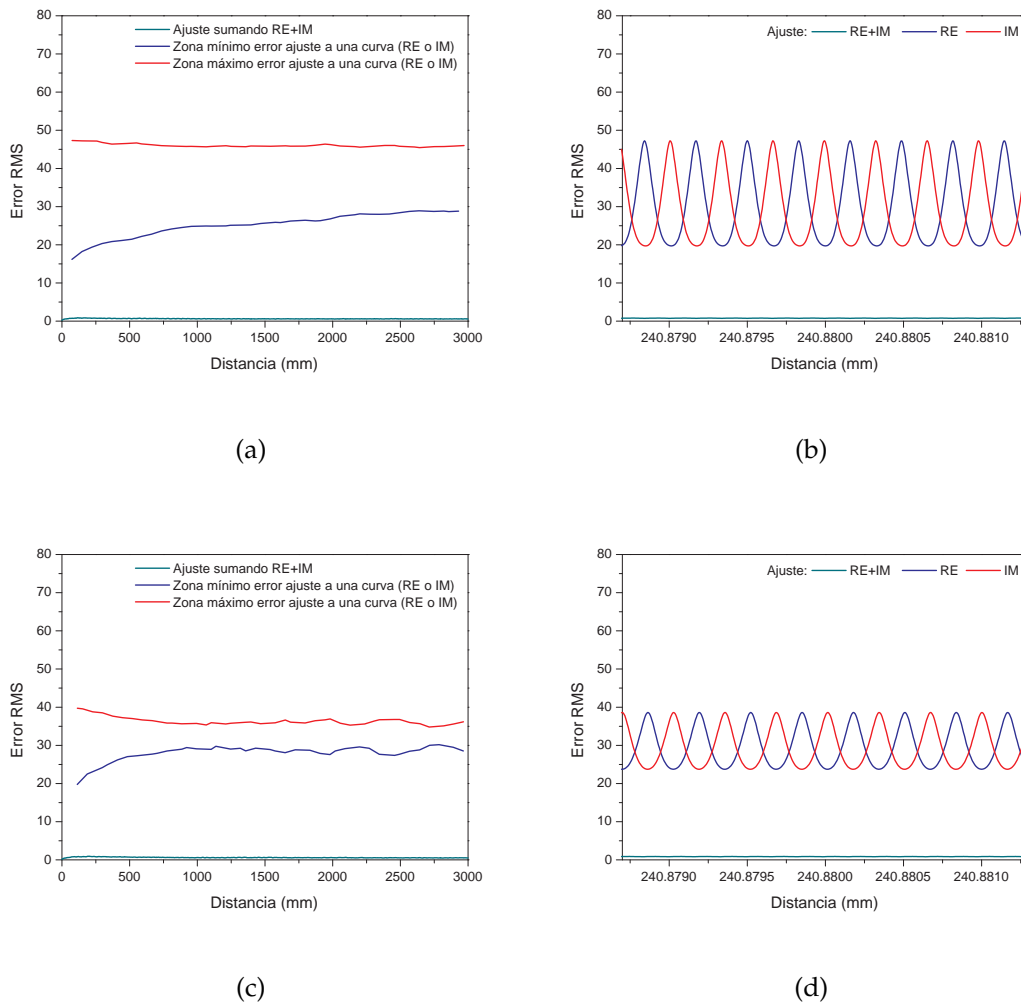


Figura 6.8: Gráficos del error RMS para las reconstrucciones del pez (parte superior) y el logo (parte inferior) utilizando las pantallas de reflexión con las curvas RE y IM: (a) y (c) de 0 a 3000 mm; (b) y (d) detalle distancia 2λ alrededor de 240.88 mm

fase cercanos a 0 y 2π , debido a la normalización de los valores numéricos. Al usar solo una de las curvas, se observa un comportamiento simétrico, así la curva RE modula correctamente los valores reales, los valores imaginarios se ven aproximados al valor más próximo de la curva real, por tanto los valores de fase se ven binarizados entre 0 y π , y la amplitud solo se ve modulada en la parte real sin tener en cuenta la parte imaginaria. De forma similar ocurre al usar la curva IM, en este caso la parte imaginaria se ve correctamente modulada, la fase se binariza entre $\pi/2$ y $3\pi/2$, y la amplitud solo se ve modulada en la parte imaginaria, considerando la parte real constante. Estos resultados se ven resumidos en la figura 6.10, donde se presentan los errores RMS entre las imágenes ideales de las distintas partes del plano complejo

