

Universidad de Cantabria

Tesis Doctoral

# FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ÓPTICA ADAPTATIVA

Vidal Fernández Canales

## Capítulo 11

# RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

En este trabajo se ha presentado un modelo global del proceso de formación de imágenes en los telescopios astronómicos dotados de sistemas de óptica adaptativa. Los resultados teóricos ya han sido contrastados con datos procedentes de simulación, y en este capítulo se comparan con valores experimentales. Como se explicó en el capítulo anterior, ante la dificultad de obtener e interpretar datos de sistemas reales, se utilizan pantallas de cristal líquido extraídas de un videoprojector para producir en el frente de onda el mismo efecto que la atmósfera y el sistema de óptica adaptativa. La caracterización de las pantallas de cristal líquido de que se dispone (*LCX012BLA* en un proyector *SONY VPL-V500QM*) ha mostrado que estas proporcionan un rango de desfase limitado, al que siempre se asocia una modulación de intensidad. Por tanto, no se pueden obtener resultados precisos en todas las condiciones. Cuanto menor sea la

varianza residual del frente de onda se espera lograr mejores resultados, porque el número de puntos con una fase que no pueda representar la pantalla será menor y la modulación de intensidad será menos determinante.

En el primer apartado se describen los aspectos técnicos de todos los componentes del montaje experimental. En el segundo apartado se muestran imágenes obtenidas tras introducir en la pantalla de cristal líquido, de uno en uno, los primeros polinomios de Zernike. Los resultados obtenidos son cualitativamente acordes con la teoría. A continuación se introducen en la pantalla de cristal líquido series de frentes de onda simulados según el método descrito en el capítulo cuarto, y se detecta la serie de correspondientes imágenes. Este experimento se repite en diversas condiciones de atmósfera y grado de corrección. Se demuestra que la distribución de la intensidad ajusta perfectamente a una distribución de Rice. En el caso de alto nivel de corrección se reproducen de forma precisa las predicciones teóricas de parámetros como la varianza residual, el cociente de Strehl o el cociente señal-ruido. Para bajo nivel de corrección los resultados sólo son precisos en el halo, mientras que en el centro de la imagen concuerdan cualitativamente con lo que se esperaba: se aprecia que la función densidad de probabilidad de la intensidad se ajusta a una distribución de Rice aunque la varianza residual de la fase es en ciertos casos menor que la teórica debido a la limitación en el rango de desfases que pueden introducir las celdas.

## **11.1 Montaje experimental**

En la figura 11.1 se muestra el esquema del montaje experimental que se ha utilizado para representar un telescopio dotado de sistema de óptica adaptativa. La figura 11.2 es una fotografía del montaje. En las secciones siguientes se describe cada uno de los elementos.

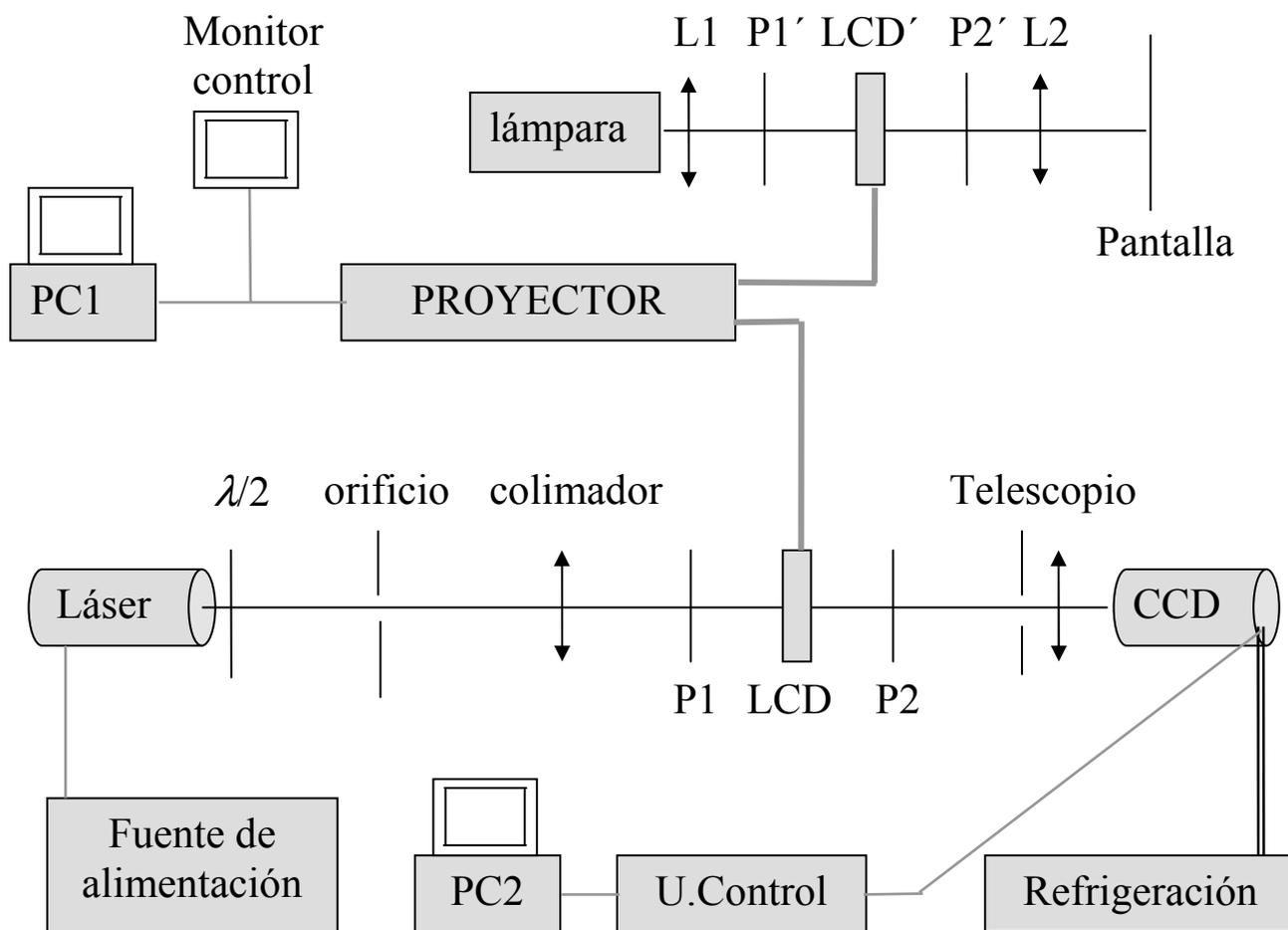


Figura 11.1 Esquema del montaje experimental que representa un telescopio dotado de un sistema de óptica adaptativa.

### 11.1.1 Objeto

La fuente de intensidad luminosa es un diodo láser de infrarrojo con doblador de frecuencia *GM32-1H*, que proporciona luz de 532 nm. Su potencia de salida es de 2 mW. Para que la intensidad luminosa que emite no fluctúe se conecta a una fuente de alimentación *Hewlett Packard 6224B*, y se mantiene el voltaje en 5 V y la intensidad en 0.37 A. Por último se destaca que la luz del láser es linealmente polarizada.

A continuación está situada una lámina retardadora de mica  $\lambda/2$  Melles Griot, para poder controlar el eje de polarización. Detrás se halla un orificio de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro, que actúa de objeto puntual. El orificio se halla en el foco objeto un sistema colimador de focal 400 mm, por lo que el frente de onda esférico que emana del objeto se convierte en un frente de onda plano.

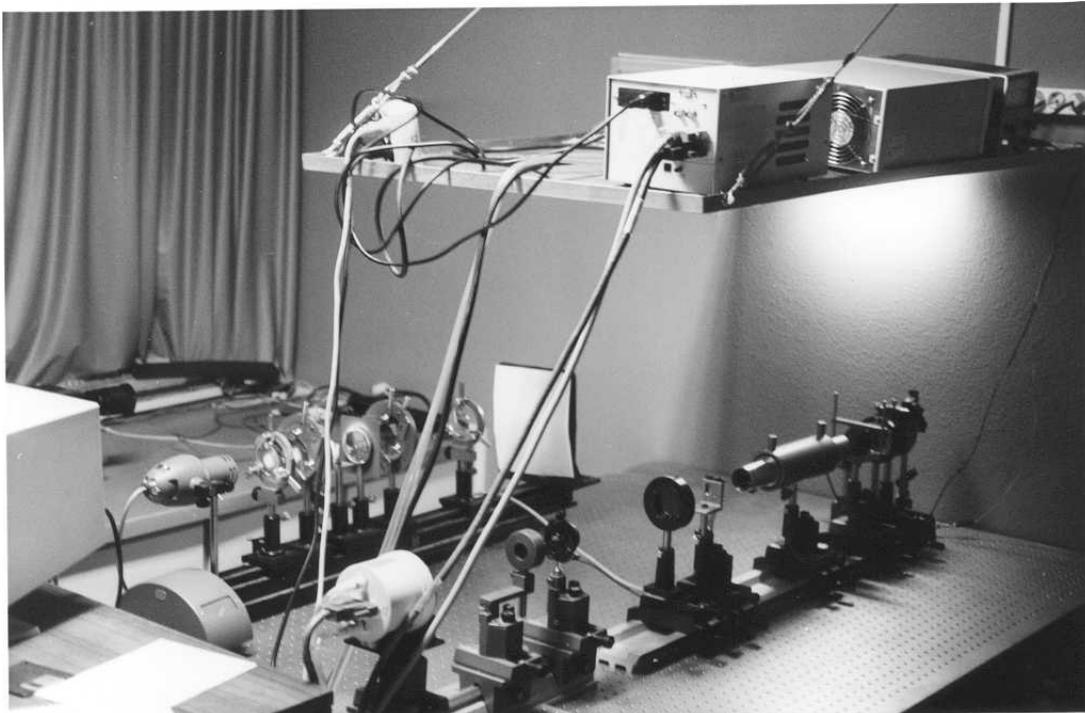


Figura 11.2 Fotografía en que se muestran los dispositivos ópticos que forman parte del montaje experimental. Sobre la mesa óptica en primer plano, el montaje principal, que consiste en el láser (que no se ve), el objeto, el colimador, la pantalla de cristal líquido con sus polarizadores, telescopio y cámara. A su izquierda el sistema para comprobar la imagen que se forma en la celda. Sobre la plataforma, la fuente de alimentación del láser, y las unidades de control y refrigeración de la cámara. No entran en la imagen los ordenadores ni el videoprojector.

### 11.1.2 Atmósfera y sistema de óptica adaptativa

Tras el colimador se encuentran un polarizador P1 y la pantalla de cristal líquido *LCX012BLA3* del proyector *SONY VPL-V500QM* que introduce en el frente de onda el efecto de la atmósfera y del sistema de óptica adaptativa. El eje de polarización del polarizador se coloca paralelo al director de la primera superficie de la celda. La intensidad luminosa incidente se puede controlar girando la lámina desfasadora situada junto al láser. Tras la pantalla de cristal líquido se sitúa un segundo polarizador P2 cruzado con el primero.

Ya se han detallado las características de las pantallas de fase. Sin embargo, aún hay un aspecto importante que explicar. Cuando se adquiere un proyector, es evidente que las pantallas de cristal líquido se encuentran en su interior, unidas mediante un cable impreso de escasos cm de longitud a los conectores ref. 1-764-829-11 de la placa. Para poder utilizarlos en montajes como los que se han descrito se necesita fabricar un alargador. Cada celda se une por su propio cable a un conector ref. 1-764-829-11, idéntico al de la placa, que está soldado a un conector hembra de cable paralelo de 25 pines. A este se añade un cable de la distancia deseada con conectores de 25 pines macho-macho, con correspondencia uno a uno entre los pines de la misma posición de ambos extremos (sirve por ejemplo el de *null modem*); por fin, a este cable se une un conector paralelo hembra soldado al conector 1-764-829-11, como el anterior, al que se conecta un cable impreso que parte de la placa. El esquema se muestra en la figura 11.3<sup>1</sup>. En la figura 11.4 se observa la celda de cristal líquido y el sistema de colimación. Se puede observar que el cable que trae la celda de fábrica se une a un cable de puerto paralelo. El otro extremo del cable se ve en la figura 11.5. Se une a un conector hembra soldado al conector *SONY* 1-764-829-11. Este último se une a la placa del videoprojector mediante un cable impreso idéntico al que sale de la celda (24 pistas de 0.5 mm separadas 1 mm entre sí).

