



# Utilización de la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda para Óptica Adaptiva en Astrofísica

Tesis Doctoral

Luis Fernando Rodríguez Ramos

Mayo de 2015

**Director: Dr. D. José Manuel Rodríguez Ramos**



José Manuel Rodríguez Ramos, Doctor en Ciencias Físicas y Profesor Contratado Doctor del área de Tecnología Electrónica, perteneciente al Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de La Laguna, como Director,

AUTORIZA: a D. Luis Fernando Rodríguez Ramos, Ingeniero de Telecomunicación, a presentar la Tesis doctoral que ha realizado bajo mi dirección.

Con esta fecha autorizo la presentación de la misma.  
La Laguna, 6 de abril de 2015

---

Dr. José Manuel Rodríguez Ramos  
Universidad de La Laguna.

A la memoria de D<sup>a</sup> Eusebia Ramos Rodríguez, mi madre,  
también madre de mi Director  
y de otros dos fenomenales hermanos,  
a quien más ilusión le hubiera causado.

## Prefacio

La presente Tesis Doctoral resume los trabajos desarrollados entre los años 2008 y 2014, simultaneados con el ejercicio de mis responsabilidades como Jefe del Departamento de Electrónica del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), y también como Ingeniero de Telecomunicación y padre de familia, lo cual únicamente me ha permitido lograr una velocidad de crucero de perfil bajo en la consecución de objetivos. Estas limitaciones, sin embargo, han quedado definitivamente superadas por la entrega y la ilusión, y por el convencimiento y la determinación de que los objetivos perseguidos, sencillamente, merecen la pena.

Tras más de treinta años de ejercicio profesional, he tenido muchas ocasiones de conocer de primera mano cuáles son las limitaciones técnicas que enfrenta a diario la investigación en Astrofísica, sobre todo cuando se realiza desde observatorios basados en tierra, como es el caso del IAC. En este aspecto, la existencia de una atmósfera con comportamiento turbulento en la que la propagación de la luz se refiere, sobresale con autoridad cuando se pretende que los nuevos grandes telescopios alcancen las resoluciones espaciales que merecen, dadas sus dimensiones físicas en aumento constante.

Combatir la turbulencia atmosférica es, pues, un reto en cuya consecución no debemos escatimar esfuerzo y dedicación. Conocerla, limitarla e incluso compensarla ha pasado de ser un objetivo académico a una necesidad tecnológica irrenunciable, y es en esa línea, que conocemos como Óptica Adaptativa, donde se enmarcan los trabajos realizados en la presente Tesis.

Ha constituido también un reto significativo para el doctorando el extender su formación, conocimientos y experiencia, que provenía de los campos de procesado de señal y electrónica propios de las telecomunicaciones, hacia la óptica geométrica y de Fourier. Afortunadamente, muchas son las similitudes entre ambos campos, en la medida en la que se manejan conceptos de sistemas lineales y las respuestas de los mismos, mientras se supere la pequeña dificultad de pasar de una a dos variables independientes.

La palabra “plenóptica”, que aparece casi 300 veces en la presente Tesis, y que pretende recoger el concepto de capacidad plena y completa de captación de información, aparecía en 2006 como una extensión muy interesante de las cámaras convencionales, con variedad de aplicaciones que se planteaban para su análisis en el grupo de investigación. A sugerencia de mi Director, intentaríamos confirmar la viabilidad de que pudiera ser utilizada como sensor de frente de onda. Esta posibilidad se ha analizado, verificado completamente y publicado, tras estos años de actividades en esa dirección.

Se ha tendido, pues, un puente entre los campos de la Fotografía Computacional y de la Óptica Adaptativa, de cuya existencia y futuro sólo pueden esperarse consecuencias positivas.

## Agradecimientos

Muchas son las personas que han aportado, de una forma u otra, contribuciones a la presente Tesis.

En primer lugar quisiera agradecer a mi Director y hermano, José Manuel, el empuje y la determinación, aparte de las ideas y la guía permanente, que han sido la principal fuente de energía que ha alimentado la iniciación, la continuidad y conclusión de estos trabajos.

A los demás compañeros del grupo de investigación, especialmente a José Marichal y Juan Trujillo, por las múltiples discusiones, colaboraciones, e incluso por la participación directa en muchos experimentos y análisis de datos.

A los compañeros del IAC, como José Javier Díaz e Icíar Montilla, y muchos otros, que colaboraron en diversos aspectos del desarrollo y en varias publicaciones conjuntas, así como al IAC como institución, que siempre apoyó el desarrollo de estas actividades.

Por último a mi familia, mis tres hijas y Laly, quienes han aportado, sin saberlo, el tiempo necesario para llevar a cabo esta Tesis.

## Resumen

La Cámara Plenóptica es un concepto que proviene del campo de la fotografía computacional, y que surge como herramienta para capturar una cantidad aprovechable de muestras de la Función Plenóptica, o "Light Field". Esta función, de cuatro variables espaciales que recorren la apertura y el plano focal de un sistema óptico que genera imagen, constituye una descripción completa de la información disponible en el interior de dicho sistema, de la que la imagen es únicamente un caso particular.

Por otro lado, la Óptica Adaptativa para compensación de la turbulencia atmosférica en la observación astrofísica se ha convertido en un objetivo irrenunciable cuando los telescopios han pasado a tener diámetros de decenas de metros. Los sensores convencionales como Shack-Hartmann, Curvatura y Pirámide, presentan problemas importantes a la hora de medir las diferencias de fase asociadas a la turbulencia atmosférica a partir de objetos extensos o cuando se pretende corregir de turbulencia atmosférica en un amplio campo visión, más allá del eje óptico. Tal y como se muestra en esta Tesis, la cámara plenóptica puede ser usada para medir la fase del frente de onda, con la ventaja añadida de contener a los citados sensores convencionales como casos particulares, y de manera casi natural resolver una gran parte de los problemas asociados al uso de los mismos.

El trabajo realizado en esta Tesis resulta especialmente completo teniendo en cuenta que engloba simulaciones informáticas, pruebas de laboratorio, y observaciones reales en telescopio, todos ellos guardando entre sí una exquisita coherencia. Contiene además un estudio profundo de calibración de la Cámara Plenóptica, absolutamente indispensable para medir correctamente las diferencias de fase de frente de onda.

Como principal resultado final cabe citar la introducción de un nuevo sensor de frente de onda para Óptica Adaptativa en Astrofísica, acompañado de un análisis exhaustivo de su uso en observaciones reales y de la comparación con los sensores convencionales de frente de onda. Además, se ha planificado un diseño sobre hardware electrónico especializado que garantice la medida de la fase del frente de onda, dentro del tiempo de estabilidad de la atmósfera, en los actuales y futuros telescopios de gran diámetro.

## Abstract

The concept of Plenoptic Camera originated in the field of computational photography, and turns out to be a means to capture a useful number of samples of the Plenoptic Function, or Light Field. This function, having four spatial variables which cover both the aperture and the focal plane of an imaging optical system, is a complete description of the information available within that system, the image being a particular case.

On the other hand, the use of Adaptive Optics for the compensation of the atmospheric turbulence in astrophysics observations has become an absolute necessity now that the size of the telescopes has grown to a few tens of meters. Conventional sensors like the Shack-Hartmann, Curvature and Pyramid, do suffer from significant problems when measuring phase

differences associated with the atmospheric turbulence from extended objects, or when correction is required in a wide field of view, away from the optical axis. As it is shown in this Thesis, the Plenoptic Camera can be used for the measurement of the wavefront phase, with the advantage of having all those sensors as individual cases, and solving in a natural way a number of the problems associated with the use of those sensors.

The work done within this Thesis is especially well-founded because it includes computer simulations, laboratory tests, and real telescope observations, showing a high level of coherence between them. It also contains a comprehensive study of the calibration of the Plenoptic Camera, an absolute necessity for the correct measurement of the wavefront phase differences.

The proposal of a new wavefront sensor for Adaptive Optics in Astrophysics is the most significant end result, together with the comprehensive analysis of its use in real telescope observations and the comparison with other conventional wavefront sensors. Furthermore, a conceptual design of a dedicated electronic hardware has been developed, which guarantees the measurement of the wavefront phase within the temporal coherence of the atmospheric turbulence, valid for present and future large telescopes.

# Índice General

Prefacio .....	5
Agradecimientos .....	6
Resumen.....	7
Abstract .....	7
Índice General .....	9
Índice de figuras .....	12
Índice de Tablas.....	21
1 Capítulo I. Introducción.....	22
1.1 El concepto de frente de onda .....	23
1.2 Presentación e Historia de la cámara plenóptica.....	26
1.3 Organización de la presente memoria .....	30
2 Capítulo II. Marco teórico.....	32
2.1 Efecto de la calidad de la imagen de la apertura. ....	35
2.2 La fotografía digital .....	37
2.3 Representación gráfica de la Función Plenóptica .....	40
2.4 Síntesis de las imágenes asociadas a cada zona de la apertura.....	42
2.5 Recuperación del frente de onda a partir de los gradientes.....	44
2.6 Comparaciones con otros sensores de frente de onda .....	46
2.6.1 Comparación con el sensor de frente de onda de Pirámide.....	46
2.6.2 Comparación con el sensor Shack-Hartmann: Concepto de Flexibilidad.....	48
2.6.3 Sencillez conceptual del sistema óptico.....	51
2.7 Limitaciones de la cámara plenóptica como sensor de frente de onda .....	54
2.7.1 Límite de resolución en pupila .....	55
2.8 Tomografía con la cámara plenóptica.....	57
3 Capítulo III Calibración de una Cámara Plenóptica .....	60
3.1 Método de reducción de apertura.....	62
3.2 Métodos para imágenes sin reducción de apertura. ....	64
3.2.1 Cálculo del desplazamiento lateral mediante correlación.....	65
3.2.2 Cálculo del desplazamiento lateral mediante la detección directa de fase.....	65
3.2.3 Cálculo del desplazamiento lateral mediante correlación lineal. ....	66

3.2.4	Comparación de métodos.....	67
3.3	Ejemplo real de utilización.....	67
3.4	Calibración de una cámara plenóptica con corrección de campo incorporada.....	69
3.4.1	Identificación automática de las posiciones de las microlentes en la imagen plenóptica.....	74
3.4.2	Optimización en dos etapas.....	78
3.4.3	Calibración para el caso de focal corta.....	80
3.5	Procesado final.....	83
4	Capítulo IV. Ensayos en Laboratorio.....	84
4.1	Verificación con espejo deformable.....	84
4.2	Verificación con placa de fase.....	88
4.2.1	Descripción de la placa de fase.....	89
4.2.2	Procesado de la imagen plenóptica para la obtención del frente de onda.....	90
4.3	Resultados.....	96
5	Capítulo V. Verificación en Telescopio.....	99
5.1	El telescopio OGS.....	100
5.2	Montaje de la Cámara Plenóptica en el Telescopio OGS.....	102
5.2.1	Fabricación de montura tipo “C” para albergar las microlentes.....	104
5.3	Procesado de la imagen plenóptica para la obtención de la fase en la apertura.....	106
5.3.1	Calibración.....	106
5.3.2	Objetos extensos.....	107
5.3.3	Objetos puntuales.....	110
5.3.4	Recuperación de la fase a partir de los gradientes.....	114
5.3.5	Medida cuantitativa de la fase frente de onda.....	115
5.4	Verificación de la respuesta a la variación del foco del telescopio.....	117
5.5	Estadísticas de la función de estructura.....	118
5.5.1	La función de estructura de la fase del frente de onda con turbulencia atmosférica.....	118
5.5.2	Modelado del efecto del emborronamiento.....	119
5.5.3	Comparación con los datos obtenidos en telescopio.....	122
5.6	Comparación sincronizada con sensor de Shack-Hartmann.....	124
5.6.1	Descripción del montaje electrónico.....	126
5.6.2	Procesado.....	128
5.6.3	Comparación y conclusiones.....	129
6	Capítulo VI. Diseño conceptual de implementación FPGA.....	134