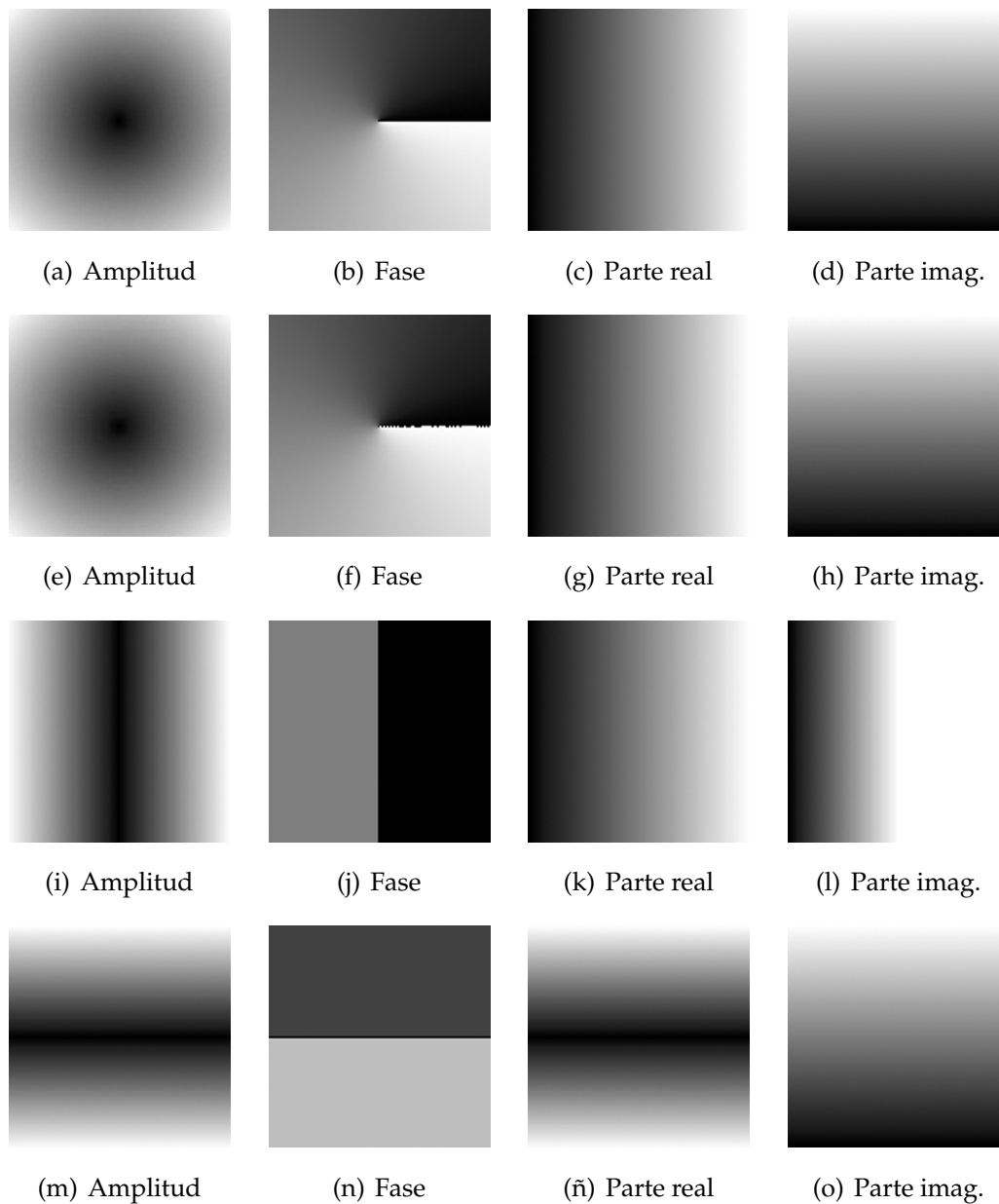


Figura 6.9: Imágenes de la distribución del plano complejo unidad: (a)-(d) distribución ideal; (e)-(h) modulación compleja RE+IM; (i)-(l) parte real ajustada a la curva RE; y (m)-(o) parte imaginaria ajustada a la curva IM

unidad y las imágenes de las partes tras utilizar las distintas curvas, y donde se ve que los resultados al usar la suma de los ajustes de las dos curvas son prácticamente ideales, al igual que la parte real ajustada a la curva RE y la parte imaginaria ajustada a la curva IM. En cambio cuando se ajusta la distribución compleja a solo una curva la amplitud presenta el mismo error en ambos casos y la fase presenta un mayor error al usar el ajuste a la curva RE que a la curva IM. Por otro lado, la distancia entre la