---

<sup>1</sup> Se ha elegido este esquema de conexión, utilizado en la UAB, por ser robusto y relativamente sencillo.

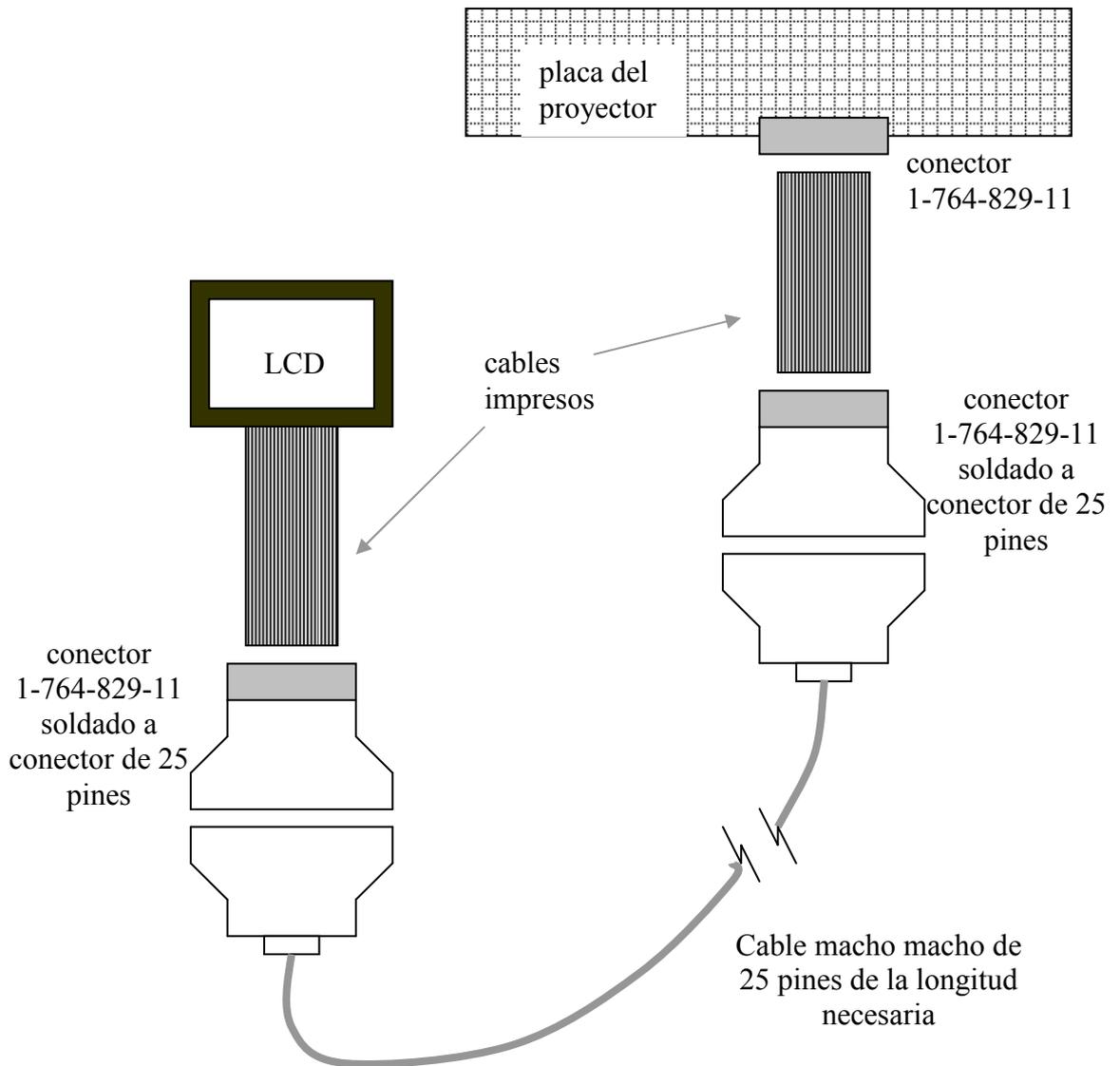


Figura 11.3 Esquema de los cables necesarios para utilizar las celdas lejos del videoprojector.

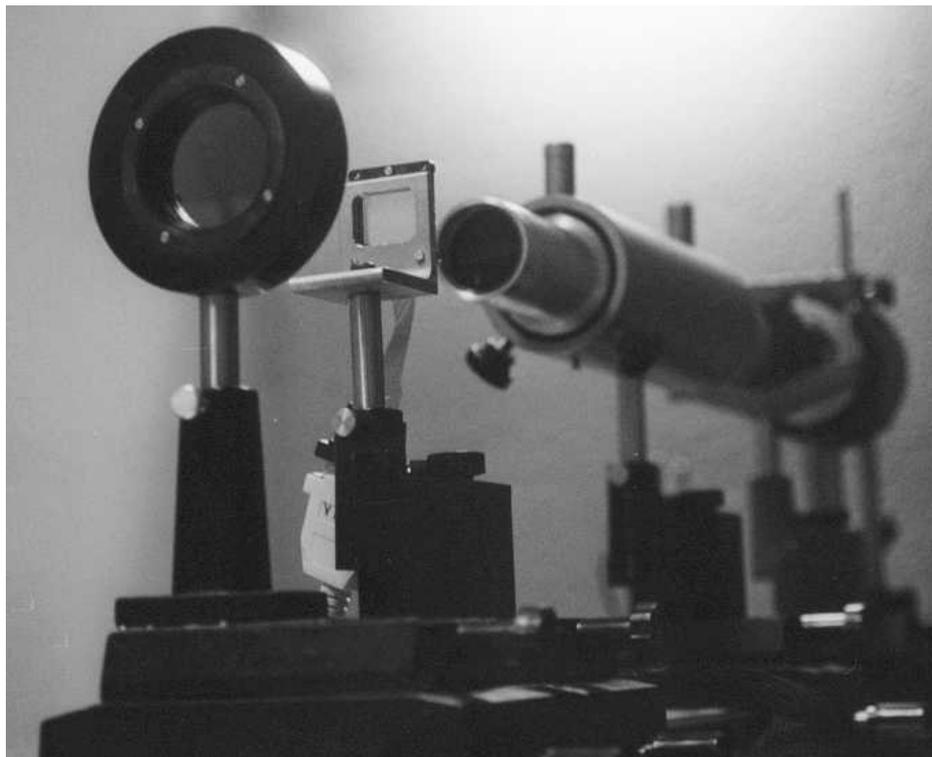


Figura 11.4 La celda de cristal líquido se une a un cable de puerto paralelo mediante los conectores descritos en la figura anterior.

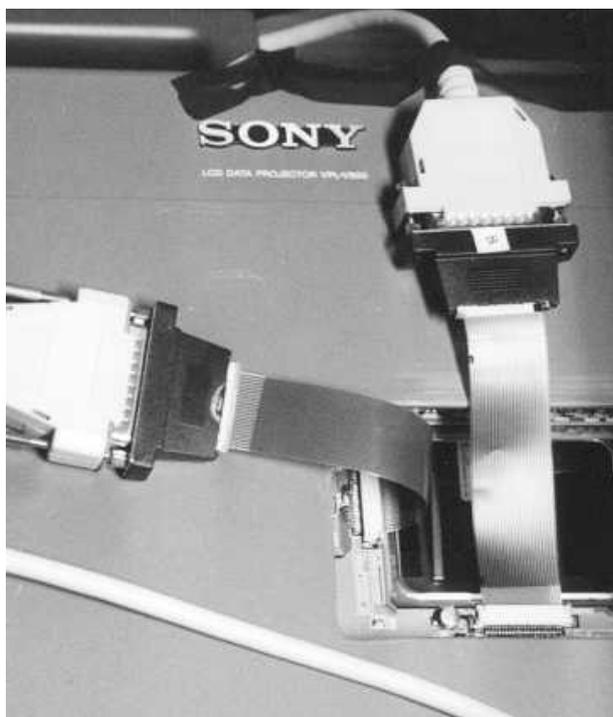


Figura 11.5 Unión a la placa del videoprojector de los cables que proceden de la celda de cristal líquido.

### 11.1.3 Sistema de control

El frente de onda se calcula en un PC que cuenta con dos tarjetas gráficas PCI. La tarjeta primaria se conecta al propio monitor del PC, mientras que el frente de onda se envía a la segunda tarjeta y se introduce en el proyector a través de la entrada estándar *INPUT A*. Para controlar en todo momento lo que se envía, se cuenta con un conmutador que permite desviar esta señal a un segundo monitor (monitor de control). Además se cuenta con un montaje para determinar si la pantalla representa correctamente la señal enviada. Para observar la figura de fase que proporciona la celda es preciso convertirla en intensidad. Con tal fin, el montaje consta de una lámpara, seguida de una lente colimadora, que ilumina una de las pantallas de cristal líquido situada entre dos polarizadores  $P1'$  y  $P2'$ . Tras estos elementos se sitúa otra lente que forma en una pantalla la imagen de la figura de fase que se representa en la celda. Por supuesto, se envía a ambas celdas LCD y LCD' idéntica señal. En la figura 11.6 se muestra una fotografía de este montaje. En la figura 11.7 se puede ver el monitor de control sobre el PC que envía la señal al videoprojector. Por tanto, se dispone de sistemas para cerciorarse del correcto funcionamiento de cada etapa del proceso.

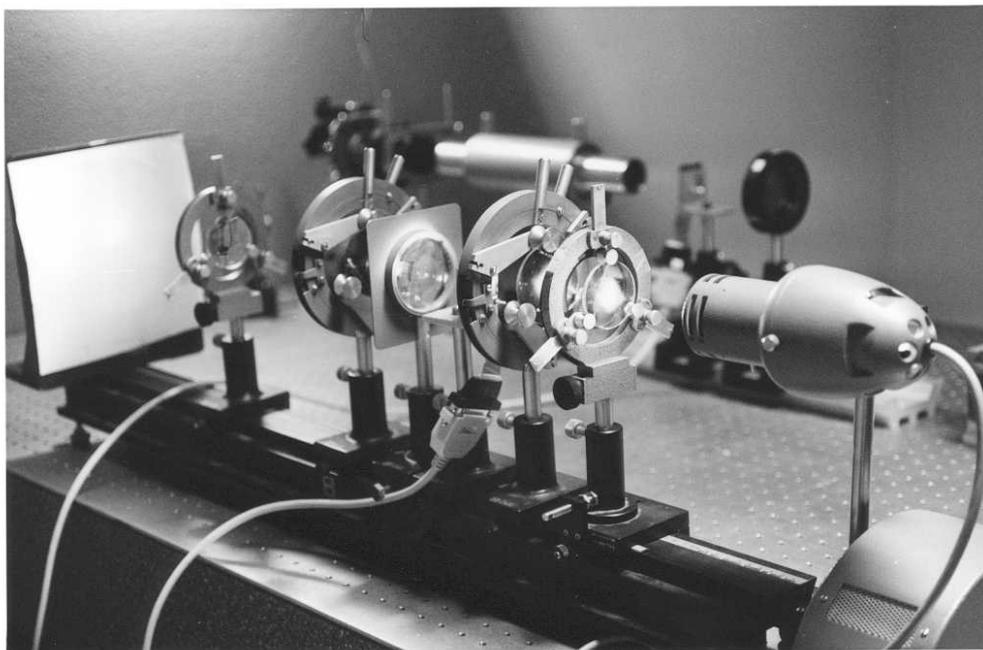


Figura 11.6 Fotografía del montaje destinado a comprobar la imagen que se introduce en la celda.