6.1	Los procesadores basados en lógica reprogramable (FPGA) .....	134
6.2	Diseño conceptual del procesador FPGA para la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda.....	136
6.2.1	Compensación de “Bias” y “Flat” .....	136
6.2.2	Obtención de las muestras de pupila con interpolación.....	137
6.2.3	Cálculo de los gradientes mediante correlación. ....	139
6.2.4	Reconstrucción del frente de onda .....	141
6.3	Estimación de ocupación de recursos de FPGA .....	142
6.4	Desarrollo piloto.....	143
7	Capítulo VII. Conclusiones y trabajos futuros .....	145
7.1	Actividades de cara al futuro.....	146
8	Bibliografía .....	147

## Índice de figuras

Figura 1.1 Representación esquemática de la Función Plenóptica o “Light Field” como función de cuatro dimensiones espaciales, las cuales recorren en pareja la apertura y el sensor. (Crédito: Ren Ng) .....	23
Figura 1.2 Representación de la superficie perpendicular a la propagación del rayo a partir de una fuente luminosa en múltiples direcciones.....	24
Figura 1.3 Esquema general del funcionamiento de un sistema de Óptica Adaptativa en lazo cerrado. (Crédito: The Lyot Project).....	26
Figura 1.4 Diagrama óptico de la cámara plenóptica. Se representan los dos sistemas de imagen que coexisten: El principal (verde) que obtiene la imagen del objeto y el secundario, que reimagina la apertura, para el caso de la microlente central. ....	27
Figura 1.5 Esquema de la utilización de la Cámara Plenóptica en observaciones astrofísicas .....	28
Figura 1.6 Utilización de la cámara plenóptica en astronomía, en las que objetos puntuales o extensos, en el infinito, son observados a través de una capa de turbulencia próxima a la apertura, y ésta es reimaginada desde múltiples ángulos con un array de microlentes.....	28
Figura 1.7 Imagen plenóptica de la Luna, con 37x37 microlentes.....	29
Figura 1.8 Ampliación de la imagen plenóptica (izq.) en la que se identifica la peculiar geometría de la pupila del telescopio OGS, la cual se muestra en imágenes independientes con un cierto desenfoque (centro) y enfocada (derecha).....	29
Figura 1.9 Imagen de la Luna obtenida por sencilla reducción, realizada con la finalidad de apreciar visualmente los detalles que ofrece.....	30
Figura 2.1 Esquema Zemax de un sistema óptico con una apertura peculiar en la lente principal, mostrando la reimaginación de la misma que realiza una de las microlentes. ....	33
Figura 2.2 Ampliación de la zona final del diagrama, que muestra la reimaginación de la peculiar geometría rectangular de la apertura sobre el detector.....	33
Figura 2.3 Imagen de la apertura con obstrucción rectangular simulada mediante trazado de 10.000 rayos, obtenida por efecto de la microlente considerada, sobre el detector. ....	34
Figura 2.4 Diagrama geométrico para la derivación de la expresión que rige el tamaño de la imagen de la apertura sobre el detector. ....	34
Figura 2.5 Diagrama Zemax global (izq.), y ampliación de la zona posterior a la microlente (der.), utilizado para analizar la calidad de la imagen de pupila. ....	35
Figura 2.6 Resultados de Zemax mostrando la calidad de la imagen de pupila, en la que se aprecia que la elevada calidad geométrica se ve tremendamente empañada por la difracción, como muestra el tamaño del disco de Airy superpuesto.....	36
Figura 2.7 Diagrama que traza en una única dimensión la correspondencia de uno de los píxeles del detector, a través de una de las microlentes –determinando así el punto de vista- , con una zona específica de la apertura. ....	37

Figura 2.8 Esquema que muestra la forma en la que el conocimiento de la Función Plenóptica o “Light Field” permite la síntesis mediante cálculo de otras aperturas o planos imagen. ....	38
Figura 2.9 Geometría de un rayo cualquiera que atraviesa las superficies de apertura y sensado, junto al significado físico de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ respecto a la focal F del sistema. ....	39
Figura 2.10 Representación gráfica de una Función Plenóptica, tomando una de las dimensiones del plano imagen y otra del plano pupila. ....	40
Figura 2.11 Obtención de la imagen de baja resolución a partir de la integración de todas las muestras de la Función Plenóptica correspondientes a una microlente .....	41
Figura 2.12 Acumulaciones oblicuas indicando diversos planos de enfoque .....	41
Figura 2.13 Esquema conceptual del algoritmo de síntesis de las imágenes asociadas a cada zona de la pupila. La luz que atraviese el punto indicado en color verde oliva acabará en alguno de los puntos asociados de las imágenes, dependiendo del ángulo de incidencia. La recomposición indicada permitirá sintetizar la imagen correspondiente.....	42
Figura 2.14 Obtención de las imágenes asociadas a cada zona de pupila, y comparación de las mismas mediante correlación para la obtención de la inclinación relativa del frente de onda. ....	43
Figura 2.15 Algunos esquemas de reconstrucción dependiendo de las relaciones geométricas existentes entre las muestras calculadas y los gradientes medidos. (Izquierda: “Fried”, centro: “Southwell”, derecha: “Hudgin”).....	44
Figura 2.16 Esquema óptico conceptual del sensor de pirámide. (Crédito: A. Tokovinin) .....	46
Figura 2.17 Comparación de los efectos de saturación en el sensor de pirámide (Izq.) y plenóptico (der.), donde puede apreciarse la forma natural en la que desaparece en este último. ....	47
Figura 2.18 Determinación gráfica de la zona lineal de respuesta del sensor de pirámide sin oscilación, la cual queda esencialmente limitada al ancho del spot.....	47
Figura 2.19 Esquema de funcionamiento del sensor de frente de onda de Shack-Hartmann. (Crédito A. Tokovinin).....	49
Figura 2.20 Apertura del telescopio OGS en la que han sido señalados, para una subdivisión en píxeles determinada, aquéllos que previsiblemente alcanzan una relación señal/ruido mínima para permitir su utilización. ....	49
Figura 2.21 Efecto de la disminución del muestreo del frente de onda, que conduce a un número menor de muestras pero con mayor relación señal/ruido. ....	50
Figura 2.22 Muestreo disminuido en un factor 9, resultando únicamente 28 muestras pero con 9 veces la radiación original en cada muestra. ....	50
Figura 2.23 Esquema explicativo de cómo serían las acumulaciones necesarias para sintetizar las imágenes correspondientes a ambos lados del foco, punto de partida de sensado de frente de onda de curvatura. ....	52
Figura 2.24 Diagrama óptico del sensor Geoplano (izq.) con dos sensores plenópticos en posiciones simétricas fuera de foco. A la derecha, a1 y a2 son las imágenes que aparecerían en un sensor geométrico convencional; b1 y b2 son las que obtienen los sensores plenópticos y c1.c2 son las imágenes recompuestas	

desde el punto de vista central. ....	53
Figura 2.25 (Izq.) Constelación simulada de cinco estrellas con el efecto de la turbulencia atmosférica. A la derecha una de las imágenes desenfocadas de la pupila, en la que se superpone la información de las cinco estrellas. ....	53
Figura 2.26 A la izquierda, imagen simulada del sensor propuesto. A la derecha el resultado de seleccionar una microlente determinada. ....	53
Figura 2.27 Esquema indicativo de la separación máxima a la que pueden ubicarse las muestras de la imagen solar para que la función de transferencia óptica mantenga respuesta a las frecuencias espaciales a las que se encuentra la granulación. ....	56
Figura 2.28 Esquema conceptual de la Cámara Plenóptica con turbulencia concentrada en las proximidades de la apertura. Todos los puntos de vista atraviesan la misma turbulencia.....	58
Figura 2.29 Esquema conceptual de la cámara plenóptica con una capa de turbulencia situada a una cierta altitud respecto a la apertura. Puede verse cómo los rayos de los extremos del campo atraviesan turbulencias físicamente diferentes. ....	58
Figura 2.30 Definición de un conjunto de 3x3 líneas de visión a lo largo de las cuales realizar la medida del frente de onda, para obtener la información tomográfica.....	59
Figura 3.1 Diagrama descriptivo de la naturaleza de los tres parámetros principales involucrados en la calibración de una cámara plenóptica. ....	61
Figura 3.2 Imagen plenóptica en la que se ha procedido a una reducción de la apertura, al objeto de que únicamente estén iluminados los centros de las imágenes de la pupila. A la derecha se muestra la ampliación de la zona indicada. ....	62
Figura 3.3 Módulo de la Transformada de Fourier de una imagen plenóptica real, limitado entre dos frecuencias espaciales. ....	63
Figura 3.4 Detalle de una imagen plenóptica con la apertura reducida en la que se ha superpuesto la cuadrícula calculada automáticamente a partir del pico de la Transformada de Fourier, y los centros de gravedad calculados en cada celdilla de la cuadrícula.....	64
Figura 3.5 Imagen de calibración de la cámara plenóptica en el telescopio OGS, adquirida con iluminación de cielo diurno y resultado de acumular 1000 imágenes. ....	68
Figura 3.6 Detalle de resultado de la calibración realizada sobre la imagen tomada al efecto. ....	68
Figura 3.7 Imagen plenóptica procesada para lograr su reproducción correcta en las dimensiones en las que se muestra.....	69
Figura 3.8 Imagen plenóptica reproducida sin reducción de frecuencias espaciales, mostrando el efecto de “aliasing”, y visualizando además el resultado de la corrección de la distorsión de campo.....	70
Figura 3.9 Imagen plenóptica en la que se han señalado manualmente en amarillo, un total de 1813 microlentes para calibración, cuya posición nominal es, por lo tanto, conocida.....	71
Figura 3.10 Resultado de la calibración tras la optimización del modelo. Se muestra en azul la posición física de las microlentes según ha estimado el modelo, y en	

rojo el resultado de aplicar la corrección de campo también modelada. En amarillo –normalmente debajo del rojo- las identificaciones manuales. Punto verde dibujado en el centro de la corrección. ....	73
Figura 3.11 Ampliación de la esquina inferior izquierda de la Figura 3.10, en la que pueden distinguirse los centros de microlentes identificados manualmente (amarillo) y los calculados por el modelo (rojo).....	74
Figura 3.12 Imagen de partida para la identificación automática de microlentes, desprovista de información espacial en la medida de lo posible. Se observan las imperfecciones en las esquinas debidas al adhesivo utilizado. ....	75
Figura 3.13 Obtención de los centroides de las microlentes adyacentes a una dada. Se utiliza el histograma para realizar la binarización previa a la identificación de centros. ....	76
Figura 3.14 Resultado de la identificación automática de más de 120.000 microlentes .....	77
Figura 3.15 Ampliación de la zona superior izquierda de la imagen resultante de la identificación automática, mostrando las microlentes correctamente identificadas cuando ello es posible, dejando un número pequeño de identificaciones erróneas.....	77
Figura 3.16 Representación gráfica de la separación entre las microlentes identificadas y las predichas por el modelo, en función de la distancia al centro. A distancias elevadas, correspondientes a las esquinas, la separación es elevada debido al adhesivo y otras irregularidades.....	78
Figura 3.17 Representación gráfica de la separación identificada-modelada, en función de la distancia al centro de la corrección. Puede observarse que la inmensa mayoría se concentra en torno al valor medio de una décima de pixel. ....	79
Figura 3.18 Resultado de la corrección modelada para una rejilla cuadrada de 75 microlentes de lado. En rojo se señalan las microlentes en la imagen y en azul las posiciones “reales”, tras deshacer la corrección del modelo calculado. ....	80
Figura 3.19 Resultado de la corrección para misma rejilla de 75 microlentes de lado, mostrando en esta ocasión una corrección mucho más acusada. Se señalan en rojo las microlentes identificadas sobre la imagen y en azul las posiciones “reales” calculadas tras el modelo. ....	81
Figura 3.20 Representación de la separación entre las microlentes identificadas y las calculadas por el modelado, en función de la distancia al centro de la corrección. Se observa un incremento apreciable en las distancias grandes, dividido además en dos ramas. ....	82
Figura 3.21 Montaje de cuatro trozos de la imagen plenóptica de calibración elegidos en las proximidades de las cuatro esquinas, donde puede verse el efecto del viñeteo que provoca la determinación errónea de la posición de la microlente debido a que ésta pierde la forma circular.....	82
Figura 3.22 Esquema conceptual ilustrativo del resultado de la calibración, que consiste en el conjunto de coordenadas de los centros de las microlentes. A partir de estos centros, se obtienen las posiciones en la pupila en cada microlente, y así se determina el píxel correspondiente a cada cuádrupla de coordenadas, dos en pupila y dos en el plano focal. ....	83
Figura 4.1 Diagrama del montaje óptico utilizado para verificación cualitativa de la cámara plenóptica respecto a cambios de fase en pupila. ....	85