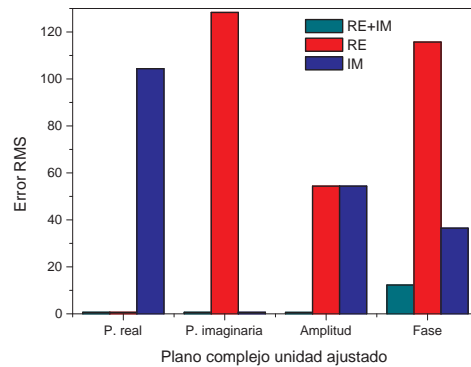


Figura 6.10: Gráfico del error RMS entre las imágenes de amplitud, fase, parte real y parte imaginaria ideales y las ajustadas con las curvas RE y IM para la distribución del plano complejo unidad

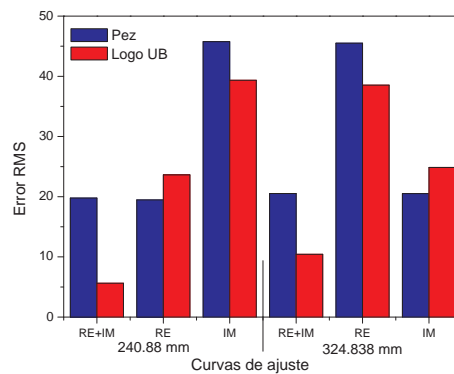


Figura 6.11: Gráfico del error RMS entre las imágenes de amplitud del pez y del logo ideales y las de las reconstrucciones a 240.88 y 324.838 mm ajustadas con las curvas RE y IM

distribución del plano complejo ideal y el ajustado con la suma del ajuste de las dos partes es de 0.49, en cambio utilizando solo una de las curvas para realizar el ajuste esta distancia aumenta hasta 0.54, de todas formas ambas son valores pequeños, dando cuenta que estas configuraciones son apropiadas para representar distribuciones complejas.

Finalmente, en la figura 6.11 se presentan los errores RMS entre las imágenes de amplitud del pez y del logo de la UB ideales y las de las reconstrucciones a 240.88 mm (a la izquierda) y a 324.838 mm (a la derecha) usando la suma de los ajustes de la parte real a la curva RE y la parte imaginaria a la curva IM, solo la parte real ajustada

a la curva RE o solo la parte imaginaria ajustada a la curva IM. En ellos se ve como usando ambas partes siempre se obtienen mejores resultados, y como a 240.88 mm, que corresponde a un mínimo de error para la parte real esta se aproxima a los valores obtenidos con la modulación compleja completa, en cambio a 324.838 el mínimo corresponde a la parte imaginaria, con la que se obtiene resultados más próximos al de la modulación compleja completa que con solo la parte real.

6.4. Montaje y resultados experimentales

El método para obtener la modulación compleja completa de los hologramas de Fresnel mediante la suma de las partes real e imaginaria se ha llevado a cabo en un montaje experimental que sigue el esquema de la figura 6.1. Este montaje experimental se muestra en la figura 6.12, donde se pueden ver las pantallas ferroeléctricas de reflexión de BNS dispuestas en una configuración similar a la de un interferómetro de Michelson, en el centro del montaje se coloca el divisor de haz polarizante (PBS), que separa el haz a la entrada y lo reúne de nuevo a la salida, tras la reflexión de la luz en las dos pantallas. A la entrada del divisor de haz se coloca un polarizador a 45° , que se encarga de igualar la intensidad de luz que llega a los dos brazos. A la salida, después del divisor de haz, se coloca una lámina $\lambda/4$ de orden cero, para introducir el desfase $\pi/2$ a una de las componentes y un polarizador a 45° que realiza la suma de las partes real e imaginaria. El láser que utilizamos es un diodo de 658 nm de longitud de onda y unos 8 mm de diámetro de haz. Para captar las reconstrucciones usamos una cámara CCD colocada a la salida del montaje, que se puede desplazar a las distintas posiciones de los planos donde se realizan las propagaciones de los hologramas. La posición de las dos pantallas debe estar bien controlada, para ello se utiliza un micrómetro piezoeléctrico para mover la pantalla que muestra la parte real, con el que se consigue una precisión de $\lambda/2$ en la posición relativa de los dos moduladores. La orientación de las dos pantallas también tiene que ser corregida para asegurar la superposición de las imágenes mostradas en los dos paneles. Para ello se realiza un alineamiento preciso del sistema óptico de forma que se obtiene la correspondencia píxel a píxel entre las dos pantallas.