Figura 11.7 Fotografía del monitor de control, sobre el PC que envía la señal al videoprojector, y del PC de adquisición de datos y control de la cámara.

### 11.1.4 Telescopio

El frente de onda compensado llega al telescopio que forma la imagen. El telescopio está formado por un objetivo de microscopio de focal 20 mm, delante del cual se sitúa un diafragma. En los telescopios astronómicos la relación entre abertura y focal suele ser:

$$D = \frac{f'}{11} \quad (11.1)$$

Para cumplir esta condición se escoge una abertura de 1.8 mm. Se considera que el área de coherencia del frente de onda sin compensar,  $r_0$ , es igual a la distancia entre *pixeles*, aproximadamente 42  $\mu\text{m}$ . Por tanto, en estas condiciones experimentales el cociente entre la pupila del telescopio y el parámetro de Fried es:

$$\frac{D}{r_0} = \frac{1.8 \text{ mm}}{42 \mu\text{m}} \approx 40 \quad (11.2)$$

que es un valor muy similar al utilizado con frecuencia en la simulación. Correspondería a un parámetro de Fried de 10 cm (situación habitual en un observatorio) y un telescopio de 4 m de diámetro. Para conseguir valores distintos de  $D/r_0$  se requiere modificar alguno de los componentes. En este trabajo, para realizar experimentos con  $D/r_0 = 20$ , se varía  $r_0$  enviando la misma señal a cuatro pixeles, de forma que cada grupo de 2x2 pixeles forman una misma unidad o área de coherencia.

### 11.1.5 Sistema de adquisición de datos

El telescopio forma una imagen en su plano focal. En este se coloca un objetivo de microscopio que la aumenta y traslada al plano de una cámara de alta *eficiencia* *Photometrics CH350* con un detector CCD *SI003BP* grado 1 con recubrimiento *VIS-AR*. Al ser un sistema con iluminación trasera la eficiencia cuántica es del 80% en la longitud de onda empleada. La figura 11.8 muestra la curva espectral de la eficiencia cuántica. El detector tiene una resolución de 1024x1024 pixeles cuyo tamaño es de 24  $\mu\text{m}$ . Se mantiene a  $-35^\circ\text{C}$  mediante refrigeración líquida para disminuir la corriente de oscuridad hasta 3.3 electrones por pixel y segundo. Los datos que recoge la cámara se procesan en un PC (ver figura 11.7), conectado a la unidad de control de la cámara mediante una tarjeta PCI de comunicación de 32 bits *S3-HCK-WIN4*. El rango dinámico es muy importante porque el sistema puede trabajar con datos de 16 bits a 40 kHz (también de 12 –500 kHz- o 14 –200 kHz- en situaciones que requieran mayor velocidad de transferencia). Las imágenes se procesan usando un programa de tratamiento de imágenes (*Image Pro 3.0, Media Cybernetics*).

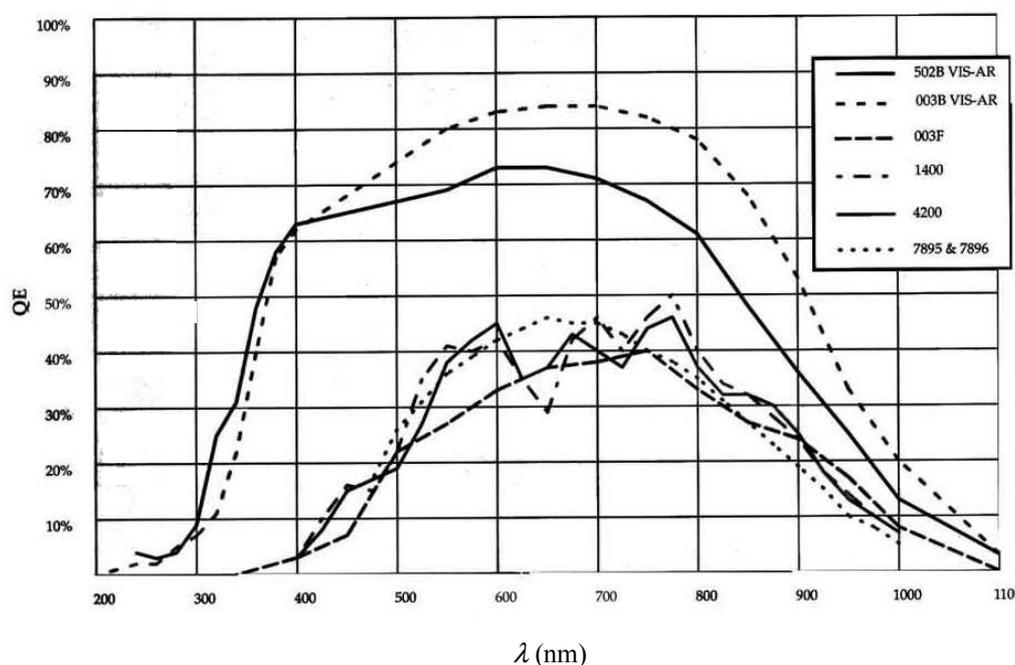


Figura 11.8 Curva espectral de la eficiencia cuántica del detector 003B con recubrimiento VIS-AR (línea discontinua de trazo corto), según los datos proporcionados por el fabricante.

## 11.2 Imágenes con aberraciones conocidas

En la figura 11.9 se muestran los primeros 15 polinomios de Zernike. Estos polinomios se relacionan con las aberraciones clásicas (Roddier N. 1990, Born y Wolf 1993). Se ha comprobado que las pantallas reproducen estos modos proyectando en la pantalla la figura que se halla en el LCD'. En este apartado se muestran los resultados obtenidos tras introducir en la pantalla de cristal líquido LCD, de uno en uno, los primeros polinomios de Zernike. Al observar el efecto en las imágenes, se puede comprobar si efectivamente el desfase introducido en el frente de onda para un determinado modo de Zernike corresponde a la aberración asociada.

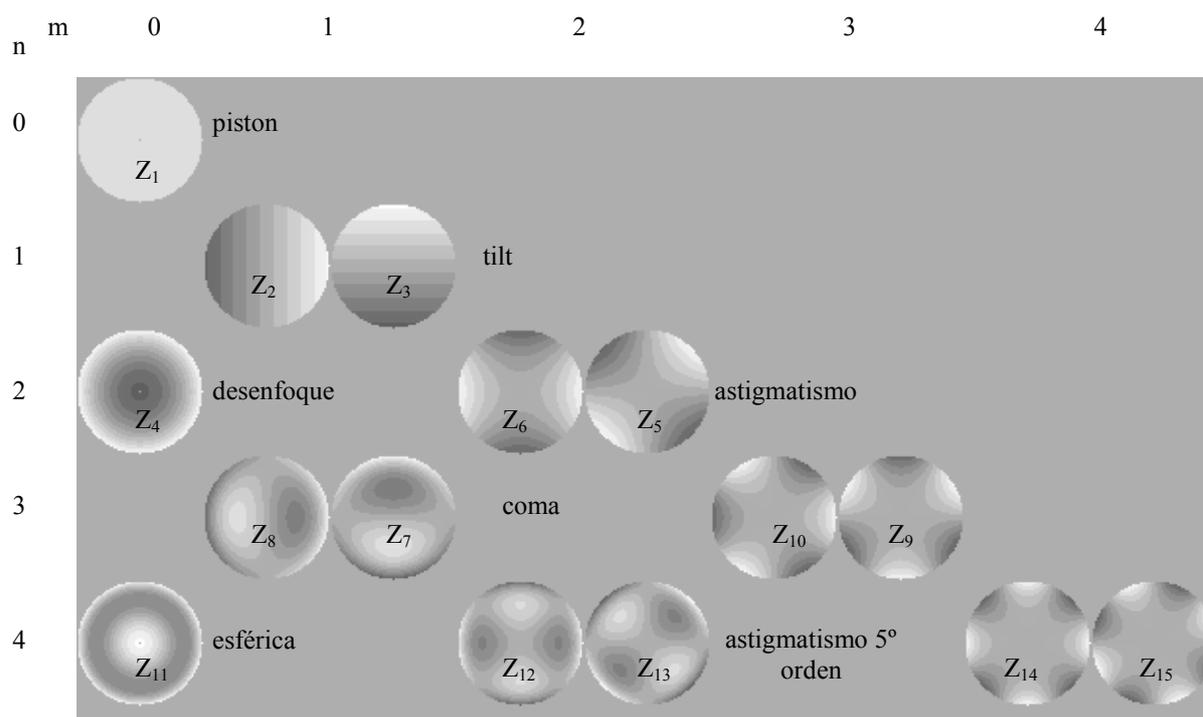


Figura 11.9 Representación de los 15 primeros polinomios de Zernike.

### 11.2.1 Efecto del *tilt*

El *tilt* consiste en la introducción de una inclinación global en el frente de onda, lo que produce un desplazamiento lateral de la imagen. Se ha introducido en la pantalla de cristal líquido un frente de onda formado únicamente por el polinomio  $Z_2$ , que corresponde a una inclinación del frente de onda que aumenta en la dirección  $O'X'$ . (figura 11.10). Su efecto en la imagen detectada experimentalmente se observa en la figura 11.11. En ella se muestra un corte de la *PSF* contenido en el plano  $OXZ$  y otro en el plano  $OYZ$ . Como se aprecia la imagen se desplaza según el eje  $OX$ . De igual forma se introduce el polinomio  $Z_3$  y en la figura 11.12 se observa que el desplazamiento de la imagen se produce en este caso en la dirección  $OY$ , como predice la teoría. Por tanto se puede concluir que la pantalla de fase introduce el *tilt* de forma correcta, dado que el resultado en la imagen es el esperado.

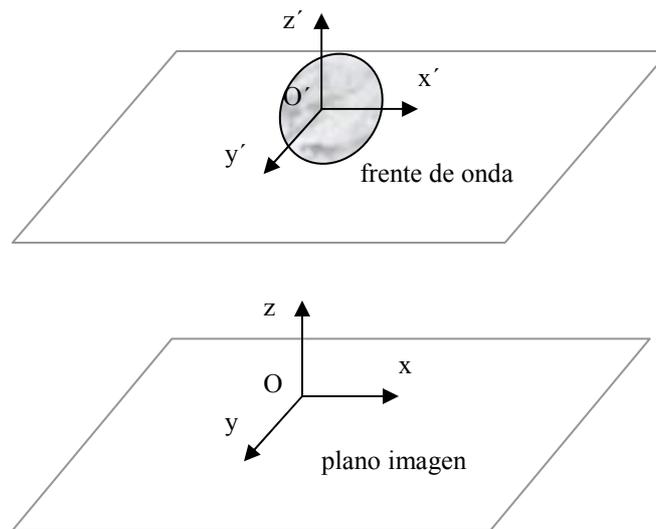


Figura 11.10 Sistema de ejes en el plano de la pupila y en el plano imagen.

### 11.2.2 Desenfoque y aberración esférica

Se introduce en la celda un frente de onda con el polinomio  $Z_4$ , que corresponde al desenfoque, se obtiene una imagen con simetría circular, más achatada que la función de Airy, pero no muy distinta debido a que el rango de desfases que introduce el LCD es pequeño. De igual manera al introducir un frente de onda cuya única aberración es la esférica, modo  $Z_{11}$ , la imagen tiene simetría circular y menor resolución que la función de Airy. En la figura 11.13 se muestra el corte de cada una de estas imágenes con el plano  $OXZ$  y se compara con idéntico corte en la función de Airy, para que se aprecie el ensanchamiento de la  $PSF$ .