Figura 4.2 A la izquierda, montura del iris adherido a la superficie de la lente de cámara, utilizado para ajustar la relación focal. A la derecha, vista lateral del montaje mostrado el bafle utilizado para limitar la entrada de luz difusa. ....	86
Figura 4.3 Izquierda: Imagen plenóptica con iluminación uniforme. Derecha: Imagen con aperturas casi cerradas adquirida para la calibración. ....	86
Figura 4.4 Imágenes plenópticas adquiridas en dos posiciones extremas del actuador número 14 del espejo deformable, entre las que se aprecia gran diferencia. ....	87
Figura 4.5 Imágenes recompuesta de cada zona de la pupila, para las dos posiciones extremas del actuador número 14. Un examen detallado permite observar que el desplazamiento del objeto (la cruz) es distinto según la posición de la pupila que se trate, como cabe esperar. ....	87
Figura 4.6 Código QR para acceder a la película ilustrativa de los efectos del movimiento del actuador número 14. ....	88
Figura 4.7 Diagrama del montaje óptico utilizado para la verificación en laboratorio con placa de fase. ....	88
Figura 4.8 Montaje óptico realizado para la verificación con placa de fase. Ésta puede verse a la izquierda en su montura rotatoria. ....	89
Figura 4.9 Representación gráfica, mediante líneas de nivel, de la fase nominal de fabricación correspondiente a la placa utilizada. ....	89
Figura 4.10 Identificación de la zona de interés mediante visualización del mapa de fase en el interferómetro Zygo XPZ. ....	90
Figura 4.11 Imagen plenóptica de calibración adquirida mediante el método de reducción de la apertura. ....	91
Figura 4.12 Imagen plenóptica tomada sin introducir la placa de fase en el camino óptico, para realizar un enfoque correcto y utilizarse como referencia. ....	92
Figura 4.13 Imagen plenóptica del objeto en cuestión tomada tras insertar la placa de fase en el camino óptico. Puede observarse claramente una cierta estructura aparecida en muchas de las microlentes. ....	92
Figura 4.14 Representación del sistema de coordenadas utilizado para identificar las muestras de pupila, otorgándoles valores fraccionarios entre -1 y +1 para ambos ejes. ....	93
Figura 4.15 Imágenes reconstituidas correspondientes a la zona central de la pupila, sin placa de fase (izq.) y con placa de fase (der.) Puede observarse un leve desplazamiento hacia abajo observando detenidamente las líneas horizontales. ....	93
Figura 4.16 Representación gráfica las dos imágenes y del marco que se descarta en una de las imágenes a la hora de definir el kernel con el que se calculará la correlación. ....	94
Figura 4.17 Pantalla resumen del cálculo del desplazamiento realizado mediante correlación. En la línea superior, las dos imágenes a comparar. En la línea central, las imágenes tras ajustes y filtrados. En la línea inferior, el resultado de la correlación representado como red y como imagen. ....	95
Figura 4.18 Representación gráfica del gradiente de fase medido en la coordenada central de la pupila. ....	96

Figura 4.19 Esquema indicativo del desplazamiento lateral utilizado para introducir la placa de fase en el camino óptico, al objeto de evaluar la respuesta de la cámara plenóptica a las diversas zonas de la placa de fase. Se indica la dimensión aproximada de la zona analizada.....	96
Figura 4.20 Código QR para el acceso a la película que reúne el desplazamiento del carro descrito en el ensayo de laboratorio.....	97
Figura 4.21 Gradientes recuperados en la posición número 3, mostrando la zona completamente sin fases del centro de la placa de fase.....	97
Figura 4.22 Gradientes medidos en la posición número 60, en la que la zona anular con fases ha entrado hasta la mitad de la pupila.....	98
Figura 4.23 Gradientes de fase en pupila para la posición número 210, en la que se observa la ubicación del pico de fase.....	98
Figura 5.1 Imagen del telescopio OGS en el Observatorio del Teide, Islas Canarias, con el Pico del Teide al fondo.....	100
Figura 5.2 Distribución interna del telescopio OGS. El recorrido de la luz hasta el foco Coudè se señala en color rojo.....	101
Figura 5.3 (Izq.) Banco óptico de granito ubicado en el Laboratorio Coudè del telescopio OGS. (Der.) Mesa óptica instalada sobre el banco de granito. En ambos casos, en el centro, el tubo blanco evacuado por el que desciende el haz de luz. ....	102
Figura 5.4 Esquema en planta del montaje utilizado para la instalación de la Cámara Plenóptica en el laboratorio Coudè del telescopio OGS.....	103
Figura 5.5 Esquema óptico Zemax global, incluyendo el modelo de telescopio, las lentes reimagadoras y la cámara plenóptica al final.....	103
Figura 5.6 Objeto utilizado en la simulación (izq.) e imagen plenóptica simulada (der.) generada por el conjunto óptico telescopio + reimaginación + cámara plenóptica. ....	104
Figura 5.7 Arriba, dimensiones y detalle del anclaje de la cámara PULNIX TM-4200GE. Abajo, planos de fabricación de las monturas descritas en el texto. La ubicación del array de microlentes se muestra en color rojo.....	105
Figura 5.8 Imagen del conjunto de piezas fabricadas para la adaptación del array de microlentes a la cámara PULNIX TM-4200GE.....	105
Figura 5.9 Montaje de la cámara plenóptica en el foco Coudè del telescopio OGS.....	106
Figura 5.10 Imagen plenóptica de calibración tomada con luz diurna. ....	106
Figura 5.11 Imagen de calibración una vez identificadas las posiciones de los centros de las microlentes, indicadas mediante cruces de color rojo. ....	107
Figura 5.12 Imagen plenóptica de un cráter de la superficie de la Luna .....	108
Figura 5.13 Ejemplo de imagen recompuesta de baja resolución. ....	108
Figura 5.14 Imagen recompuesta con 19x19 muestras de pupila, en la se ha ubicado cada imagen en la zona de la pupila a la que corresponde. ....	109
Figura 5.15 Gradientes obtenidos mediante análisis de los desplazamientos de cada una de las imágenes recompuestas respecto a la imagen central, que se usa como referencia.....	110
Figura 5.16 Imagen plenóptica de partida para un objeto puntual. ....	110

Figura 5.17 Imagen de oscuridad y muy larga exposición, utilizada para identificar la lista de los píxeles calientes o con respuesta anormalmente elevada. ....	111
Figura 5.18 Conjunto de imágenes reconstituidas de un objeto puntual, asociadas a una matriz de 19x19 muestras en pupila. ....	112
Figura 5.19 Proyección lateral y umbral utilizado para suprimir los niveles de oscuridad y polarización ("Bias"), de cara a la correcta ubicación del centro de gravedad. ....	113
Figura 5.20 Gradientes medidos a partir de los desplazamientos de cada uno de los centros de gravedad con respecto a la posición central, usada como referencia.....	113
Figura 5.21 Código QR para acceder a la película de los gradientes recuperados de una sesión de observación de Vega.....	114
Figura 5.22 Representación gráfica tridimensional del frente de onda medido, tras la recuperación realizada mediante expansión en polinomios de exponenciales complejas.....	115
Figura 5.23 Trazado de rayos indicativo de la formación de imagen correspondiente al punto de pupila identificado como P, a través del conjunto de microlentes.....	115
Figura 5.24 Resultado conceptual reconstrucción de la imagen correspondiente al punto P, limitada a una dimensión. ....	116
Figura 5.25 Imagen original (izq.) y desplazada un pixel (der.) a consecuencia de la pendiente del frente de onda asociada al punto P. ....	116
Figura 5.26 Esquema conceptual descriptivo de un desplazamiento de valor 1 pixel en la imagen reconstituida, generado por una pendiente determinada del frente de onda en el punto P.....	116
Figura 5.27 Conjuntos de frentes de onda recuperados con la Cámara Plenóptica, una vez promediada la turbulencia atmosférica, para ocho posiciones del foco del telescopio en torno al foco óptico. ....	118
Figura 5.28 Simulación del efecto en la función de estructura de la fase para diversos tamaños de microlente. La pendiente cambia desde 5/3 a 2 según disminuye el tamaño de la misma.....	121
Figura 5.29 Valores de la pendiente de la función de estructura para distancias muy cortas, en función del ancho a altura mitad del kernel de convolución con el que se ha simulado el emborronamiento causado por las microlentes.....	122
Figura 5.30 Funciones de estructura de la fase en diversas condiciones de foco, tras descontar el efecto del mismo y considerar únicamente la turbulencia atmosférica. Se muestra la pendiente 5/3 de referencia.....	123
Figura 5.31 Valor medio y desviación de la pendiente de la función de estructura de la fase, para distancias pequeñas, en las diversas posiciones de foco del telescopio.....	123
Figura 5.32 Cálculo gráfico de la pendiente esperada para el caso de un ancho a altura mitad del kernel de convolución de 3,58 muestras, mostrando total coincidencia con el observado.....	124
Figura 5.33 Diagrama del montaje óptico utilizado para comparación simultánea de la Cámara Plenóptica con un sensor Shack-Hartmann. ....	125
Figura 5.34 Detalle del montaje del sensor Shack-Hartmann simultáneo a la Cámara	

Plenóptica, con la ayuda de un divisor de haz.....	126
Figura 5.35 Montaje electrónico utilizado para garantizar el funcionamiento simultáneo de los dos sensores, tanto el de nuestra cámara plenóptica como el del sensor S-H.....	127
Figura 5.36 Verificación informal del funcionamiento simultáneo de ambas cámaras. Se comprobó que ambas capturaban siempre la misma hora del cronómetro.....	127
Figura 5.37 Imagen acumulada del sensor de S-H utilizada para la selección de las microlentes cuyas pendientes comparar.....	128
Figura 5.38 Resultado del procesado de una imagen ejemplo del sensor S-H. Se muestra la zona utilizada para el cálculo del centro de gravedad, las posiciones del mismo (azul) y las de referencia (amarillo).....	129
Figura 5.39 Representación gráfica de los valores de los coeficientes de correlación entre una de las muestras del sensor S-H con todas las de nuestra cámara plenóptica. Se observa un pico claramente definido en el punto de la pupila común. ....	130
Figura 5.40 Figura comparativa de los sensores de S-H y plenóptico. Para cada una de las microlentes numeradas en el S-H se ha calculado la muestra de pupila de la cámara plenóptica cuya correlación es máxima, y se indica sobrepuesta sobre la imagen integrada de pupila. La coincidencia es total.....	133
Figura 6.1 Etapas conceptuales de la reconstrucción en tiempo real de frentes de onda utilizando una cámara plenóptica. ....	136
Figura 6.2 Esquema conceptual de las operaciones involucradas en la corrección de polarización ("Bias") y la ecualización ("Flat"), junto a la información requerida. ....	137
Figura 6.3 Esquema conceptual de las operaciones de interpolación requeridas, en un caso más general, para el cálculo de una muestra de pupila. Se dibujan en azul los píxeles involucrados en el cálculo de la muestra ubicada en el pixel de color rojo.....	138
Figura 6.4 Esquema conceptual de la implementación en FPGA de las operaciones necesarias para obtener las muestras de pupila, incluyendo una posible interpolación de 3x3 píxeles.....	139
Figura 6.5 Esquema conceptual del módulo de estimación de gradientes mediante correlación, concebido como cinco procesadores replicados.....	140
Figura 6.6 Esquema de concepto de un conjunto de interpoladores cuadráticos para la determinación de la posición del pico de la correlación con precisión sub-píxel. ....	141
Figura 6.7 Esquema conceptual del algoritmo iterativo utilizado para la reconstrucción del frente de onda mediante FPGA. La nueva matriz de fases (der.) se calcula a partir la matriz de la iteración anterior (centro) combinada con las diferencias verticales (abajo) y las horizontales (arriba).....	142
Figura 6.8 Diagrama de bloques del desarrollo piloto realizado. Se incluyen dentro del dispositivo reprogramable (FPGA) los módulos de recomposición, así como los de recepción Gig-E y generación de imagen VGA. ....	144
Figura 6.9 Display VGA generado directamente desde la FPGA. A la izquierda arriba se muestra una versión reducida de la imagen plenóptica, y a la derecha un	

detalle de la misma. Abajo en el centro se muestran cinco imágenes reconstituidas correspondientes a cinco puntos de la pupila. .... 144