Los experimentos se han realizado con las imágenes de 128×128 del pez y del logo de la UB (figura 6.4). Con estas imágenes se han calculado los hologramas de Fresnel que cuando se muestran en las pantallas reconstruyen los objetos a las mismas distancias que en las simulaciones que se han visto anteriormente. En la figura 6.13

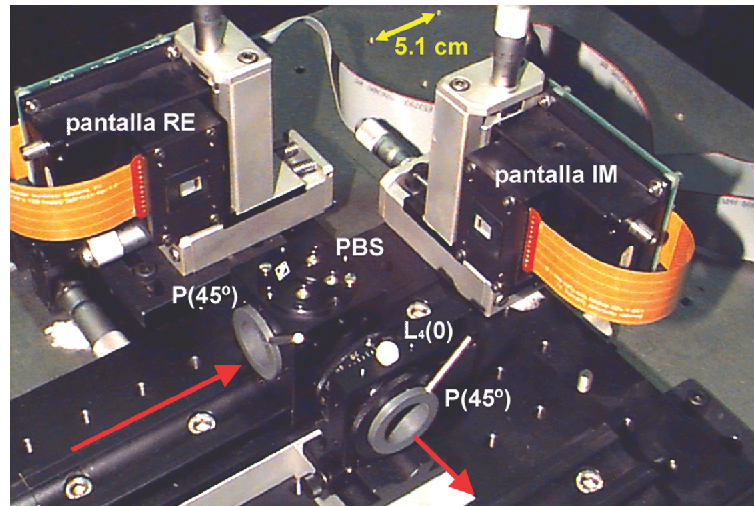


Figura 6.12: Montaje experimental para obtener la suma de las pantallas de reflexión

se muestran las imágenes de las reconstrucciones utilizando el pez y en la figura 6.14 utilizando el logo de la UB. Las imágenes con las reconstrucciones con la información compleja completa, obtenida sumando la parte real y la parte imaginaria mostrada simultáneamente en las dos pantallas, (figuras 6.13(a) y 6.14(a) a 240.88 mm y 6.13(b) y 6.14(b) a 324.838 mm) muestran unas reconstrucciones correctas del objeto original y se corresponden con los resultados obtenidos en las simulaciones (figuras 6.5 y 6.6), en el caso del pez se pueden apreciar los detalles como la boca, las aletas y las escamas y en la imagen del logo se puede apreciar perfectamente la silueta del edificio y las dos letras. Si utilizamos solo una de las partes para realizar la reconstrucción los resultados son peores. A 240.88 mm, la reconstrucción con la parte real (figuras 6.13(c) y 6.14(c)) da un resultado más próximo al objeto original que si se utiliza solo la parte imaginaria (figuras 6.13(d) y 6.14(d)), aunque no llega a la calidad que se obtiene al utilizar las dos partes. En el pez reconstruido con la parte real se pueden apreciar los detalles un poco más borrosos, aunque a la imagen le falte contraste a causa de la iluminación, en el caso del logo la reconstrucción es un poco mejor ya que presenta más contraste. Pero las reconstrucciones utilizando solo la parte imaginaria pierden la información de volumen y solo se aprecian algunos detalles de los objetos. En cambio a 324.838 mm, la situación se invierte, las reconstrucciones son mejores con la parte imaginaria (figuras 6.13(f) y 6.14(f)) que con la parte real (figuras 6.13(e) y 6.14(e)). Aunque en el caso del logo la iluminación hace que en la reconstrucción con la parte imaginaria no se aprecie la letra U, es usando la parte real cuando no se obtiene una reconstrucción del todo exacta, al faltar información en el interior del