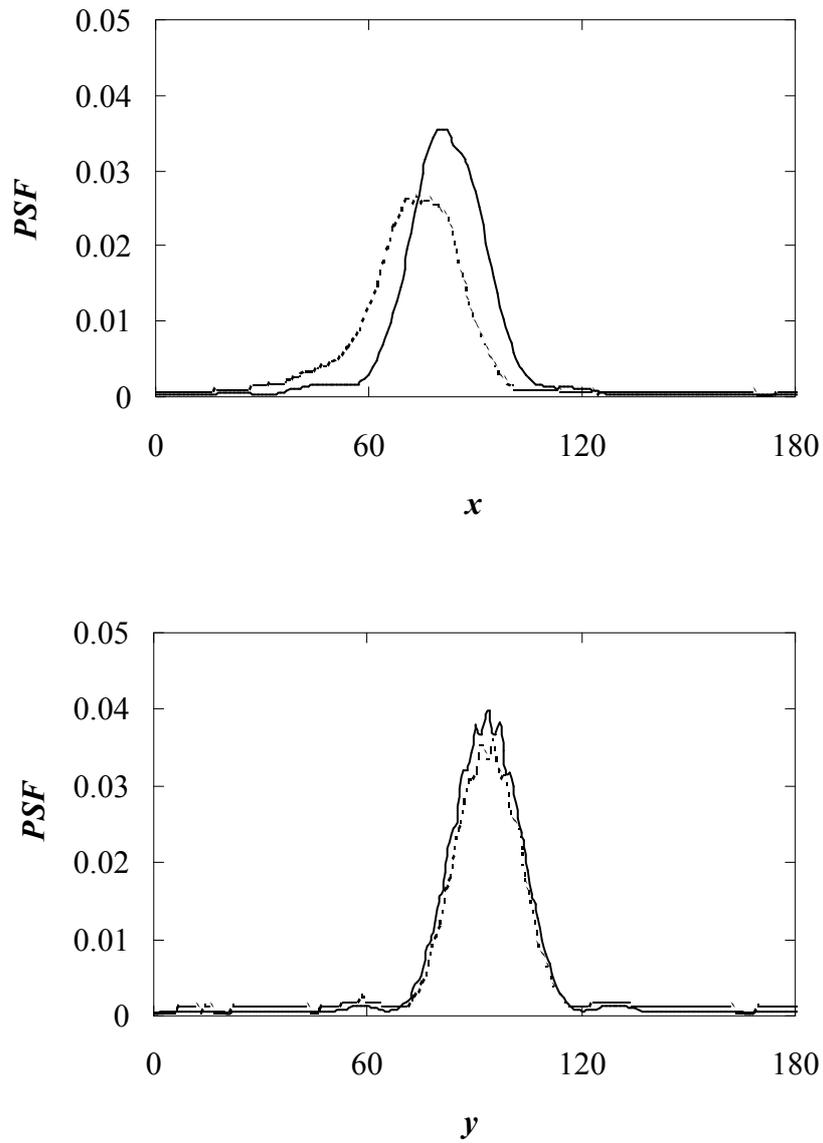


Figura 11.11 Efecto del  $tilt Z_2$  en la imagen detectada experimentalmente. Se muestra un corte de la  $PSF$  experimental con  $tilt$  (línea discontinua) y sin  $tilt$  (línea continua). En la figura superior el corte está contenido en el plano  $OXZ$ , y en la inferior en el plano  $OYZ$ . Como se aprecia la imagen se desplaza según el eje  $OX$ .

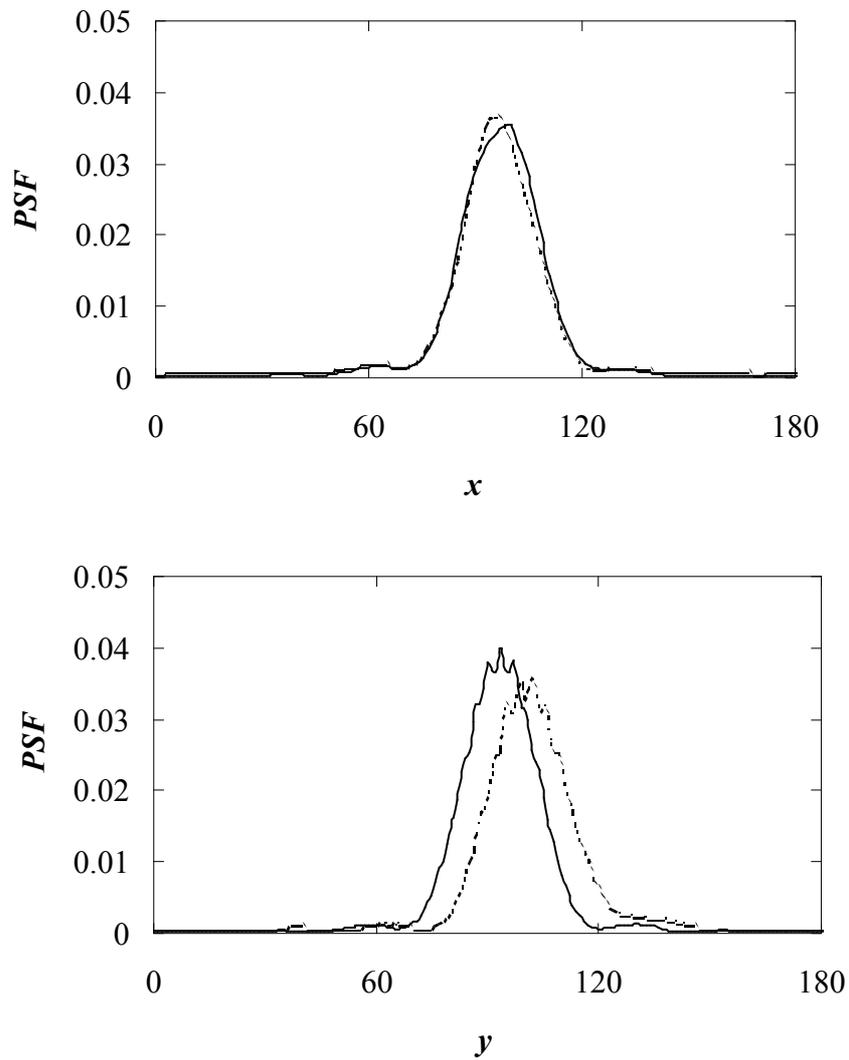


Figura 11.12 Efecto del  $tilt Z_3$  en la imagen detectada experimentalmente. Se muestra un corte de la  $PSF$  experimental con  $tilt$  (línea discontinua) y sin  $tilt$  (línea continua). En la figura superior el corte está contenido en el plano  $OXZ$ , y en la inferior en el plano  $OYZ$ . Como se aprecia la imagen se desplaza según el eje  $OY$ .

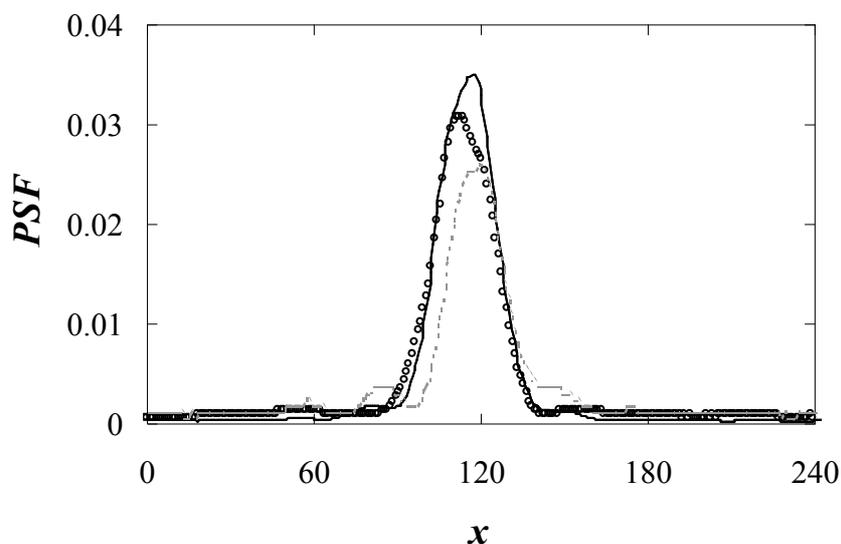


Figura 11.13 Efecto del desenfoque y de la aberración esférica. Se muestra un corte de la *PSF* contenido en el plano *OXZ*. La línea continua representa la imagen sin aberraciones. La línea discontinua la imagen con desenfoque y la de círculos la imagen con esférica.

### 11.2.3 Coma y astigmatismo

Para estudiar el efecto del coma se introducen en la celda frentes de onda formados por un solo modo de Zernike, el  $Z_7$  y el  $Z_8$ . Las imágenes que se detectan se muestran en la figura 11.14. También se muestra la imagen que corresponde a un frente de onda sin aberraciones, la función de Airy. Se aprecia que se ha perdido la simetría circular; cada imagen, sin embargo, presenta la simetría característica del modo que le corresponde. De igual forma se estudia el efecto del astigmatismo. Se representan los modos  $Z_5$  y  $Z_6$ , y los modos del astigmatismo de 5° orden,  $Z_{12}$  y  $Z_{13}$ . En la figura 11.15 la simetría de las imágenes es de nuevo similar a la de las aberraciones correspondientes. El brillo y contraste en las imágenes ha sido modificado para que se observe de forma óptima la analogía entre la simetría de la imagen y del modo de Zernike correspondiente. Por tanto, estas imágenes no deben ser comparadas suponiendo que han sido obtenidas en las mismas condiciones.

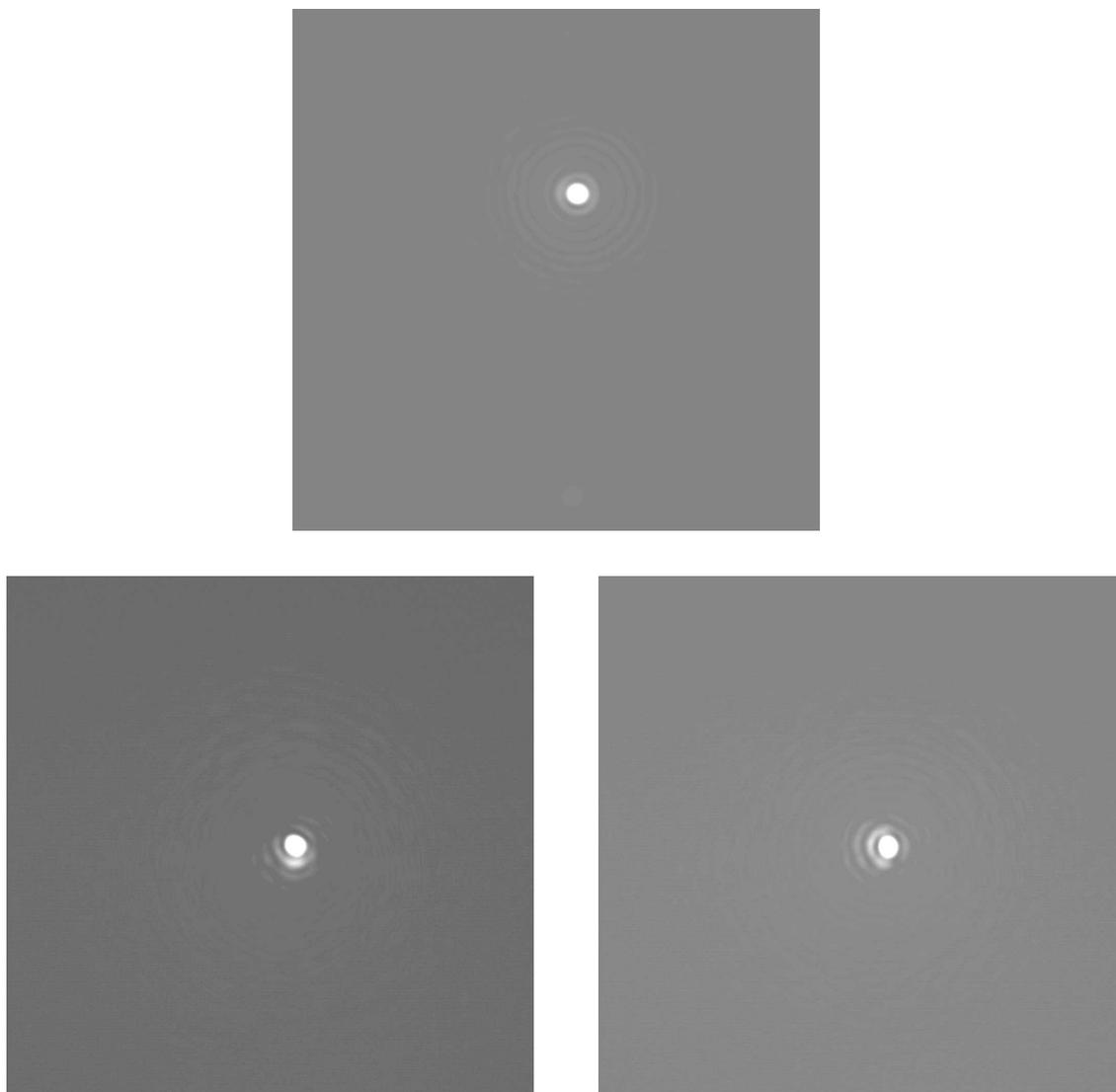


Figura 11.14 En la parte superior se muestra la función de Airy, que es la imagen que corresponde a un frente de onda sin aberraciones. Para estudiar el efecto del coma se introducen en la celda frentes de onda formados por un solo modo de Zernike, el  $Z_7$  (abajo izquierda) y el  $Z_8$  (arriba derecha). Se aprecia que se pierde la simetría circular; cada imagen, sin embargo, presenta la simetría característica del modo que le corresponde.