## Índice de Tablas

Tabla 3-1 Comparación de la exactitud de los diferentes métodos de obtención del parámetro de calibración “desplazamiento lateral”, expresado en error medio de la combinación de los componentes vertical y horizontal respecto del valor correcto introducido en la simulación.....	67
Tabla 3-2 Error promedio obtenido tras la optimización, en función de grado del polinomio radial de corrección utilizado. ....	72
Tabla 3-3 Modelo resultante de la optimización de los parámetros a partir de 1813 microlentes identificadas manualmente. ....	72
Tabla 3-4 Parámetros del modelo obtenido mediante dos etapas, sobre más de 100.000 microlentes. ....	79
Tabla 3-5 Resumen de los parámetros del modelo calculado para la situación de focal corta.....	81
Tabla 5-1 Valores del coeficiente de correlación máximo encontrado, en la comparación entre los gradientes en eje X de cada una de las muestras seleccionadas del sensor SH, y su equivalente más próxima en la cámara plenóptica.....	131
Tabla 5-2 Valores del coeficiente de correlación máximo encontrado, en la comparación entre los gradientes en eje Y de cada una de las muestras seleccionadas del sensor S-H, y su equivalente más próxima en la cámara plenóptica. ....	132
Tabla 6-1 Estimación de los parámetros más relevantes como resultado del proceso de diseño conceptual de la implementación en lógica reprogramable (FPGA) del procesado de la Cámara Plenóptica para tiempo real. ....	143

# 1 Capítulo I. Introducción

*“The history of science is rich in the example of the fruitfulness of bringing two sets of techniques, two sets of ideas, developed in separate contexts for the pursuit of new truth, into touch with one another”*

J.R. Oppenheimer

La fotografía computacional se enmarca entre muchos desarrollos, relativamente recientes, que persiguen la obtención de información más allá de la mera captura de la imagen de una determinada escena. Si entendemos esta imagen como una proyección bidimensional de una escena tridimensional, persiguen, quizá sacrificando alguna de las cualidades de esa imagen, obtener información de distancia, supresión de oclusiones, enfoque total, etc. En definitiva, se trata de extender la capacidad de captación de un sistema de imagen para que obtenga a su vez otras informaciones relevantes de la zona del espacio que tiene delante y por la que ha pasado la luz que sirve como sonda.

El concepto de Función Plenóptica o “Light Field” constituye una herramienta conceptual valiosa para identificar y manipular toda la información que, proveniente de una cierta zona del espacio, puede captarse tras la apertura de un sistema óptico. Tal sistema óptico, que para los efectos del siguiente razonamiento puede ser tanto un telescopio como una cámara fotográfica, tiene como primera aplicación la obtención de una imagen de la escena, o dicho de una forma más abstracta, de la proyección en dos dimensiones de la zona del espacio tridimensional de interés, la cual está situada frente a la apertura.

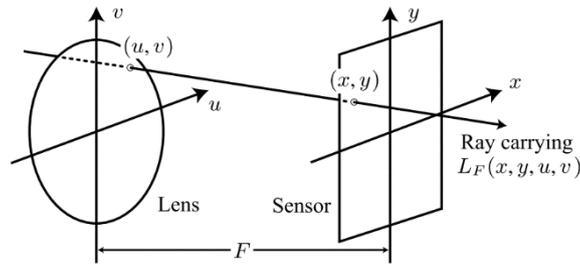


Figura 1.1 Representación esquemática de la Función Plenóptica o "Light Field" como función de cuatro dimensiones espaciales, las cuales recorren en pareja la apertura y el sensor. (Crédito: Ren Ng)

El concepto "Light Field" será pues una función escalar de cuatro dimensiones, dos de las cuales representan los puntos en la apertura del sistema óptico  $(u,v)$  y las otras dos corresponden al plano focal  $(x,y)$  (Figura 1.1). Conociendo la radiancia asociada a cada cuádrupla de valores  $(u,v,x,y)$  tendremos determinada la cantidad de luz asociada a los rayos que, pasando por todos los puntos de la apertura, llegan a todos los puntos del plano focal, y de esa forma conoceremos la totalidad de la información referente a la escena que ha entrado en el sistema óptico.

Sucede que obtener la proyección bidimensional del espacio, es decir, la imagen, aunque es un caso extremadamente importante y significativo, es únicamente un caso particular de toda la información que puede extraerse de una escena, a partir de la luz que un sistema óptico recoge a través de su apertura. Además de la obtención de una imagen, cuestiones como un mapa de profundidades, un reenfoque bajo demanda, una selección de puntos de vista, o -lo que persigue demostrar esta Tesis- un sensado de frente de onda, pueden obtenerse de una forma natural como casos particulares de procesamiento sobre la función de "Light Field", ya que en ella está contenida absolutamente toda la información que ha entrado a través de la apertura.

La cámara plenóptica, concebida conceptualmente como un sistema en el que el plano focal se subdivide en múltiples trozos con la ayuda de un conjunto de microlentes, aparece pues como una forma de medida del "Light Field", con las limitaciones inherentes a la construcción física y a la naturaleza ondulatoria de la luz, a partir de la cual podrán luego obtenerse, mediante el procesamiento computacional que proceda, tanto la imagen como cualesquiera de los otros parámetros extraíbles del "Light Field" que antes se comentaron, y entre ellos el frente de onda.

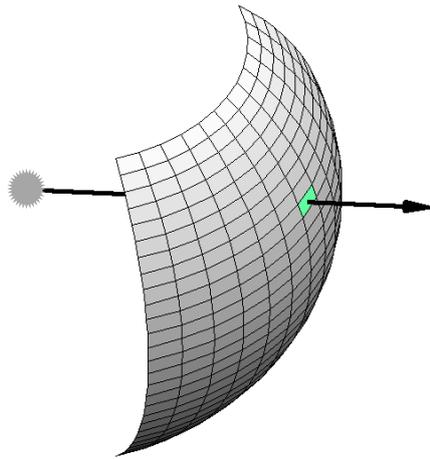
El concepto de "Light Field" nace y se restringe al paradigma de la óptica geométrica, pero se demostrará en la presente Tesis cómo puede ser perfectamente útil para determinar la capacidad de la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda.

## 1.1 El concepto de frente de onda

Al tratar la presente Tesis de una forma nueva de medida del frente de onda utilizando la Cámara Plenóptica, tiene sentido dedicar algún espacio, incluso en esta introducción, a presentar el concepto de frente de onda, que resulta extremadamente útil en muchos campos relacionados con la propagación de la luz. También comentaremos el sentido y la utilidad que tiene el proceder a su medida.

El frente de onda es la superficie definida a partir de la reunión del conjunto de los puntos de

igual fase. Podemos llegar hasta él a partir de conceptos intuitivamente más simples como el camino óptico equivalente de un rayo, que tras modelar la propagación de la luz como un conjunto de rayos que se propagan en línea recta partiendo de la fuente (Figura 1.2), en todas direcciones, es el resultante de multiplicar la longitud del camino por el índice de refracción del medio. En cuanto el medio deje de ser homogéneo, y por ejemplo incluya lentes, espejos, atmósferas turbulentas, etc., la propagación de los diferentes rayos en las múltiples direcciones encontrará diferentes accidentes en su camino, y la superficie que reúna los puntos de igual camino óptico -respecto a la fuente- dejará de ser una esfera para convertirse en una superficie irregular. Siempre, no obstante, seguirá sucediendo que la superficie del frente de onda será perpendicular al rayo, básicamente por definición.



*Figura 1.2 Representación de la superficie perpendicular a la propagación del rayo a partir de una fuente luminosa en múltiples direcciones.*

A partir de esta definición -intuitiva pero perfectamente válida- de frente de onda, es inmediato concluir que, a suficiente distancia de la fuente, el frente de onda debería ser esencialmente plano, como correspondería a una esfera de radio infinitamente grande que se analiza localmente, siempre y cuando el medio sea homogéneo en lo que a la propagación de la luz se refiere. La medida en la que el frente de onda haya dejado de ser plano nos informará muy directamente de cuáles han sido las consecuencias de las inhomogeneidades del medio durante la propagación, y lo que es más útil y significativo, de cómo sería la propagación posterior de no encontrarse con ulteriores inhomogeneidades. Así por ejemplo, un frente de onda plano tenderá a seguir siendo plano, mientras que uno esférico tenderá a converger hacia un cierto foco, y lo que es más, si a un frente de onda plano le hacemos atravesar un medio tal que se convierte en esférico, estaremos haciendo que la luz involucrada converja, es decir, que todos los rayos que partieron de un punto queden reunidos nuevamente en otro punto, lo cual permitirá por ejemplo la formación de una imagen cuando se aplique el razonamiento a un conjunto de puntos de un objeto fuente.

El concepto de frente de onda (y especialmente el de frente de onda “plano”) se define pues a partir de una fuente puntual, y es en este caso cuando tiene su mejor sentido. Especialmente cuando esa fuente se encuentra en el infinito en comparación con los tamaños de los sistemas ópticos involucrados. Sin embargo, se puede extender de una forma natural al caso de fuentes

extensas, como la granulación solar, ubicadas también en el infinito, y así mismo a fuentes relativamente próximas como son las estrellas láser artificiales generadas en la mesosfera a distancias del orden de 90 km. Esta extensión se consigue por la mera descomposición del objeto extenso en un conjunto de fuentes puntuales.

No es frecuente, sin embargo, utilizar el concepto de frente onda en fotografía, en la medida en que, la manifiesta proximidad de las fuentes respecto a las sistemas ópticos, no permite hacer la aproximación de distancia infinita y por lo tanto sobre la planicidad del frente de onda en ausencia de turbulencias o aberraciones en el medio de propagación.

El concepto de frente de onda adquiere todavía mayor relevancia cuando se utiliza el paradigma de la propagación de la luz como campo escalar dependiente de coordenadas espaciales y temporales (Goodmann, 1996),

$$u(P, t) = A(P)\cos[2\pi\nu t + \phi(P)]$$

donde P es la posición,  $\nu$  la frecuencia, y  $A(P)$  y  $\phi(P)$  representan las componentes de amplitud y fase asociadas a esa posición espacial. De una forma más compacta,

$$u(P, t) = \text{Re}\{U(P)\exp(-j2\pi\nu t)\}$$

el campo escalar puede expresarse como la parte real de la exponencial compleja aludida, dejando al fasor

$$U(P) = A(P)\exp[-j\phi(P)]$$

como depositario de la información relevante en cada punto del espacio en lo que al campo escalar que representa a la luz se refiere.

La importancia de esta formulación radica en que el conocimiento de este fasor permite determinar cómo va a ser la propagación, una vez aplicadas las condiciones de contorno que representen las peculiaridades de los medios que se atraviesen. Así, por ejemplo, podrá aplicarse difracción de Rayleigh-Sommerfeld para un caso general, o aproximarse usando expresiones de Fresnel o incluso de Fraunhofer, alcanzando en esta última la simplicidad -y gran divulgación- de la transformación de Fourier bidimensional como herramienta para la obtención del campo lejano, es decir, a grandes distancias de los obstáculos (Goodmann, 1996).