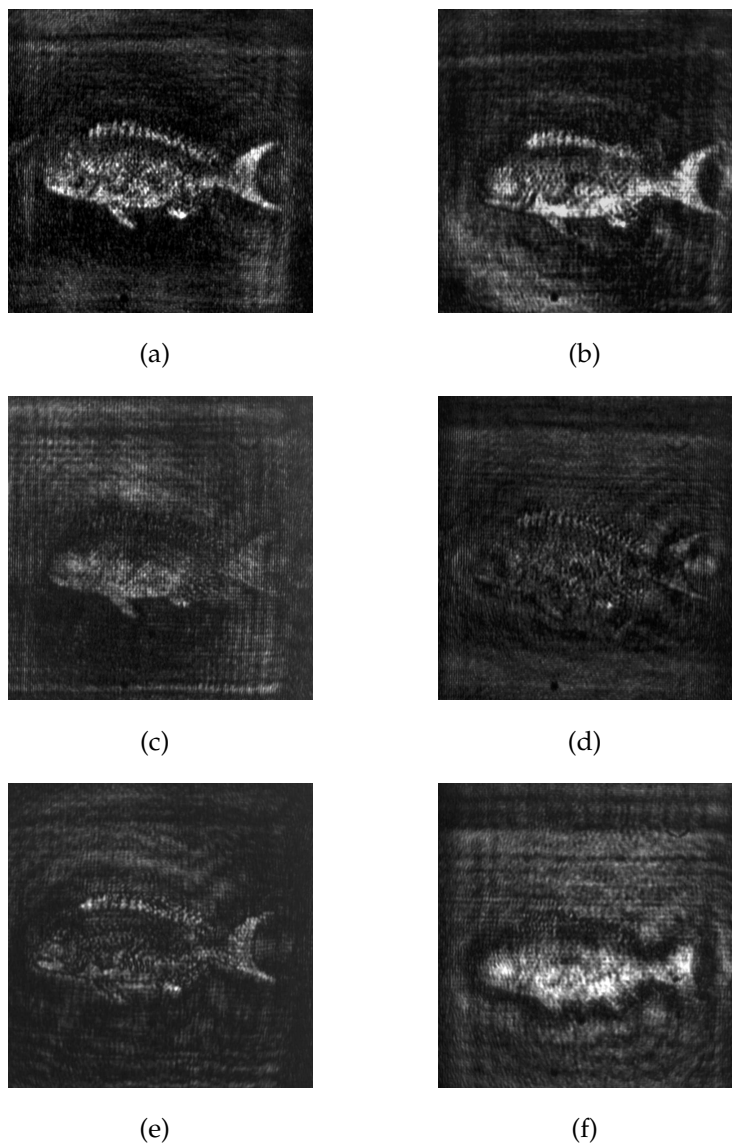


Figura 6.13: Imágenes experimentales de las reconstrucciones del pez (con $\lambda = 658 \text{ nm}$ y $\Delta p = 0,04 \text{ mm}$): (a) full complex a 240.88 mm, (b) full complex a 324.838 mm, (c) parte real a 240.88 mm, (d) parte imaginaria a 240.88 mm, (e) parte real a 324.838 mm, y (f) parte imaginaria a 324.838 mm

objeto. Estos resultados se corresponden con las simulaciones, donde vimos que la distancia de 240.88 mm correspondía a un mínimo para el error RMS de la reconstrucción al utilizar la parte real, mientras que a 324.838 mm el mínimo correspondía a utilizar la parte imaginaria.

En la figura 6.15 se muestran las reconstrucciones del holograma del logo de la UB considerando el edificio y las letras como dos objetos distintos a reconstruir a dos distancias diferentes. Así, en la figura 6.15(a) vemos la reconstrucción a 240.88 mm,