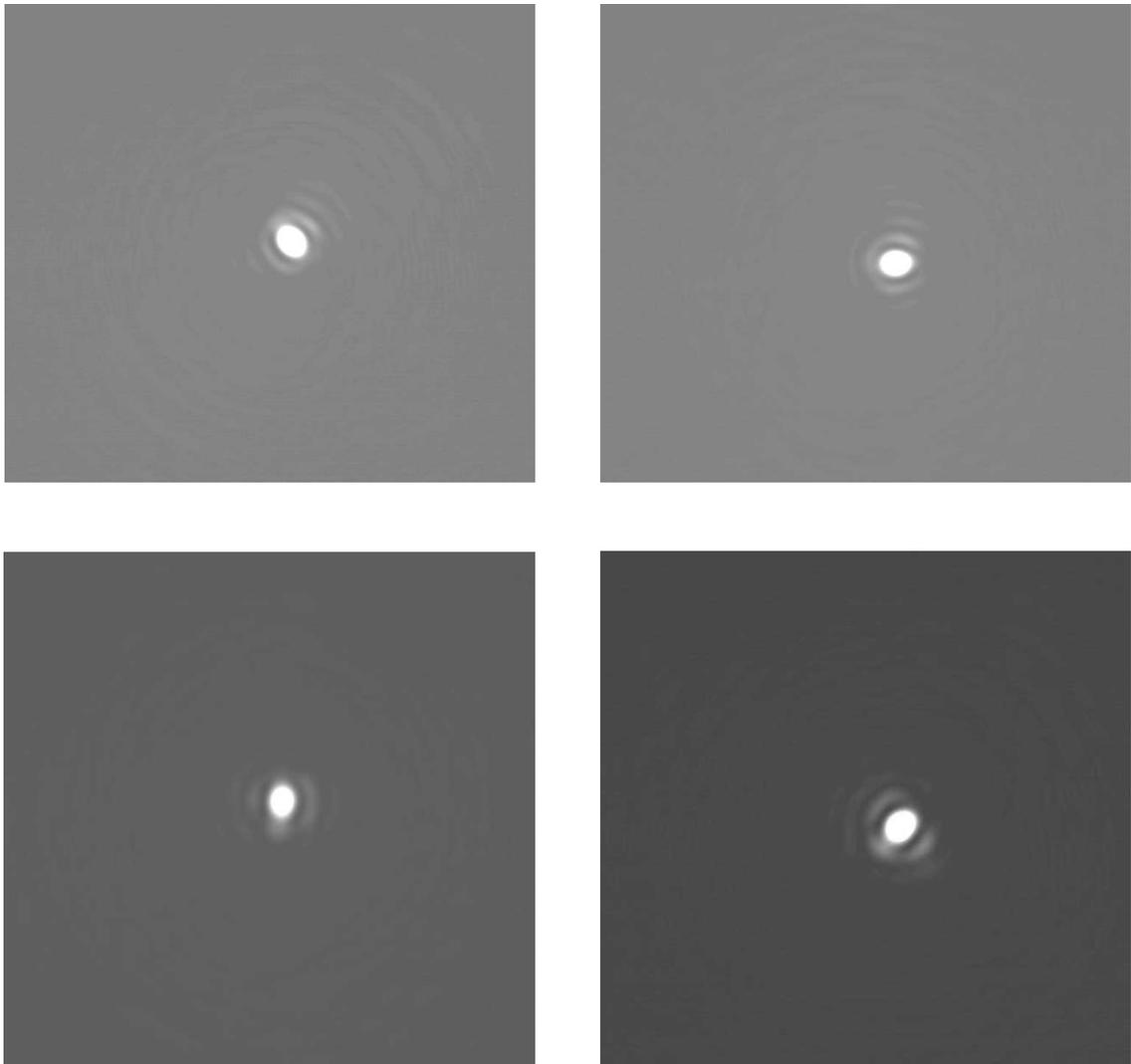


Figura 11.15 Imágenes obtenidas al introducir frentes de onda que corresponden a los modos de astigmatismo  $Z_5$  (arriba izquierda) y  $Z_6$  (arriba derecha), y los modos de astigmatismo de 5° orden,  $Z_{12}$  (abajo izquierda) y  $Z_{13}$  (abajo derecha). La simetría de las imágenes es de nuevo similar a la de las aberraciones correspondientes.

## 11.3 Función densidad de probabilidad

En este apartado se compara la distribución de la intensidad deducida teóricamente en el capítulo 7 con los histogramas que se obtienen experimentalmente utilizando el montaje previamente descrito. La distribución de Rice se compara con las curvas experimentales para distintas condiciones de atmósfera, para diferentes niveles de corrección y en varios puntos del plano imagen.

### A. Caso $D/r_0=40$

Se introducen en la pantalla de cristal líquido cuatro series de 50 frentes de onda calculados con una razón de 40 entre el diámetro del telescopio y el parámetro de Fried. En cada serie el grado de corrección es constante: 40, 80, 150 y 250 modos corregidos (en la figura 11.16 se muestran ejemplos de los frentes de onda). Se detectan las correspondientes series de 50 imágenes. Se construyen los histogramas normalizados de la intensidad luminosa en el centro de la imagen, y en tres coronas circulares alrededor de él. La primera corona se sitúa en el borde del pico, la segunda en el primer anillo y la tercera en el halo de *speckle*<sup>2</sup>. En las figuras 11.17 a 11.20 se muestran estos histogramas y se comparan con una distribución de Rice (7.34) ajustada. Se puede apreciar que la distribución de Rice ajusta perfectamente al histograma experimental en la mayoría de casos. Las ligeras desviaciones existentes se podrían suprimir aumentando el número de imágenes empleadas. Se puede apreciar que al alejarse del centro la distribución evoluciona desde un función de tipo gaussiano hacia una exponencial propia del halo de *speckle*, como se predijo teóricamente en el tema 7. En las gráficas que corresponden a la región en el halo de *speckle* el histograma se ajusta además con precisión a una exponencial.

---

<sup>2</sup> Se ha de destacar que las coronas definidas no son exactamente idénticas en los distintos grados de corrección.

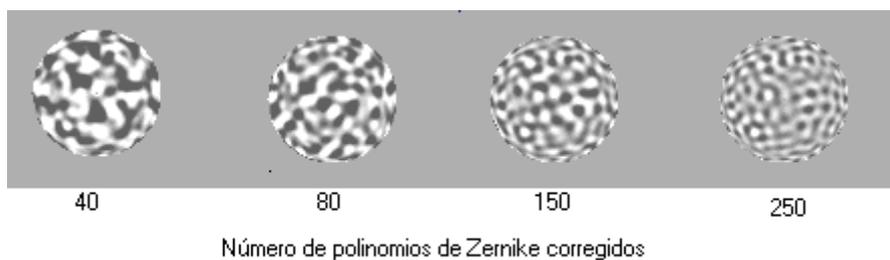


Figura 11.16 Frentes de onda simulados con  $D/r_0=40$  y distintos grados de corrección: 40, 80, 150 y 250 modos corregidos.

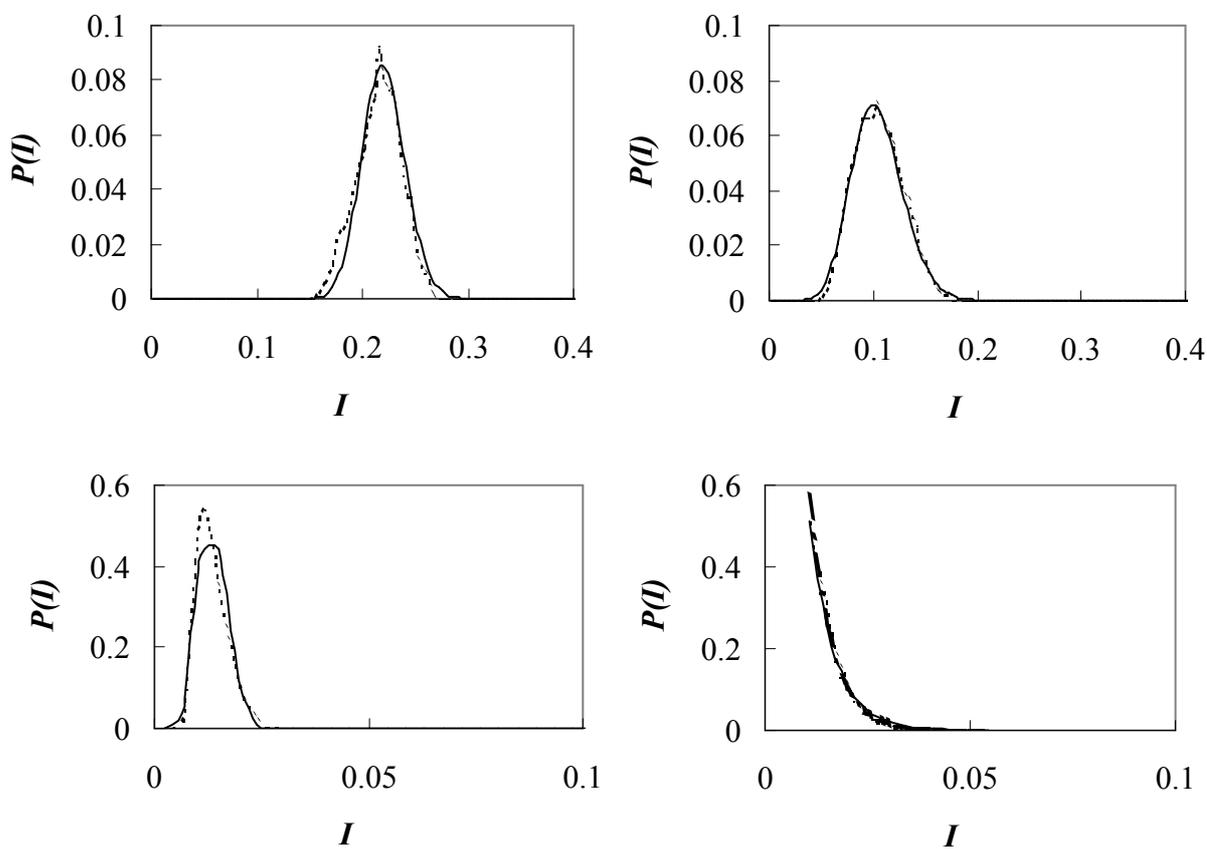


Figura 11.17 Histogramas normalizados de la intensidad luminosa (línea discontinua) en el centro de la imagen (arriba izqda.), y en tres coronas circulares alrededor de él. La primera (arriba dcha.) se sitúa en el borde del pico, la segunda (abajo izqda.) en el primer anillo y la tercera en el halo de *speckle* (abajo dcha.), con  $D/r_0=40$  y 40 modos de Zernike corregidos. Se comparan con una distribución de Rice (7.34) (línea continua). En la última gráfica también se muestra una exponencial, propia del *speckle* (línea con puntos intercalados).