El frente de onda se puede definir entonces (Tyson, 2011) como “un mapa bidimensional de la fase en la apertura, o en cualquier otro plano relevante perpendicular a la línea de visión entre objeto e imagen”. Sucede que las variaciones de fase son las que realmente determinan en mayor medida el comportamiento de la luz durante la propagación, siendo las de amplitud relegadas en primera aproximación, y por tanto es el conocimiento del frente de onda, y por ende la información de fase, quien determina unívocamente la propagación de la luz a lo largo de un sistema óptico.

La medida del frente de onda es indudablemente el mejor punto de partida para la corrección del mismo. Son muchas las ocasiones en que la práctica de óptica aconseja la medida explícita del frente onda como herramienta de trabajo, por ejemplo, en el alineado de sistemas ópticos, configuración de espejos de telescopios, etc. En la actualidad, el sensado de frente de onda por

anomalías es el utilizado en el lazo de control de los sistemas de Óptica Adaptativa, que persiguen la corrección en tiempo real de las turbulencias causadas por la atmósfera terrestre en las observaciones astronómicas, o también las turbulencias intraoculares características del ojo humano en aplicaciones de visión aumentada.

El resultado de estos efectos turbulentos puede caracterizarse como una desviación principalmente concentrada en la fase, en la que el frente de onda deja de ser plano para convertirse en irregular, pero con desviaciones caracterizables estadísticamente (Kolmogorov, 1941) (Tatarskii, 1961). Estas irregularidades conducen irremediablemente a que la imagen obtenida por el sistema óptico se desvíe de la imagen de difracción ideal, perdiendo parte de una valiosa resolución espacial, además de quedar en inferior nivel respecto al ruido de los detectores, resultado de distribuir la luz existente en un número mayor de píxeles, lo cual puede ser vital para el caso de los interesantes objetos débiles.

Sin embargo, una vez conocido, el frente de onda puede corregirse dentro de un sinnúmero de limitaciones prácticas, habitualmente a través de un espejo deformable que aplique desviaciones opuestas a las detectadas, dando lugar a una imagen mejorada que se aproxima al caso ideal en el que está limitada únicamente por la difracción del sistema óptico utilizado (Babcock, 1953) (Hardy J. , 1978).

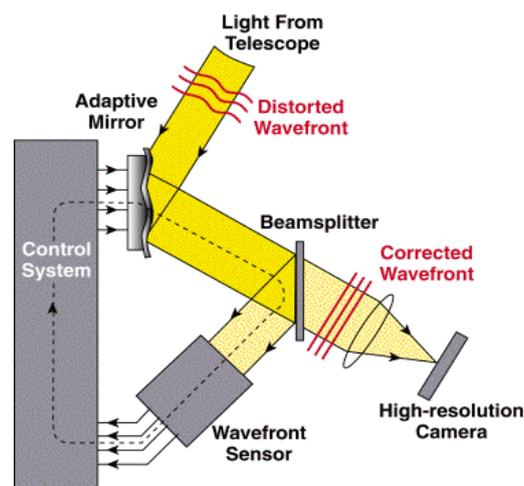


Figura 1.3 Esquema general del funcionamiento de un sistema de Óptica Adaptativa en lazo cerrado. (Crédito: The Lyot Project)

La corrección del frente de onda, que se realiza frecuentemente en lazo cerrado para compensar de una forma natural las respuestas no lineales de los elementos de corrección, puede también realizarse en lazo abierto cuando la latencia del sistema de control así lo aconseje.

## 1.2 Presentación e Historia de la cámara plenóptica

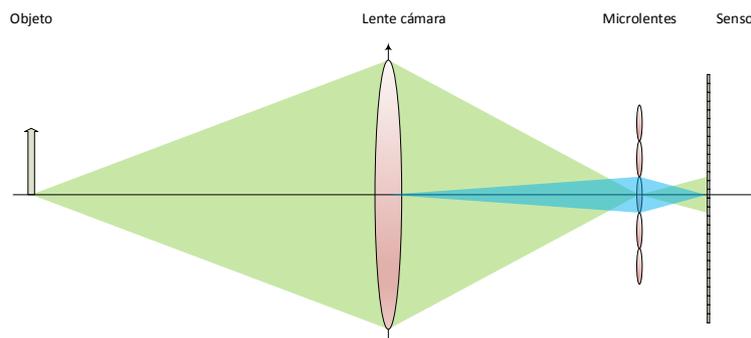
Muchos ejemplos pueden encontrarse, en la historia de la ciencia y de la tecnología, de intentos que persiguieron la medida del "Light Field". A principios del siglo XX, F. Ives (Ives, 1903) presentaba un sistema con conjunto de orificios en el plano focal y en 1908 Lippmann, que obtuviera el Premio Nobel por un sistema para la reproducción de los colores en fotografía, describía el primer dispositivo orientado a la captura del "Light Field" (Lippmann M. G., 1908).

La formulación moderna del concepto de “Light Field” fue introducida por Adelson y Wang en 1992 (Adelson, 1992), mientras que en 2005 Ren Ng (Ng, 2005) promovió un significativo salto adelante cuando construyó un prototipo funcional y estableció una visión del proceso de formación de imagen basada en transformaciones de Fourier de cuatro dimensiones.

El uso de la Cámara Plenóptica para la obtención en tiempo real de información tridimensional y mapas de profundidades fue patentado en 2006 por el grupo de la Universidad de La Laguna en el que ha sido desarrollada la presente Tesis Doctoral, con el nombre de CAFADIS (Cámara de Fase y Distancia) (International Patente nº ES200800126 ES200600210, 2006), y su explotación comercial está en marcha desde entonces.

El uso de arrays de microlentes colocados en el plano focal para la medida de fase de frente de onda en pupila fue descrito por Clare y Lane (Clare & Lane, 2005) para el caso de fuentes puntuales.

La Cámara Plenóptica se diferencia de una cámara convencional en que el plano imagen se subdivide espacialmente por medio de una matriz de microlentes (Figura 1.4), retrasándose el detector hasta la distancia focal de las microlentes, de forma que éste registra una imagen independiente de la apertura del sistema, asociada al punto de vista definido entre la microlente y la lente objetivo.



*Figura 1.4 Diagrama óptico de la cámara plenóptica. Se representan los dos sistemas de imagen que coexisten: El principal (verde) que obtiene la imagen del objeto y el secundario, que reimagina la apertura, para el caso de la microlente central.*

En el caso de un telescopio (Figura 1.5), la ubicación de la matriz de microlentes es igualmente el plano focal, y cada una de las subimágenes contiene la iluminación de la apertura que procede del ángulo correspondiente a la posición de la microlente en el plano focal, ya que en este caso los objetos estelares los suponemos ubicados en el infinito desde el punto de vista óptico.

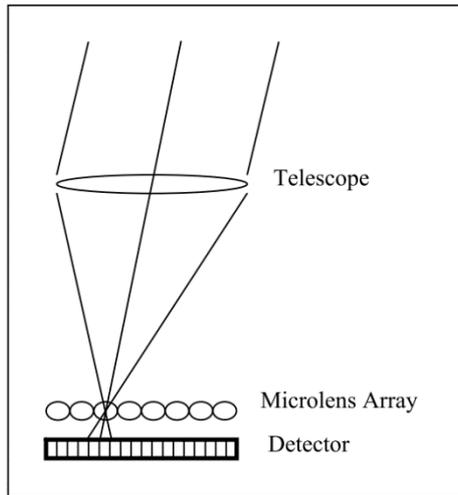


Figura 1.5 Esquema de la utilización de la Cámara Plenóptica en observaciones astrofísicas

Con esta organización, la cámara plenóptica muestrea a la vez la imagen y la apertura del sistema óptico, sacrificando parte de la resolución espacial en imagen que se podría lograr, para obtener otras informaciones relevantes que también están disponibles en el interior del sistema óptico –no en vano han entrado por la apertura- y que pueden resultar útiles en diferentes aplicaciones, tales como el reenfoque y el cálculo de la distancia. En la presente Tesis demostraremos que ello permite, con las consideraciones prácticas que expondremos, la utilización de la misma como sensor de frente de onda.

Un diagrama que describe la configuración de los diversos elementos relevantes aparece en la Figura 1.6, donde se han representado los objetos de interés, situados en el infinito generalmente, las capas de turbulencia, y se han trazado algunos rayos para esquematizar la formación de imagen correspondiente a tres zonas de pupila.

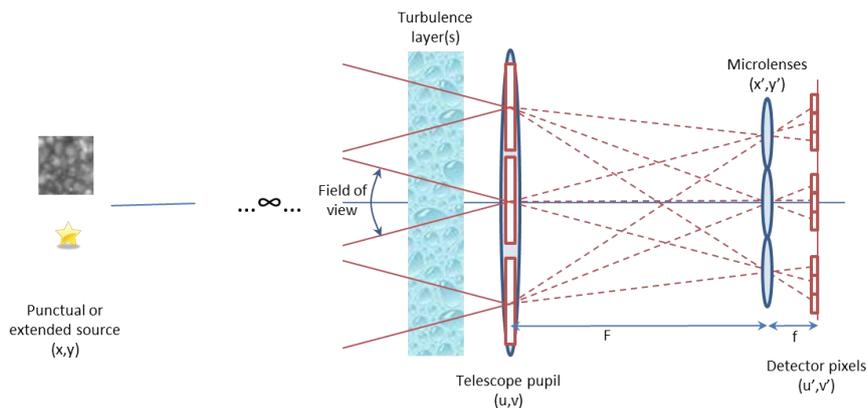
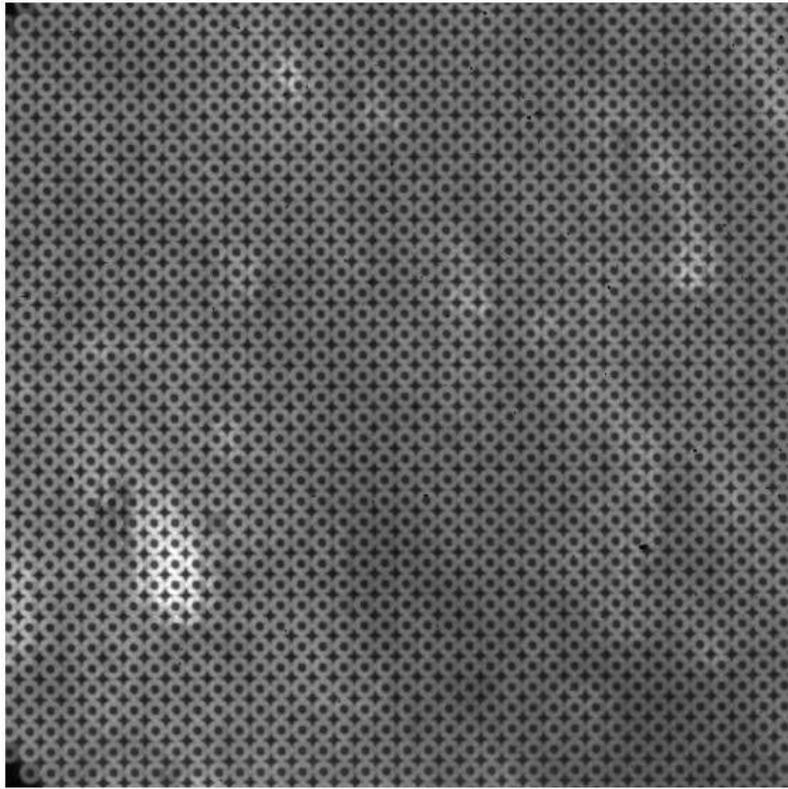


Figura 1.6 Utilización de la cámara plenóptica en astronomía, en las que objetos puntuales o extensos, en el infinito, son observados a través de una capa de turbulencia próxima a la apertura, y ésta es reimaginada desde múltiples ángulos con un array de microlentes.