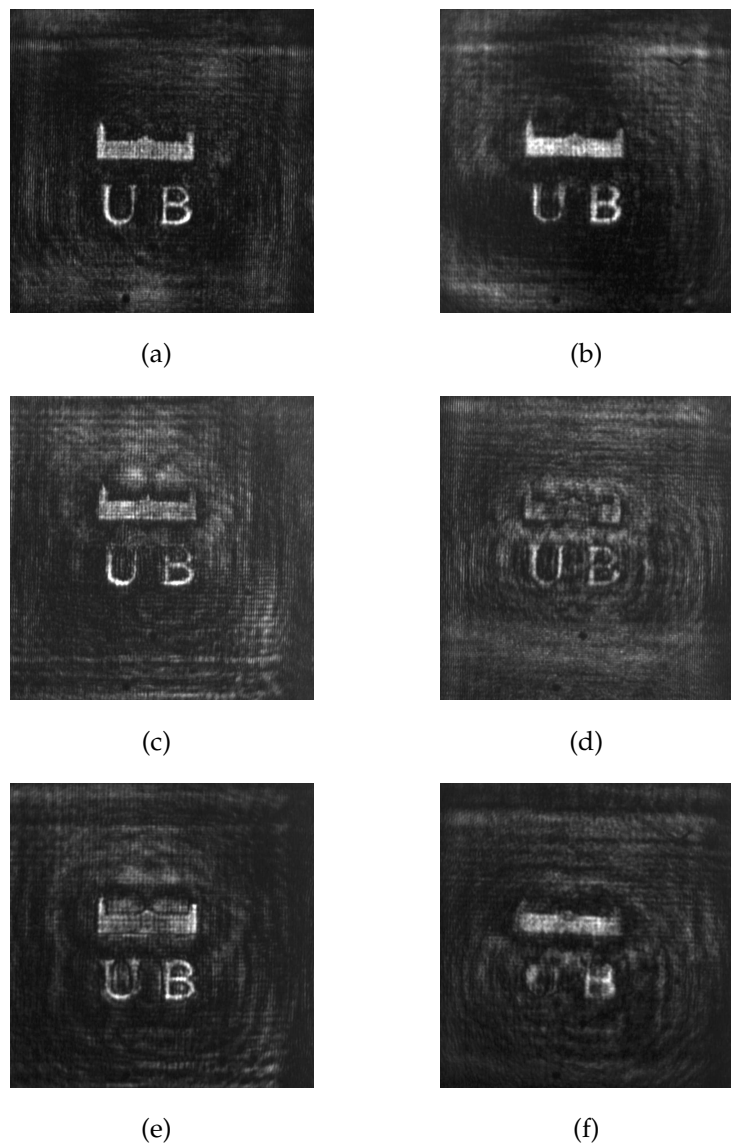


Figura 6.14: Imágenes experimentales de las reconstrucciones del logo (con $\lambda = 658$ nm y $\Delta p = 0,04$ mm): (a) full complex a 240.88 mm, (b) full complex a 324.838 mm, (c) parte real a 240.88 mm, (d) parte imaginaria a 240.88 mm, (e) parte real a 324.838 mm, y (f) parte imaginaria a 324.838 mm

donde las letras aparecen perfectamente focalizadas mientras que el edificio aparece sin enfocar, en cambio en la figura 6.15(a) se muestra la reconstrucción a 324.838 mm, donde es el edificio el que aparece enfocado y las letras aparecen desenfocadas, tal como se vió en las simulaciones (figuras 6.7(a) y (b)).

En todas las imágenes experimentales de las reconstrucciones se puede apreciar cierto ruido causado por la difracción de Fresnel de un cuadrado. Esta difracción se corresponde a la abertura de la pantalla, ya que en la práctica la reflectividad del mo-

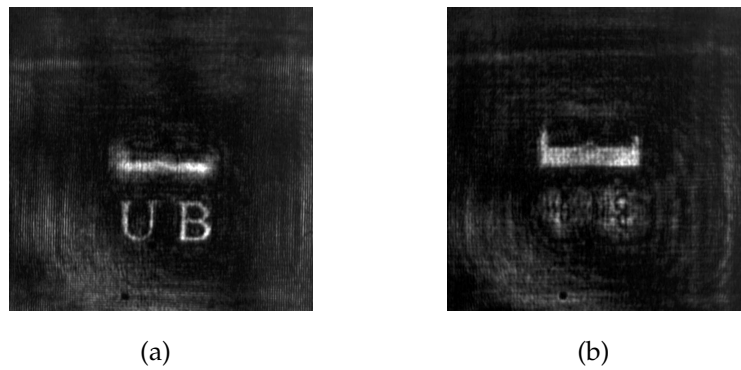


Figura 6.15: Imágenes de las reconstrucciones experimentales con el logo a dos distancias: (a) a 240.88 mm, donde focalizan las letras y (b) a 324.838 mm, donde focaliza el edificio

dulador nunca es cero, aunque en las curvas operativas teóricas el nivel de gris 128 debería dar una amplitud de modulación nula. En las reconstrucciones complejas totales se puede apreciar además un fondo que no es completamente constante, debido a que los patrones de interferencia entre las pantallas (cuando ambas muestran una imagen constante) no son constantes en toda la dimensión de los dispositivos, aún estando a la misma distancia, como se pudo apreciar en las esquinas de las reconstrucciones complejas anteriores. Esto es consecuencia de la falta de planitud total de los moduladores, que según el fabricante es mejor que $\lambda/4$ y típica de $\lambda/8$. Si estos efectos no son considerados las reconstrucciones que se obtienen presentan un gran acuerdo con las simulaciones realizadas.

6.4.1. Factores de error del montaje

A parte de los efectos anteriormente mencionados, que introducen ruido en las reconstrucciones experimentales, hay otros efectos debidos al montaje experimental que se han de tener en cuenta, ya que pueden empeorar las reconstrucciones que se obtienen. El primero es el hecho que las pantallas y la lámina $\lambda/4$ tengan una longitud de trabajo adecuada a la del láser que se utiliza para iluminar el montaje. Si no es así, las curvas de las configuraciones de las pantallas teóricas se ven modificadas, introduciéndose un giro en ellas, de forma que la suma de ambas partes deja entonces una zona del plano complejo sin cubrir. Si las longitudes de onda son próximas este giro es pequeño, y solo se traduce en un pequeño aumento del error en las reconstrucciones a ciertas distancias en la que la distribución compleja tiene puntos en la zona del plano que no se cubre con las configuraciones. Otro aspecto que puede afectar a las curvas teóricas es el divisor de haz polarizante, si este no es del todo