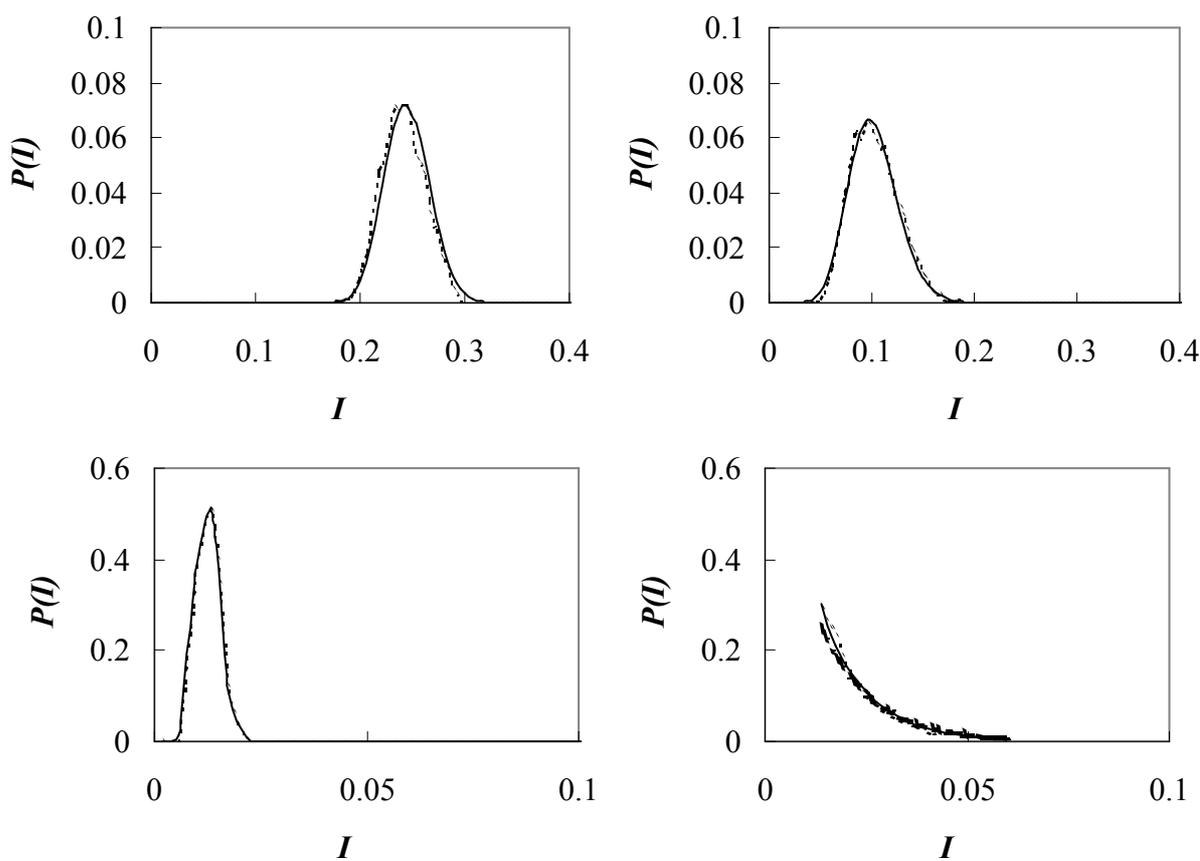


Figura 11.18 Histogramas normalizados de la intensidad luminosa (línea discontinua) en el centro de la imagen (arriba izqda.), y en tres coronas circulares alrededor de él. La primera (arriba dcha.) se sitúa en el borde del pico, la segunda (abajo izqda.) en el primer anillo y la tercera en el halo de *speckle* (abajo dcha.), con  $D/r_0=40$  y 80 modos de Zernike corregidos. Se comparan con una distribución de Rice (7.34) (línea continua). En la última gráfica también se muestra una exponencial, propia del *speckle* (línea con puntos intercalados).

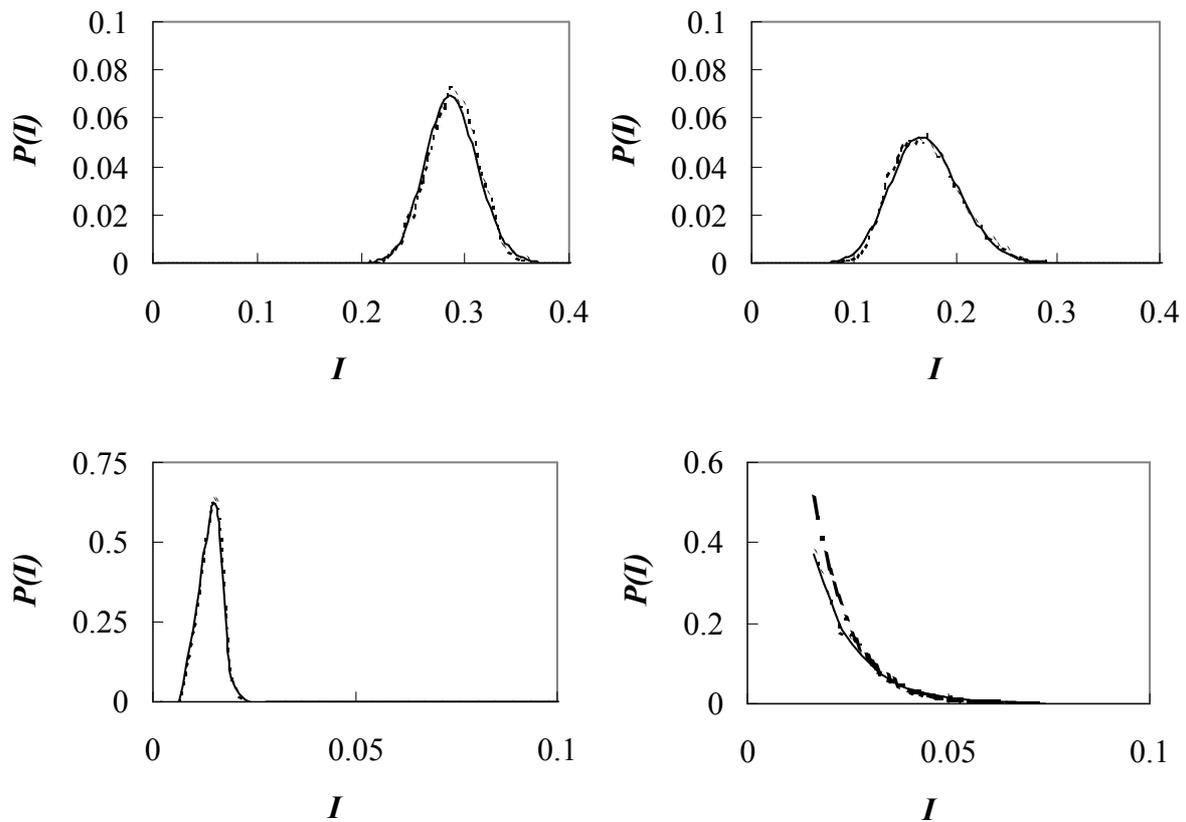


Figura 11.19 Histogramas normalizados de la intensidad luminosa (línea discontinua) en el centro de la imagen (arriba izqda.), y en tres coronas circulares alrededor de él. La primera (arriba dcha.) se sitúa en el borde del pico, la segunda (abajo izqda.) en el primer anillo y la tercera en el halo de *speckle* (abajo dcha.), con  $D/r_0=40$  y 150 modos de Zernike corregidos. Se comparan con una distribución de Rice (7.34) (línea continua). En la última gráfica también se muestra una exponencial, propia del *speckle* (línea con puntos intercalados).

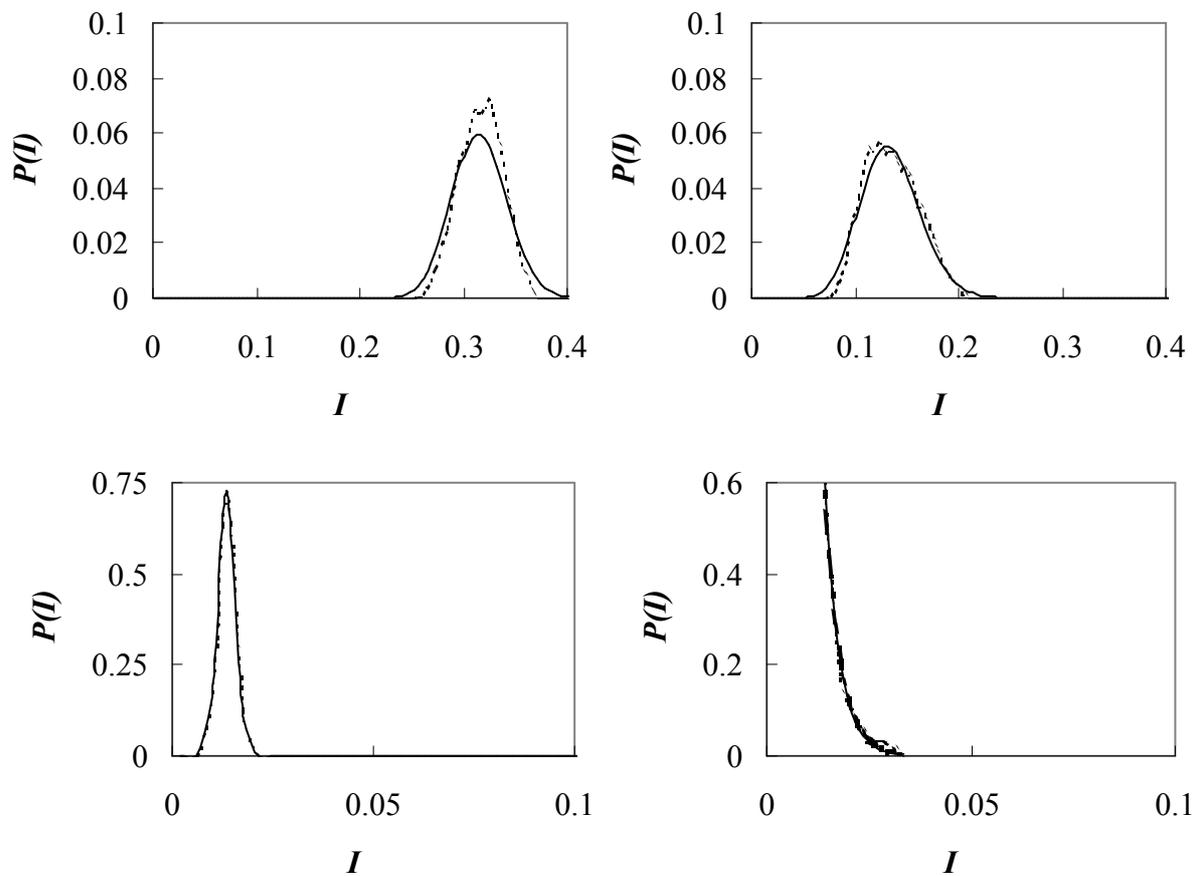


Figura 11.20 Histogramas normalizados de la intensidad luminosa (línea discontinua) en el centro de la imagen (arriba izqda.), y en tres coronas circulares alrededor de él. La primera (arriba dcha.) se sitúa en el borde del pico, la segunda (abajo izqda.) en el primer anillo y la tercera en el halo de *speckle* (abajo dcha.), con  $D/r_0=40$  y 250 modos de Zernike corregidos. Se comparan con una distribución de Rice (7.34) (línea continua). En la última gráfica también se muestra una exponencial, propia del *speckle* (línea con puntos intercalados).