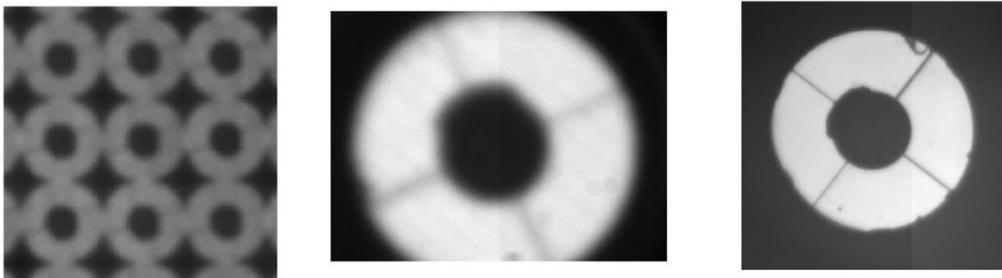
A modo de ejemplo introductorio, presentamos seguidamente una imagen plenóptica de la Luna (Figura 1.7), adquirida durante las observaciones realizadas en el mes de noviembre de 2011 en el telescopio OGS (Optical Ground Station) del Observatorio del Teide. Se trata de una imagen de 2048x2048 píxeles adquirida con el sensor CCD monocromo marca JAI modelo TM4200GE, habiendo utilizado una matriz de 25 mm de distancia focal y 400 micras de diámetro,

reimaginada de forma que fueran efectivas un total de 37x37 microlentes.



*Figura 1.7 Imagen plenótica de la Luna, con 37x37 microlentes*

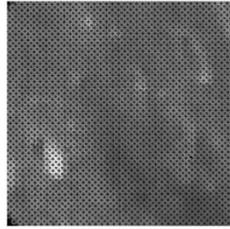
En la Figura 1.7 puede identificarse la matriz de imágenes de la pupila, cada una con el oscurecimiento central debido al espejo secundario y los soportes del mismo, tal y como cabría esperar de la forma de un telescopio reflector convencional. Se apreciarán mejor en la ampliación recogida en la Figura 1.8 (izquierda):



*Figura 1.8 Ampliación de la imagen plenótica (izq.) en la que se identifica la peculiar geometría de la pupila del telescopio OGS, la cual se muestra en imágenes independientes con un cierto desenfoque (centro) y enfocada (derecha)*

En el centro puede verse una imagen específica de la pupila del telescopio OGS, ligeramente desenfocada, que muestra el oscurecimiento central debido al espejo secundario con la protuberancia debida al conjunto de espejos que conducen hasta el foco Coudè, así como los cuatro elementos de soporte que componen la estructura coloquialmente conocida como “araña”. A la derecha se incluye una imagen enfocada de la apertura, en la que aparecen incluso los cables de activación del motor del espejo secundario en la parte superior.

La zona de la Luna de la que se trata puede verse con baja resolución en la Figura 1.9, obtenida simplemente reduciendo el tamaño impreso de la imagen plenóptica en cuestión:



*Figura 1.9 Imagen de la Luna obtenida por sencilla reducción, realizada con la finalidad de apreciar visualmente los detalles que ofrece.*

La imagen plenóptica puede considerarse como el resultado de sacrificar la resolución espacial máxima posible de la que se dispondría en el plano focal, suponiendo una escala de placa acorde con el límite de resolución de difracción del telescopio, para usar los píxeles alrededor de un ángulo determinado para sensar separadamente cada una de las zonas de la apertura de entrada relacionadas con el cilindro de luz asociado a la microlente. Así por ejemplo, en el ejemplo descrito, los 2048x2048 píxeles de la cámara utilizada se han repartido en 37x37 muestras angulares de la superficie de la Luna, en cada una de las cuales hay aproximadamente 55x55 muestras de la apertura del sistema.

A lo largo de la presente Tesis expondremos cómo la cámara plenóptica es capaz de muestrear el “Light Field” entrante en el sistema óptico, un telescopio en nuestro caso, midiendo así toda la información disponible en el interior, y por tanto puede ser utilizada como sensor de frente de onda, demostrándolo tanto en laboratorio como en pruebas específicas en telescopio.

### **1.3 Organización de la presente memoria**

Tras este capítulo introductorio, en el que se han presentado unas pinceladas de lo que es la cámara plenóptica y de lo que constituye el sensado de frente de onda, se procederá en el capítulo segundo a la demostración desde un punto de vista teórico de la viabilidad de calcular el frente de onda a partir de la salida de una cámara plenóptica, formulando los algoritmos, analizando las limitaciones e identificando las situaciones óptimas de utilización, haciendo una comparación con los sensores de frente de onda tradicionales como son el Shack-Hartmann, Curvatura y Pirámide. Asimismo se formulará y justificará la aproximación según la cual cualquiera de los algoritmos de sensado de frente de onda es formulable como un cierto procesado a posteriori sobre la salida de una cámara plenóptica, corroborando una vez más el camino conceptual que parte de la función “Light Field” como atesoradora de la totalidad de la información que penetra en una apertura, que continúa al considerar la cámara plenóptica como medida eficaz del citado “Light Field”, y que puede terminar en la obtención de cualquier información relevante referente a la escena tras el procesado a posteriori que sea necesario.

En el capítulo tercero se recorrerán los métodos propuestos para realizar la calibración de una cámara plenóptica, un paso extremadamente importante en un sensor real y que a menudo queda obviado en los estudios teóricos, sin la cual sencillamente es imposible utilizar una cámara plenóptica real.

El capítulo cuarto contendrá el planteamiento y resultados de los experimentos de laboratorio que se idearon para verificar la viabilidad de la medida de frentes de onda con la cámara plenóptica, usando placas de fase como elementos de referencia capaces de producir un frente de onda conocido a priori, que luego será extraído de los datos por los algoritmos propuestos.

El capítulo quinto contendrá los planteamientos y resultados de las observaciones realizadas en telescopio utilizando la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda, validado en tres experimentos diferentes respecto al enfoque del telescopio, respecto a función estructura y en comparación simultánea con un sensor convencional Shack-Hartmann, que permitieron verificar en todos los casos la efectividad de la medida.

En capítulo sexto se analiza la viabilidad de la realización en tiempo real del procesado requerido para la utilización de la cámara plenóptica como sensor de frente de onda, utilizando lógica reprogramable (FPGA) para implementar el mismo en forma masivamente paralela, y así poder lograr los requerimientos de velocidad y latencia necesarios en los sistemas de Óptica Adaptativa.

Finalmente en el capítulo séptimo se resumen las conclusiones alcanzadas y se proponen algunas actividades de futuro, muchas de las cuales están ya en marcha en el momento de la defensa de la presente Tesis Doctoral.

## 2 Capítulo II. Marco teórico.

*“Before I die, I hope someone will clarify quantum physics for me.  
After I die, I hope God will explain turbulence to me.”  
Albert Einstein*

Una vez presentada la Función Plenóptica y relacionadas algunas de sus potencialidades, seguidamente mostraremos en el presente capítulo la forma en la que la Cámara Plenóptica mide directamente esta función, así como algunas de sus utilidades.

Como ya se ha dicho anteriormente, la configuración tradicional de cámara plenóptica ubica un conjunto de microlentes a la distancia focal de la lente de cámara principal, y requiere que aquéllas mantengan el mismo número  $F$ , es decir, que la relación entre diámetro y distancia focal sea idéntica para el sistema de imagen principal y para las microlentes. Es fácil e intuitivo ver que si en esta situación se coloca el detector en la focal de las microlentes, éstas generarán una imagen de la apertura perfectamente enfocada sobre el mismo.

La Figura 2.1 muestra un sistema óptico simulado con ayuda del programa de diseño Zemax, en el cual la lente principal de cámara es una lente delgada teórica en aproximación paraxial, con una distancia focal de 200 mm, sobre la que se ha colocado una apertura con un oscurecimiento rectangular para facilitar la ilustración del funcionamiento. Se ha incluido en el sistema simulado una única microlente, modelada también como lente delgada teórica de 400 micras de diámetro y 25 mm de focal, similar a la usada en los experimentos posteriores. Esta microlente se coloca a la distancia focal de la lente principal. El sistema supone un objeto situado en el infinito y analiza tres campos en tres colores diferentes, trazando rayos paralelos desde la apertura para cada uno de estos tres campos simulados. Como cabe esperar, puede verse que cada uno de los campos del objeto hace imagen sobre la microlente en un punto diferente de la misma. Debido a la pequeña dimensión de la microlente respecto a la lente de cámara, se da el caso de que los rayos procedentes del mismo lugar de la apertura llegan paralelos a la microlente, y por tanto formarán una imagen de la apertura a la distancia focal de las microlentes.

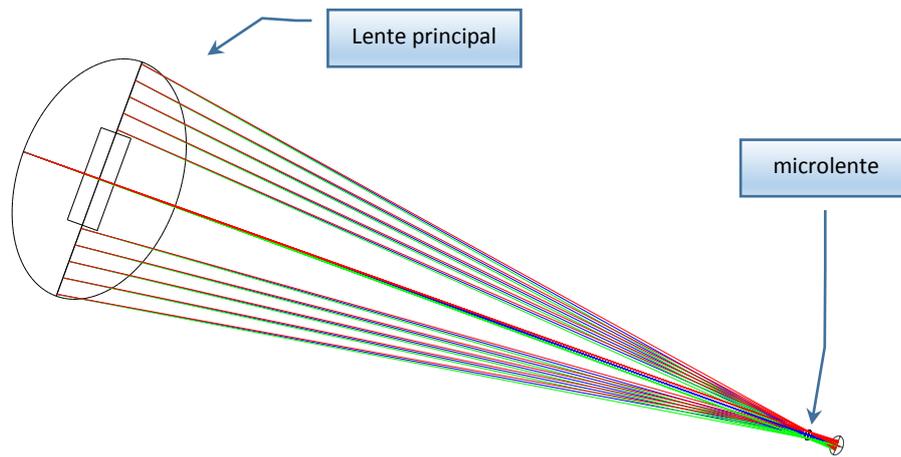


Figura 2.1 Esquema Zemax de un sistema óptico con una apertura peculiar en la lente principal, mostrando la reimaginación de la misma que realiza una de las microlentes.

La Figura 2.2 muestra de forma ampliada la microlente y la imagen de la apertura formada por la misma:

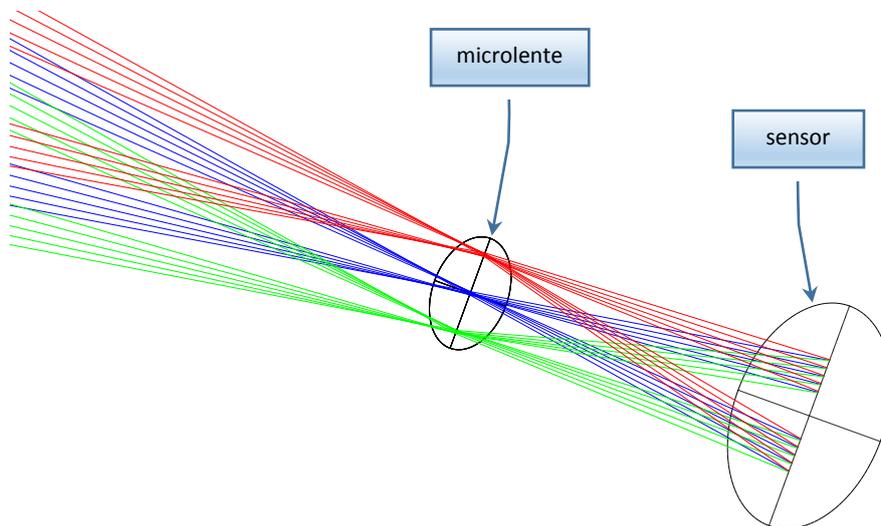


Figura 2.2 Ampliación de la zona final del diagrama, que muestra la reimaginación de la peculiar geometría rectangular de la apertura sobre el detector.

En ella se observan los efectos antes mencionados de que los rayos que llegan con diferentes inclinaciones a la apertura, procedentes de los campos del objeto situados en el infinito, hacen imagen en lugares diferentes de la microlente, pero todos ellos se combinan por efecto de ésta para generar una imagen de la propia apertura a la distancia focal de la microlente, donde los rayos de los diferentes colores vuelven a coincidir.