ideal, es decir que deja pasar componente real cuando modula la parte imaginaria, hay que tener esta contribución en cuenta, que en el caso de ser constante para todos los valores de gris simplemente se debe añadir a la modulación de la parte real, con lo que tendremos que la curva para esta parte se debe compensar con este valor, lo que hace que el valor del cero se desplace, y la curva queda así mismo desplazada.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la distancia de propagación hasta el plano de reconstrucción sea la misma para las dos pantallas, es decir, la distancia relativa entre las pantallas y el divisor de haz ha de ser igual, de forma que la diferencia de camino óptico en cada uno de los brazos del montaje sea nula. Para ello utilizamos un micrómetro piezoeléctrico, con el que se puede obtener una precisión en la posición de $\lambda/2$. El efecto para una diferencia en el camino óptico en uno de los brazos se puede simular sumando una fase constante a la distribución compleja calculada con la transformada de Fresnel. En la figura 6.16 se pueden ver tres reconstrucciones simuladas del pez a 324.838 mm, utilizando la suma de la parte real ajustada a la curva RE y la parte imaginaria ajustada a la curva IM. A la parte imaginaria ajustada se le suma una fase constante, que simula la diferencia de camino óptico, y podemos observar como la reconstrucción es más ruidosa según la fase introducida sea mayor, con un desfase de 40° en la reconstrucción solo aparece un poco de ruido alrededor del pez, con 90° de desfase este ruido ha aumentado y con 180° apenas se aprecia la figura del pez. En la figura 6.17 se presenta un gráfico con los errores RMS entre la imagen del pez original y las de las amplitudes reconstruidas tras haber añadido una fase a la parte imaginaria, en ella podemos ver como el error en la reconstrucción aumenta hasta que la fase introducida es de 180° , que se corresponde a invertir totalmente los valores de fase, y por tanto invertir los valores imaginarios que se tenían. A partir de los 180° la situación vuelve a ser simétrica a la de se da de 0° a 180° .

Finalmente otro factor que puede afectar a las reconstrucciones que se obtienen es el pixelado de las pantallas, donde cada píxel cuenta con una zona activa que no tiene por que ser toda la área del píxel. Esto hace que las imágenes que se muestran en los dispositivos esten discretizadas, y por tanto la distribución compleja ajustada que reconstruye el objeto también lo este. Esta discretización se puede representar como una multiplicación de la distribución que forma el holograma, $U(x, y, 0)$, por una red de deltas de Dirac:

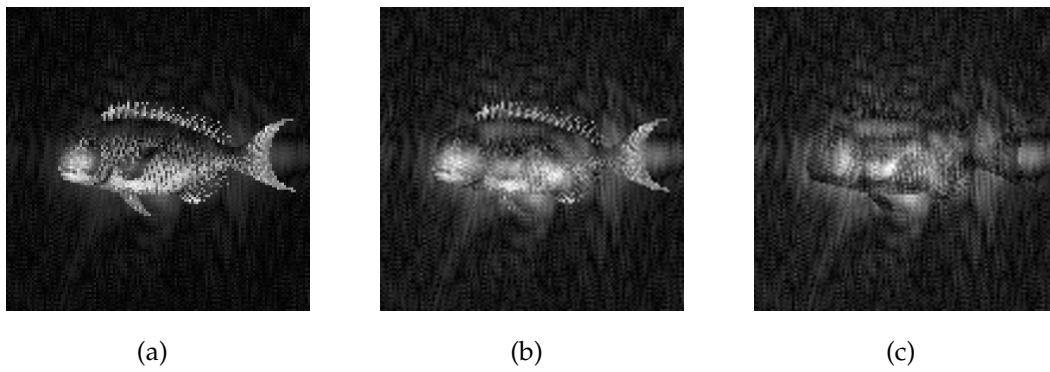


Figura 6.16: Imágenes de la amplitud de las reconstrucciones del pez a 324.838 mm, con una fase constante sumada a la parte imaginaria: (a) de 40°, (b) de 90° y (c) de 180°