En la figura 11.21 se observa el comportamiento del cociente señal-ruido en función de la posición. El  $SNR$  desciende a medida que nos alejamos del centro como se predijo en el apartado 7.5, donde se explicó su enorme importancia en buen número de aplicaciones. En el estudio para 80 modos corregidos se observa que los datos experimentales del  $SNR$  concuerdan con los teóricos únicamente en el halo de *speckle*. Sin embargo, en el centro de la imagen el valor experimental es superior al teórico. Esto se debe a que el rango de desfases que permite el modulador es limitado, y el desfase en el halo viene dado por la geometría (variación de la varianza residual al cambiar el plano de referencia) más que por el desfase que introduce el modulador. De la figura 10.16 se puede concluir que las pantallas de cristal líquido producen desfases entre  $-1.4$  rad y  $1.4$  rad en la configuración elegida para realizar el experimento. Como la distribución de la fase es gaussiana, con un  $D/r_0=40$  esto supone que la pantalla puede representar más del 80% de los valores de la fase simulada a partir de unos 200 polinomios corregidos (figura 11.22). Para rebajar este número habría que tomar un telescopio menor o una atmósfera más tranquila. Las fases que no pueden representarse hacen que el  $SNR$  sea más alto y que las curvas de 80 y 150 modos compensados se asemejen más de lo que se predice teóricamente. La modulación de intensidad asociada incrementa este efecto. Para evitar este problema, existen modelos de videoprojector más antiguos cuyas celdas ofrecen un mayor rango de desfases, pero suelen tener la desventaja de un control más lento y complicado. En cuanto a los modelos más modernos, la tendencia de los fabricantes es disminuir el grosor (y por ello la birrefringencia) de las pantallas, para aumentar la velocidad de respuesta. A pesar de este problema, en las siguientes figuras se observa que la evolución del cociente de Strehl, de la varianza residual y del cociente señal-ruido son cualitativamente correctas, y que concuerdan de forma precisa con la teoría en su evolución radial y en alta corrección.

La figura 11.23 muestra la varianza residual del frente de onda (en función del punto de observación en el plano imagen) para distintas correcciones. Estas curvas forman parábolas, como se explicó en el apartado 7.4, y se observa un buen ajuste entre teoría y experimento, con lo que se confirma el incremento de la varianza residual como consecuencia de la variación del plano de referencia.

La figura 11.24 muestra el cociente de Strehl en función del grado de corrección. El  $SR$  crece al aumentar la corrección, ya que la energía abandona el halo de *speckle* para

formar el pico de la función de Airy. Se observa que en alta corrección los valores teóricos y experimentales son muy similares, mientras que para baja corrección el  $SR$  experimental es más alto, por las limitaciones de la celda ya explicadas. En baja corrección la curva experimental ajusta bien a los valores obtenidos utilizando la aproximación de Marechal (6.21), en la que se introduce la varianza experimental representada en la figura anterior. Este hecho concuerda con la suposición de que el limitado rango de desfases produce un frente de onda con una compensación mayor que la teórica.

El  $SNR$  en el punto central se comporta de forma similar (figura 11.25). El valor experimental tiende hacia el teórico a medida que se aumenta el grado de corrección. La figura 11.26 muestra la varianza residual experimental en función del grado de corrección. En baja corrección es menor que la teórica, debido a que las limitaciones en el rango de desfases de la pantalla de cristal líquido no permiten representar los valores extremos de la fase. Conforme el nivel de corrección aumenta, la distribución de fases se estrecha y la varianza experimental tiende hacia la teórica. Para más de 200 modos corregidos son muy similares como se previó anteriormente.

### B. Caso $D/r_0=20$

En esta ocasión sólo se realiza el análisis para el punto central de la función de Airy. La figura 11.27 muestra ejemplos de frentes de onda con  $D/r_0=20$  y distintos grados de corrección. En la figura 11.28 se compara la distribución de intensidad de Rice con los histogramas experimentales normalizados. De nuevo, se ajusta perfectamente y se encuentra la misma evolución con el grado de corrección que en el caso anterior. La figura 11.29 muestra como el cociente de Strehl crece al aumentar el número de modos corregidos. Se compara con la aproximación de Marechal (6.21) y se obtiene un ajuste bastante preciso. La varianza residual experimental (figura 11.30) es menor que la teórica por las razones ya explicadas, y tiende hacia esta última al aumentar el nivel de corrección.

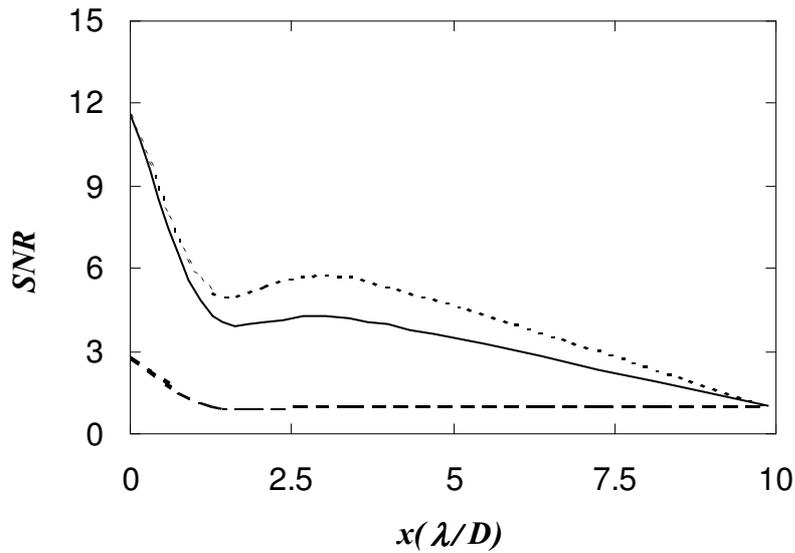


Figura 11.21 Comportamiento del cociente señal-ruido experimental en función de la posición para distintos grados de corrección: 40 (línea continua), 80 (línea discontinua trazo corto). Comparación con el valor teórico para 80 modos corregidos (línea discontinua trazo largo). Valor de  $D/r_0=40$ .

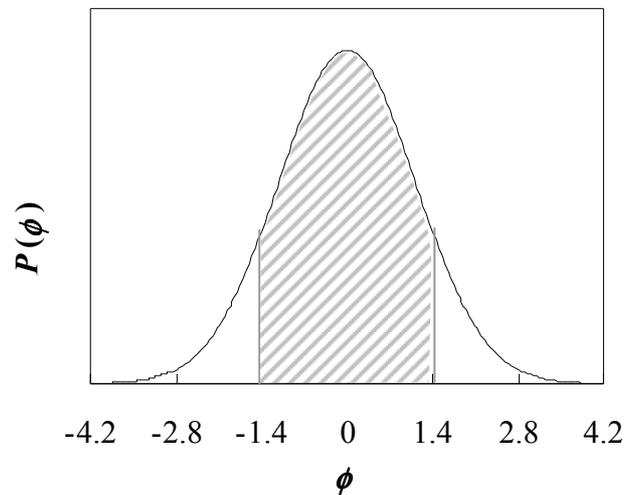


Figura 11.22 Para cualquier número de polinomios corregidos, la distribución de la fase es gaussiana y las limitaciones de las celdas imponen que sólo se representen fielmente las fases en el intervalo (-1.4, 1.4) rad. El área rayada (área entre el eje  $O\phi$ , la curva  $P(\phi)$  y las dos asíntotas verticales  $\phi = -1.4$  y  $\phi = 1.4$  rad) representa el tanto por uno de fases correctamente representadas.

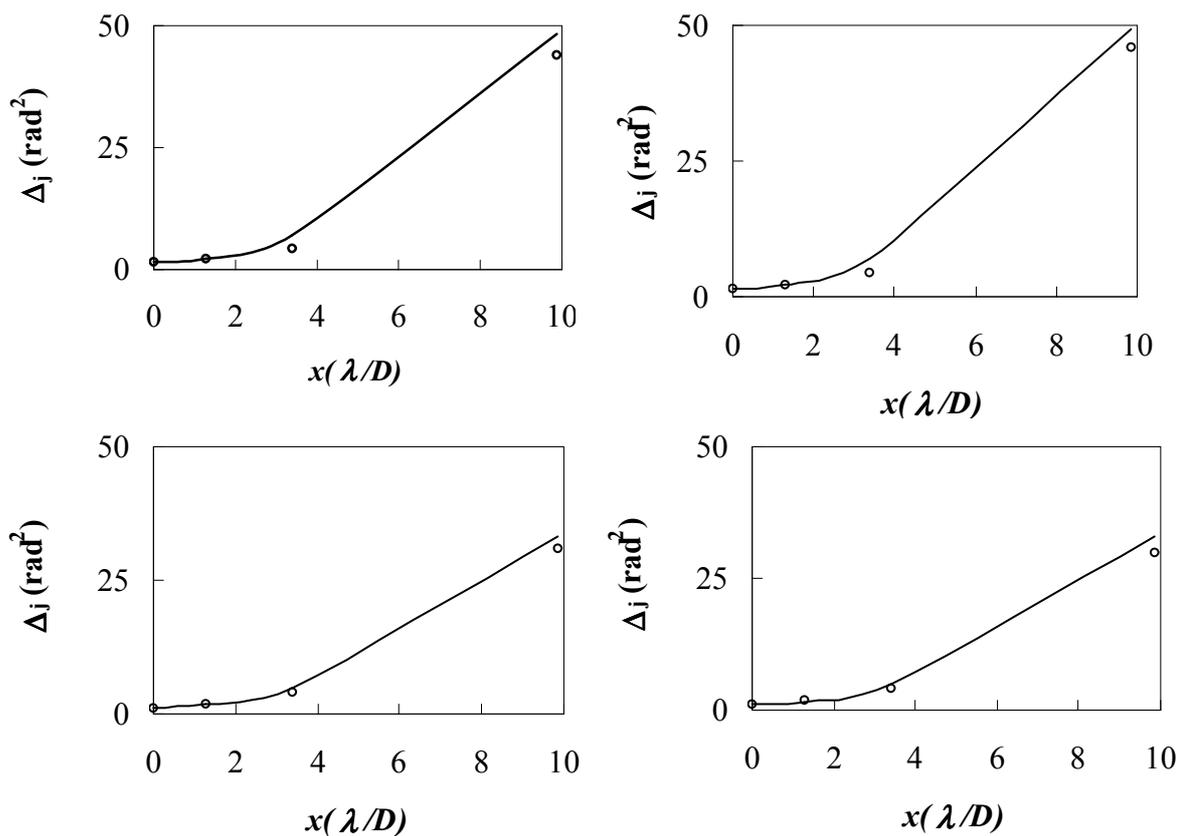


Figura 11.23 Comparación entre la varianza residual de la fase teórica (línea continua) y la ajustada de los histogramas experimentales (círculos) en función de la posición, para las distintas correcciones: 40 (arriba izqda.), 80 (arriba dcha.), 150 (abajo izqda.) y 250 (abajo dcha.) modos corregidos. Estas curvas forman parábolas, como se describió en el apartado 7.4. Valor de  $D/r_0=40$ .

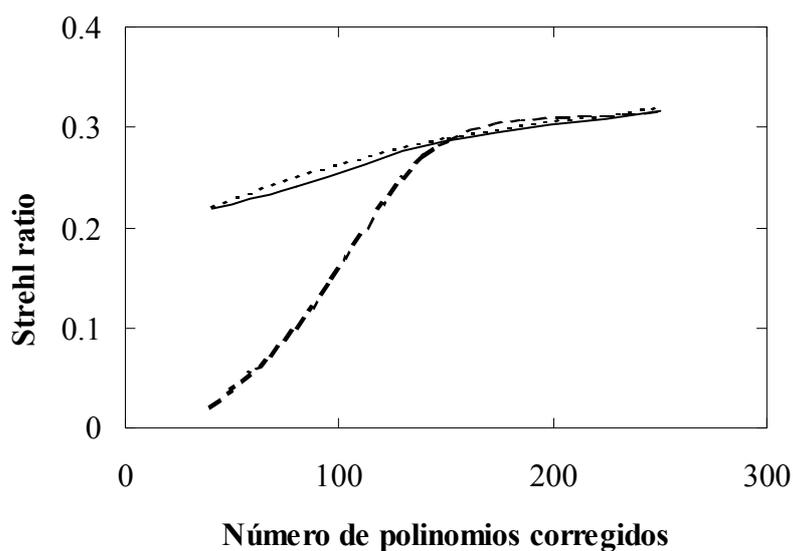


Figura 11.24 Comparación del cociente de Strehl teórico (línea discontinua trazo largo) y experimental (línea discontinua trazo corto) en función del grado de corrección. También se muestran los valores teóricos que corresponden a la aproximación de Marechal (línea continua). Valor de  $D/r_0=40$ .