La Figura 2.3 muestra una imagen de la apertura con el oscurecimiento rectangular utilizado para ilustrar la formación de la imagen de la apertura y la calidad de dicha imagen. Se ha calculado con 10.000 rayos a la distancia focal de las microlentes:

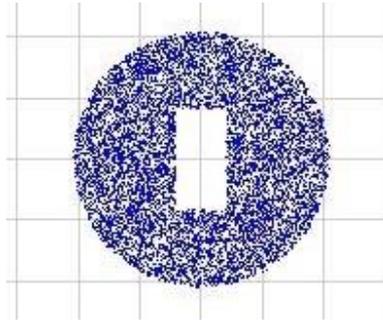


Figura 2.3 Imagen de la apertura con obstrucción rectangular simulada mediante trazado de 10.000 rayos, obtenida por efecto de la microlente considerada, sobre el detector.

Otra consideración especialmente significativa es la que permite estimar cuál sería la relación focal de las microlentes que permita un mejor aprovechamiento del detector, en la medida en la que pueda acomodar las múltiples imágenes del array de microlentes sin que éstas se superpongan. Si únicamente utilizamos consideraciones geométricas, el tamaño óptimo sería aquél en el que las imágenes de las diversas microlentes aparecen adyacentes las unas a las otras sobre el detector, situación que se corresponde con el hecho de la lente principal y las microlentes tengan la misma relación focal ( $F\# = f/D$ ) (Ng, 2005).

El origen de esta condición puede explicarse fácilmente al observar en la Figura 2.4 que el diámetro de la imagen de la apertura en el detector, generada por una microlente, puede calcularse trazando únicamente los rayos procedentes del extremo de la misma, los cuales no se desviarán al pasar por el centro de la microlente.

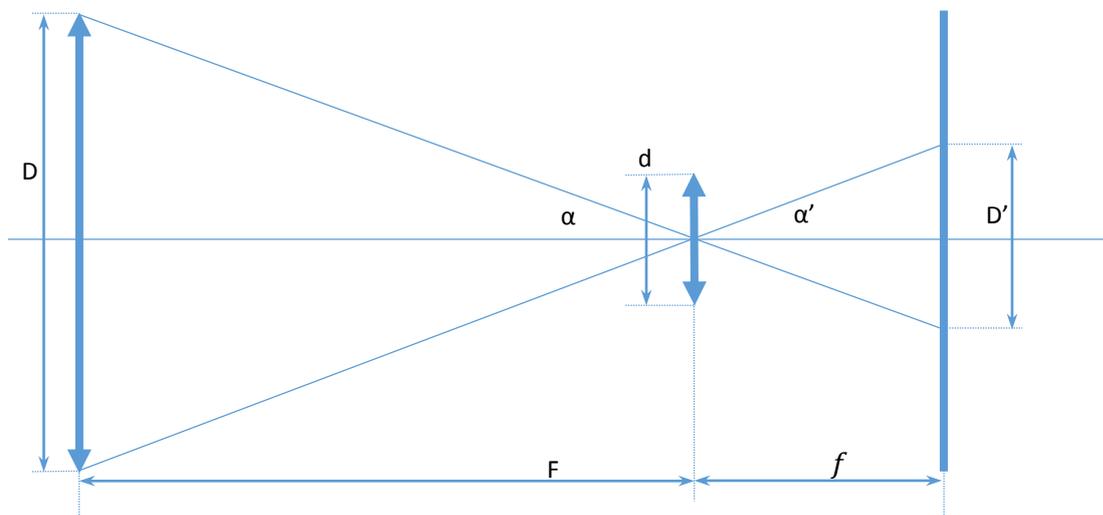


Figura 2.4 Diagrama geométrico para la derivación de la expresión que rige el tamaño de la imagen de la apertura sobre el detector.

En esa situación los ángulos  $\alpha$  y  $\alpha'$  son iguales y por lo tanto también sus razones trigonométricas, con lo que se cumplirá que:

$$\frac{D'}{f} = \frac{D}{F}$$

...y por lo tanto el tamaño de la imagen de la apertura será:

$$D' = \frac{f \cdot D}{F}$$

Según lo comentado anteriormente, la situación óptima se produce cuando el tamaño de la imagen de la apertura es idéntico al de la microlente ( $D'=d$ ), lo que sucederá cuando

$$\frac{d}{f} = \frac{D}{F}$$

es decir, teniendo la misma relación focal para la lente de cámara y para la microlente.

Este cálculo se ha realizado utilizando el modelo de lente delgada y únicamente óptica geométrica. Posteriormente se analizarán otras consideraciones tras las cuales se deducirá que un cierto margen entre las imágenes de la apertura resulta beneficioso en aplicaciones prácticas.

## 2.1 Efecto de la calidad de la imagen de la apertura.

La calidad de la imagen de la apertura que las microlentes generan sobre el detector adquiere una especial relevancia debido a que supone la limitación principal para el uso de la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda. Al objeto de ilustrar la naturaleza del problema analizaremos seguidamente un sistema plenóptico extremadamente simplificado, en el que una apertura situada a todos los efectos en la lente principal de cámara es imaginada sobre un detector a través de una microlente. Se han usado lentes delgadas paraxiales con dimensiones similares a las utilizadas a lo largo de la presente Tesis, con microlentes de 400 micras de diámetro y 4 mm de focal. La lente de cámara, de 200 mm de focal, se ha dotado de un diafragma de 20 mm de diámetro para lograr la misma relación focal que tiene la microlente:

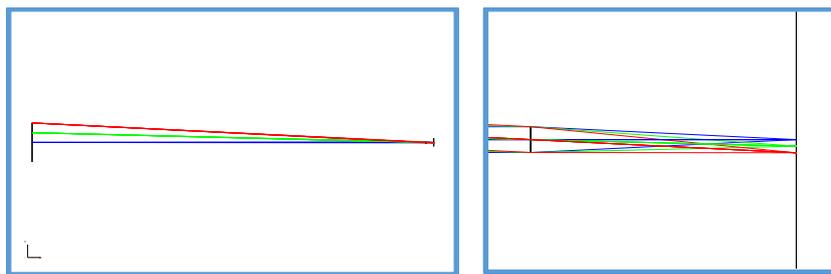


Figura 2.5 Diagrama Zemax global (izq.), y ampliación de la zona posterior a la microlente (der.), utilizado para analizar la calidad de la imagen de pupila.

Al objeto de evaluar la calidad de la imagen de la apertura, se realiza un análisis de rayos a diversas distancias del foco (intervalos de 100 micras) cuyos resultados se muestran en la Figura 2.6:

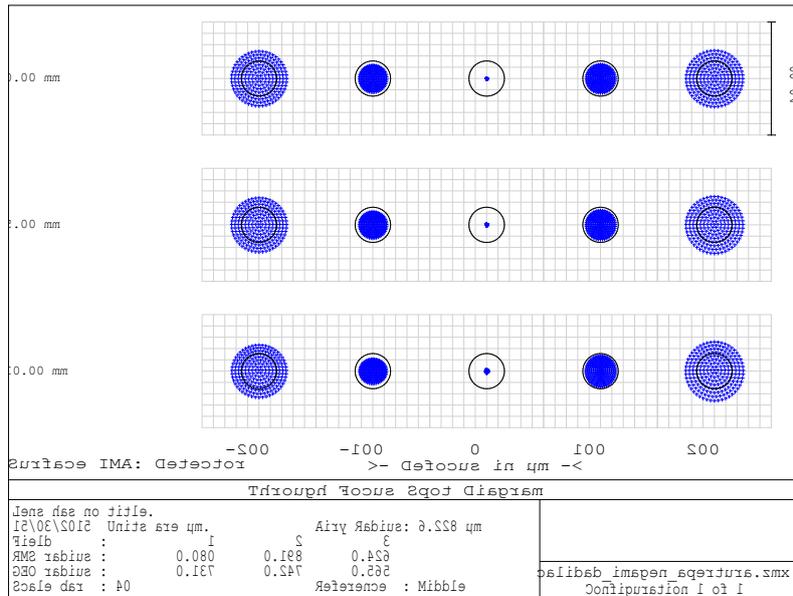


Figura 2.6 Resultados de Zemax mostrando la calidad de la imagen de pupila, en la que se aprecia que la elevada calidad geométrica se ve tremendamente empañada por la difracción, como muestra el tamaño del disco de Airy superpuesto.

...donde puede apreciarse cómo la calidad de la imagen de la pupila es muy elevada en el foco, incluso para el extremo de la apertura, siempre que no se considere el efecto difractivo. Sin embargo, si se considera el tamaño de la imagen de difracción que genera la microlente debido a su relativamente pequeño tamaño, y que aparece indicado y representado en la figura con un radio de 6.228 micras, puede confirmarse que la calidad de la imagen de la apertura en el detector estará fuertemente limitada por este motivo.

El radio del disco de Airy, que constituye la imagen de difracción generada por la microlente, vendrá dado por la expresión (Goodmann, 1996):

$$r = \frac{1.22\lambda f}{d}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $f$  la distancia focal y  $d$  el diámetro, siempre que supongamos una microlente circular. Puede por lo tanto comprobarse que depende directamente de la relación focal  $f/d$ , de modo que vendrá automáticamente fijado para la situación de utilización óptima del detector antes mencionada, que expresa que las relaciones focales de microlentes y cámara principal sean idénticas.

En resumen, dentro de las consideraciones planteadas sobre la calidad de imagen de la apertura, cada uno de los píxeles del detector estará entonces recogiendo una muestra de luz correspondiente a unas coordenadas de la apertura ( $u_1, u_2$ ), y a la vez a unas coordenadas del campo ( $s_1, s_2$ ), con lo que proporciona directamente una muestra de la función Plenóptica (Figura 2.7).

Concretamente, en el caso de que el sistema contenga un número  $N_m$  de microlentes operativas, cada una de las cuales genere una imagen de pupila sobre  $N_p$  píxeles, dispondríamos de un total de  $N_m \times N_p$  muestras de la función plenóptica.

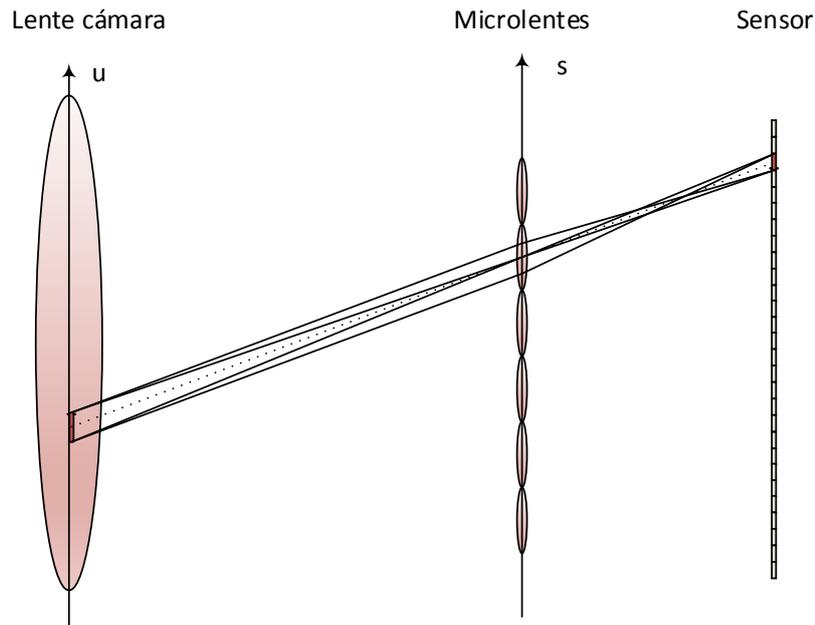


Figura 2.7 Diagrama que traza en una única dimensión la correspondencia de uno de los píxeles del detector, a través de una de las microlentes –determinando así el punto de vista-, con una zona específica de la apertura.

## 2.2 La fotografía digital

La fotografía digital a partir de la Función Plenóptica o “Light Field” emerge como resultado principal de la integración de una rebanada de la misma, que puede incluso beneficiarse de un tratamiento numérico favorable usando transformaciones de Fourier de cuatro dimensiones (Ng, “Fourier Slice Photography”, 2005).