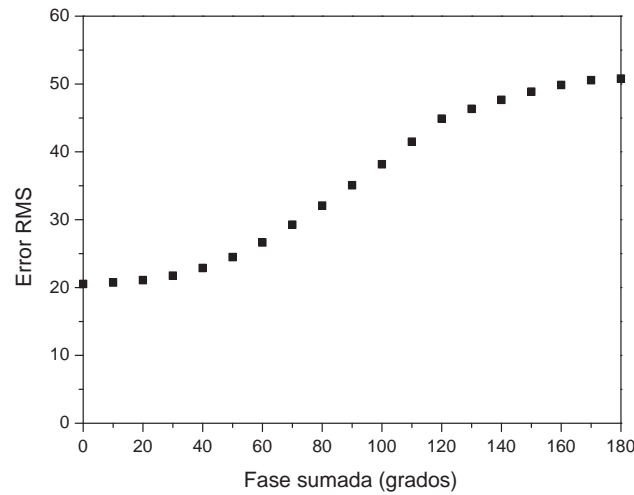


Figura 6.17: Gráfico del error RMS entre las imágenes de amplitud del pez ideal y las de las reconstrucciones a 324.838 mm con una fase constante sumada a la parte imaginaria

$$U_{pix}(x, y, 0) = U(x, y, 0) \left(\sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \delta(x - m\Delta p, y - n\Delta p) \right) \quad (6.9)$$

Donde Δp es el período del pixelado, que en el caso de las pantallas de reflexión que utilizamos es de $40 \mu\text{m}$. Esta distribución discretizada es la que se propagará mediante la transformada de Fresnel, utilizando la ecuación 2.24, donde se relaciona la transformada de Fresnel con la de Fourier, tenemos que la reconstrucción discretizada del objeto, $U_{pix}(x, y, d)$, a una distancia d será:

$$\begin{aligned}
U_{pix}(x, y, d) &= \frac{e^{ikd}}{i\lambda d} e^{(\frac{ik}{2d}(x^2+y^2))} \text{TF}_{\lambda d}[U_{pix}(x_0, y_0, 0) e^{(\frac{ik}{2d}(x_0^2+y_0^2))}] = \\
&= \frac{e^{ikd}}{i\lambda d} e^{(\frac{ik}{2d}(x^2+y^2))} \text{TF}_{\lambda d} \left[U(x_0, y_0, 0) \left(\sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \delta(x_0-m\Delta p, y_0-n\Delta p) \right) e^{(\frac{ik}{2d}(x_0^2+y_0^2))} \right] = \\
&= \frac{e^{ikd}}{i\lambda d} e^{(\frac{ik}{2d}(x^2+y^2))} \text{TF}_{\lambda z}[U(x_0, y_0, 0) e^{(\frac{ik}{2d}(x_0^2+y_0^2))}] * \left(\frac{\lambda d}{\Delta p} \right)^2 \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \delta(x-m\frac{\lambda d}{\Delta p}, y-n\frac{\lambda d}{\Delta p}) = \\
&= U(x, y, d) * \left(\frac{\lambda d}{\Delta p} \right)^2 \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \delta(x-m\frac{\lambda d}{\Delta p}, y-n\frac{\lambda d}{\Delta p})
\end{aligned} \tag{6.10}$$

Con lo que se obtiene la reconstrucción del objeto original, $U(x, y, d)$, convolucionada con una red de deltas de Dirac, que lo que hacen es replicar la reconstrucción del objeto en distintas posiciones, con un período de $\lambda d/\Delta p$. Así para distancias de propagación pequeñas, este período puede ser menor que el tamaño del objeto, con lo que tendremos superpuestas las reconstrucciones, perdiendo calidad en la imagen. Por otro lado, a la hora de simular la reconstrucción de un holograma discretizado, en la que la distancia entre píxeles no sea nula, es decir, considerando unos píxeles en la que solo un porcentaje de la área es activa, se pueden tener problemas al utilizar el algoritmo de la FFT, ya que estas replicas periódicas se pueden reproducir dentro de la imagen simulada, por un problema de *aliasing* [GW93]. Este efecto del pixelado también se produce en el caso de utilizar las pantallas de transmisión, utilizadas en el capítulo anterior para obtener la modulación compleja multiplicando amplitud y fase.

Estos factores se hallan controlados en el montaje que utilizamos, y con el que, como hemos visto se puede representar información compleja completa mediante la suma de las partes real e imaginaria, como hologramas de Fresnel, con los que se realiza la reconstrucción de un objeto por propagación libre de la luz, sin la necesidad de utilizar ninguna lente en el montaje. La resolución de estos hologramas está limitada solo por el tamaño de las pantallas que se utilizan, ya que no hay ningún proceso de codificación a la hora de generarlos. Utilizando las dos pantallas simultáneamente obtenemos buenos resultados experimentales, que como hemos visto se corresponden con los resultados simulados. Utilizando solo una de las pantallas para representar la parte real o la imaginaria se pueden obtener reconstrucciones visualmente aceptables, aunque solo para determinadas distancias. Para obtener mejores resultados y representar distintos planos de reconstrucción es necesario utilizar el montaje

con las dos pantallas.