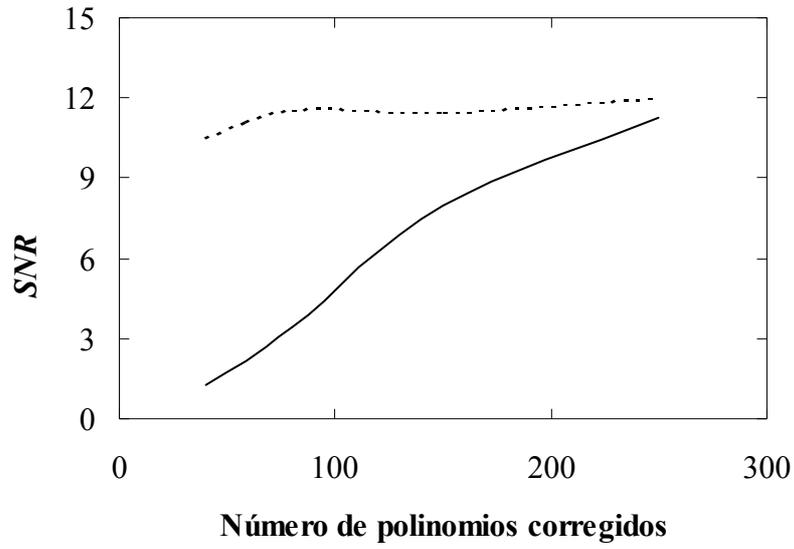


Figura 11.25 Cociente señal-ruido en el punto central en función del grado de corrección: teórico (línea continua) y experimental (línea discontinua). Valor de  $D/r_0=40$ .

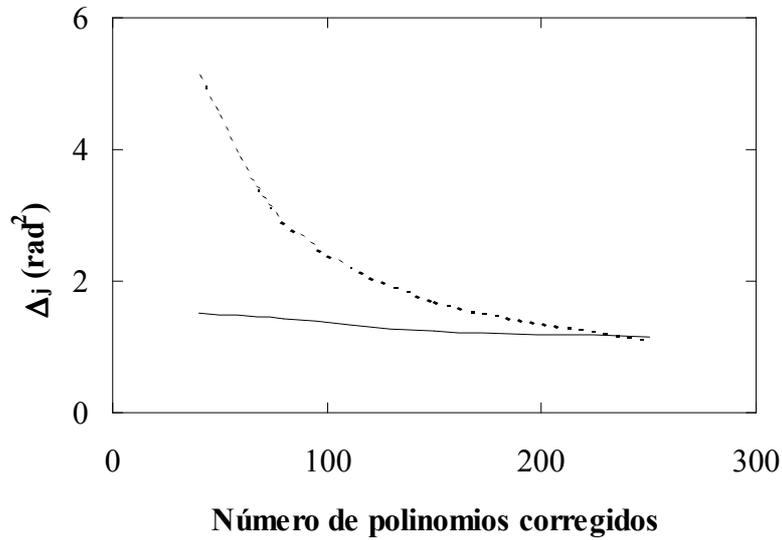


Figura 11.26 Varianza residual experimental (línea continua) frente a la varianza teórica (línea discontinua), a la que tiende para altos grados de corrección. Valor de  $D/r_0=40$ .

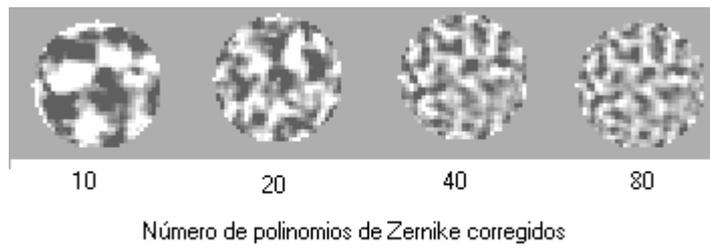


Figura 11.27 Frentes de onda simulados con  $D/r_0=20$  y distintos grados de corrección: 10, 20, 40 y 80 modos corregidos.

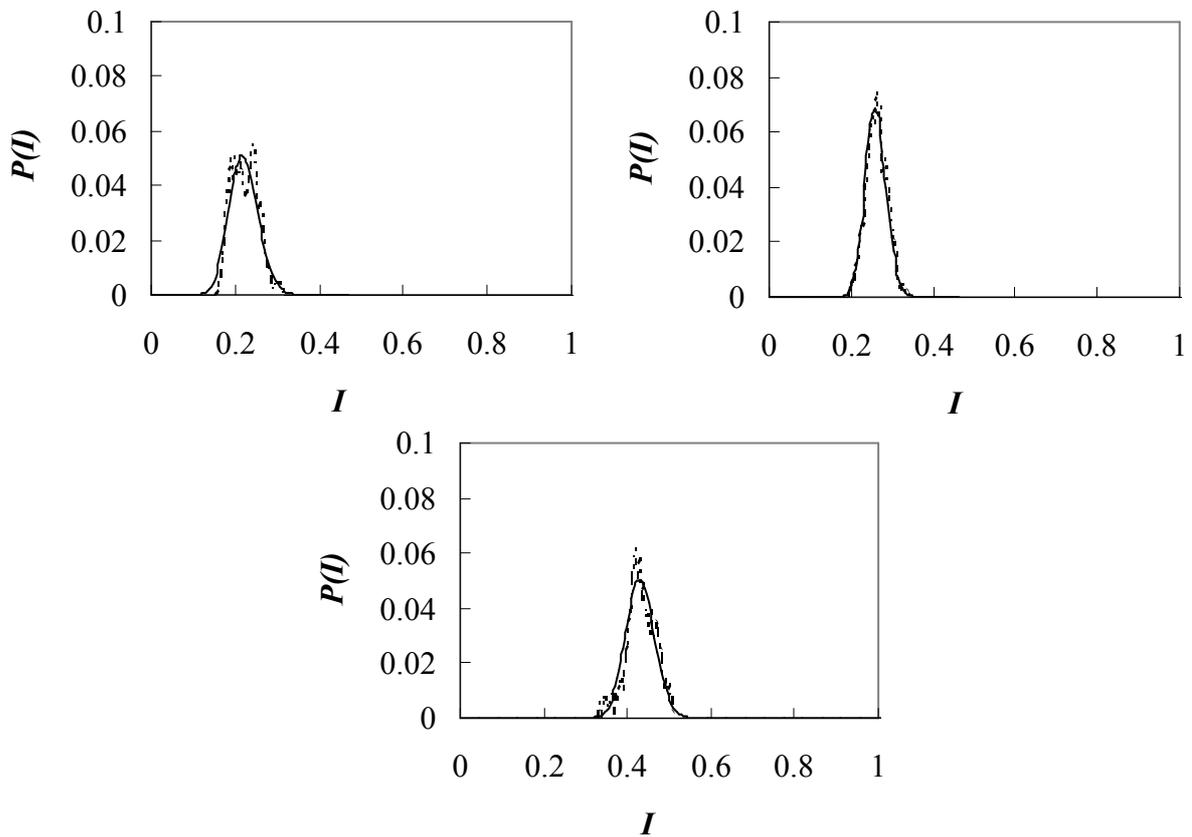


Figura 11.28 Histograma de intensidades experimental (línea discontinua) en el punto central del plano imagen comparado con la distribución de Rice (línea continua) para distintos grados de corrección: 10 (arriba izqda.), 20 (arriba dcha.) y 40 (abajo) modos corregidos. Valor de  $D/r_0=20$ .

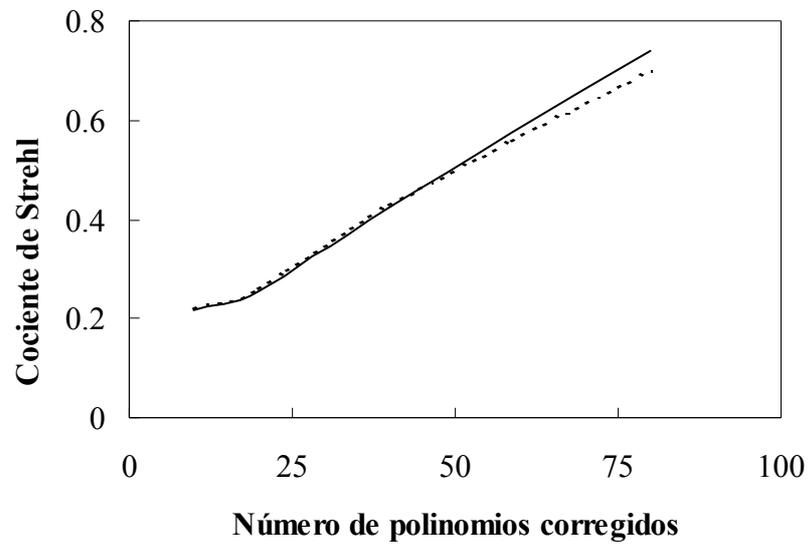


Figura 11.29 Cociente de Strehl experimental (línea continua) y teórico (línea discontinua) en función del número de modos corregidos. Valor de  $D/r_0=20$ .

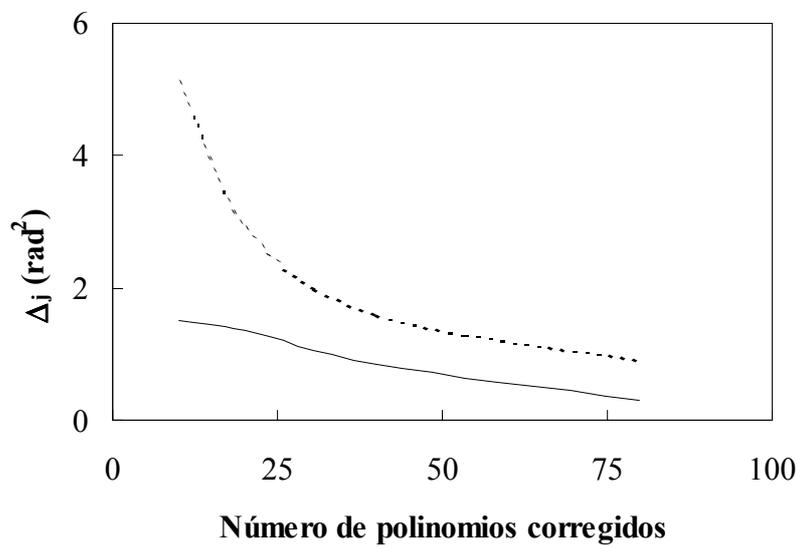


Figura 11.30 Varianza residual experimental (línea continua) y teórica (línea discontinua) en función del nivel de corrección. Valor de  $D/r_0=20$ .

## 11.4 Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema experimental para generar frentes de onda compensados, debido a la dificultad de obtener datos de sistemas instalados en grandes telescopios astronómicos. El sistema utiliza las pantallas de cristal líquido de un videoprojector comercial para modular la fase del frente de onda, por lo que sus costo es bajo en comparación con otros dispositivos. Se ha demostrado que el sistema puede reproducir los polinomios de Zernike de forma individual. Asimismo se han introducido frentes de onda distorsionados por la atmósfera y parcialmente corregidos. Se ha obtenido su histograma de intensidades, que ajusta a la distribución de Rice con precisión. Debido al limitado rango de desfases que pueden introducir las celdas de cristal líquido empleadas, la varianza residual del frente de onda es menor que la teórica para bajos grados de corrección. Por idéntico motivo, el cociente señal-ruido y el cociente de Strehl se ajustan mejor a los valores teóricos cuando aumenta el número de modos corregidos. Por tanto, el experimento reproduce los valores teóricos de estos parámetros aunque aparecen ciertas discrepancias causadas por las limitadas prestaciones de las celdas.