La ecuación que define la fotografía digital es, por definición, la integral del “Light Field” en el plano imagen que se considere:

$$E(s_1, s_2) = \frac{1}{D^2} \iint L(u_1, u_2, s_1, s_2) \cdot A(u_1, u_2) \cdot (\cos \theta)^4 du_1 du_2$$

...donde D es la distancia entre la apertura y el plano imagen,  $(u_1, u_2)$  son las coordenadas que recorren la apertura y  $(s_1, s_2)$  las que recorren el plano imagen (Stroebel, Compton, Current, & Zakia, 1986). A es una función de apertura que vale la unidad donde hay entrada de luz, y cero en el resto del plano de apertura, y  $\theta$  es el ángulo de incidencia de luz.

Partiendo de una expresión general que supone el conocimiento de la mencionada Función Plenóptica, convenientemente simplificada para considerar únicamente propagación paraxial e ignorando factores multiplicativos, consideremos un sistema capaz de hacer imagen con una apertura cualquiera como el de la Figura 2.8,

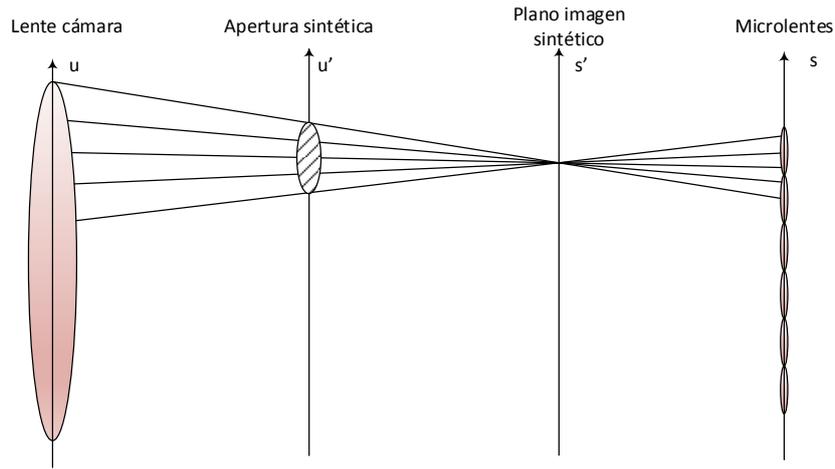


Figura 2.8 Esquema que muestra la forma en la que el conocimiento de la Función Plenóptica o "Light Field" permite la síntesis mediante cálculo de otras aperturas o planos imagen.

en cuyo interior supondremos conocida la función plenóptica. A partir de los planos  $u$  y  $s$ , con coordenadas  $(u_1, u_2)$  y  $(s_1, s_2)$  respectivamente, se puede derivar analíticamente la expresión que permite simular otras aperturas y otros planos imagen, que en la Figura 2.8 se representan como  $u'$  y  $s'$ , de la forma

$$E'(s_1, s_2) = \iint L'(u'_1, u'_2, s'_1, s'_2) A(u'_1, u'_2) (\cos \theta)^4 du_1 du_2$$

siempre que tengamos la equivalencia entre  $L$  y  $L'$ , que viene a ser (Ng, 2005)

$$L'(u'_1, u'_2, s'_1, s'_2) = L\left(s'_1 + \frac{u'_1 - s'_1}{\delta}, s'_2 + \frac{u'_2 - s'_2}{\delta}, u'_1 + \frac{s'_1 - u'_1}{\gamma}, u'_2 + \frac{s'_2 - u'_2}{\gamma}\right)$$

donde por conveniencia se ha definido los factores gamma y delta de la forma:

$$\gamma = \frac{\alpha + \beta - 1}{\alpha}$$

$$\delta = \frac{\alpha + \beta - 1}{\beta}$$

obteniéndose todas las relaciones de la Figura 2.9, en la que se representa únicamente una de las dos dimensiones de los planos de apertura y sensado ( $u, s$ ):

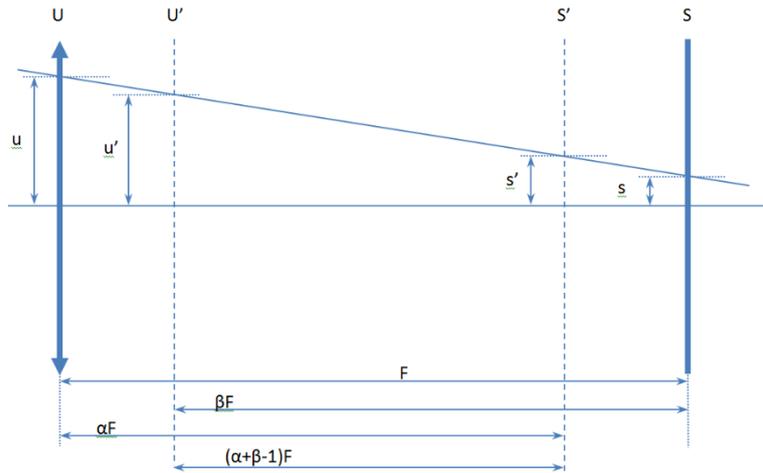


Figura 2.9 Geometría de un rayo cualquiera que atraviesa las superficies de apertura y sensado, junto al significado físico de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  respecto a la focal  $F$  del sistema.

El cambio de coordenadas entre las correspondientes a los planos de apertura y sensado reales y los sintetizados se calcula mediante trigonometría elemental utilizando un rayo cualquiera, como el que se dibuja en la Figura 2.9, y entendiendo que la función plenóptica para ese rayo será idéntica en ambos sistemas de coordenadas, es decir:

$$L'(u', v', s', t') = L(u, v, s, t)$$

Analizando los triángulos que tienen el rayo como hipotenusa, se obtiene:

$$\frac{u - s'}{\alpha F} = \frac{u' - s'}{(\alpha + \beta - 1)F}$$

y también

$$\frac{u' - s}{\beta F} = \frac{u' - s'}{(\alpha + \beta - 1)F}$$

...de donde se deducen directamente las expresiones anteriores para  $u$  y  $s$  en función de  $u'$  y  $s'$ , y que permiten obtener la expresión citada anteriormente de  $L'$  en función de  $L$ .

Es importante tener en cuenta alguna de las consecuencias que se derivan de la expresión hallada, que ilustran sobre el enorme potencial de la Función Plenóptica. Permite directamente realizar operaciones como cambios de focal, síntesis de aperturas, síntesis de planos focales, y otras más elaboradas como reenfoque, "Focal Stack", cálculo de profundidades, cálculo de puntos de vista,... todos los cuales han venido dando lugar a utilizaciones variadas de la Cámara Plenóptica, en la medida en la que ésta realiza una medida -con una cierta resolución limitada- de la Función Plenóptica.

Algunos casos especiales de la expresión merecen ser comentados, empezando por el que reproduciría el sistema original, cuando  $\alpha$  y  $\beta$  son la unidad, que conducen a que  $\gamma$  y  $\delta$  también valen la unidad y entonces  $L'=L$ , como no podía ser de otra manera. También podemos analizar el caso en el que  $\alpha + \beta = 1$ , que correspondería a que se superpongan los planos de apertura y sensado sintetizados. En este caso, relativamente poco sensato, se obtendrían valores cero para

$\gamma$  y  $\delta$ , los cuales provocarían indeterminaciones en los términos en los que estos parámetros aparecen en el denominador. En esta situación efectivamente la función plenóptica sintetizada no estaría definida, ya que las coordenadas  $u'$  y  $s'$  serían idénticas y por cada uno de sus valores pasarían un número infinito de rayos.

Otro caso significativo sucede cuando únicamente estamos interesados en obtener en un plano un único punto de la apertura, en cuyo caso dos de las dimensiones quedan automáticamente fijadas y la función plenóptica cuatridimensional se convierte en bidimensional, pudiendo entonces obtenerse la imagen del objeto correspondiente a ese punto de la apertura exclusivamente.

Finalmente, el caso en el que, utilizando toda la apertura, estemos interesados en conocer cuál sería la imagen correspondiente a otro plano focal, tendríamos el caso particular de  $\beta = 1$  y por lo tanto  $\delta = \alpha$  y  $\gamma = 1$ , que sería la expresión que permite recalculer el reenfoque a cualquier otra distancia diferente de la focal de la lente.

Debe tenerse en cuenta, no obstante, que para que toda la potencialidad de la función plenóptica pudiera obtenerse, sería necesaria su determinación en forma continua, y debería estar definida en todos y cada uno de los puntos de la apertura y en un plano "s" de sensado teóricamente infinito en extensión. Sólo en esta hipotética situación se podría realmente recalculer cualquier focal o cualquier campo. En la práctica, únicamente una pequeña proporción de esta infinidad de valores son conocidos a partir de su medida con la Cámara Plenóptica, y por lo tanto la capacidad de síntesis es limitada y a menudo requiere de interpolación.

## 2.3 Representación gráfica de la Función Plenóptica

La representación gráfica habitual que se utiliza para mostrar el resultado del muestreo de la función plenóptica consiste en representar únicamente dos de las dimensiones involucradas, una de las dimensiones del plano imagen y una de las dimensiones del plano pupila, ignorando deliberadamente las otras dos, lo cual conduce a un diagrama de dos dimensiones como el de la Figura 2.10:

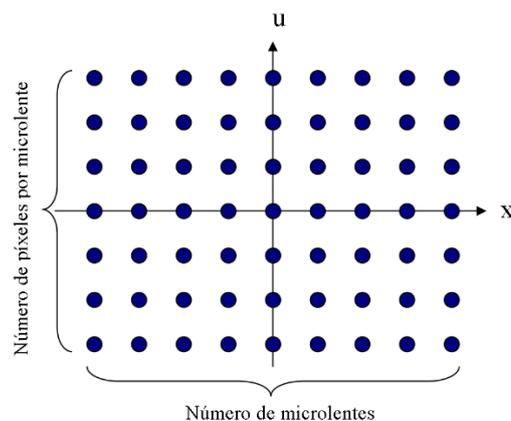


Figura 2.10 Representación gráfica de una Función Plenóptica, tomando una de las dimensiones del plano imagen y otra del plano pupila.

En este diagrama la dimensión espacial directa del sensor se representa en el eje horizontal, que equivaldría a la coordenada horizontal de la imagen, y para cada una de estas coordenadas, se representan verticalmente los diferentes puntos de vista que se obtienen a partir de cada uno de los píxeles del sensor que están directamente detrás de la microlente. Cada punto así representado es una “muestra” de la Función Plenóptica, cuyo valor aparecería en un eje Z que no se dibuja en la figura. Naturalmente, el lector debe considerar que la función plenóptica tiene en realidad otras dos dimensiones que no se dibujan por las limitaciones de la representación, pero que se comportarían de una manera análoga.

Sobre este diagrama es relativamente simple describir muchas de las operaciones que se realizan con la función plenóptica una vez medida, como por ejemplo la obtención de la imagen de baja resolución, que se obtendría acumulando todos los píxeles correspondientes a una microlente, lo que equivaldría a acumular la dimensión vertical:

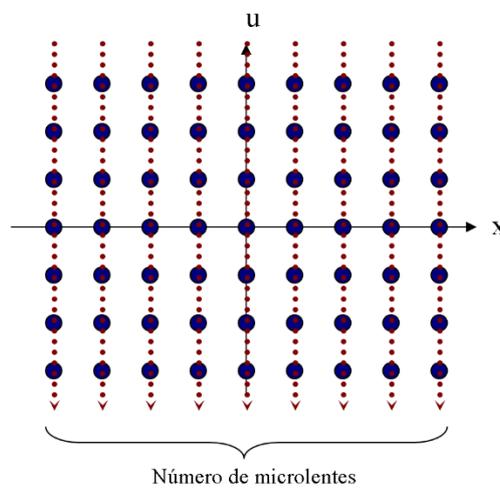


Figura 2.11 Obtención de la imagen de baja resolución a partir de la integración de todas las muestras de la Función Plenóptica correspondientes a una microlente

La acumulación indicada en la Figura 2.11 conduciría a una de las líneas de la imagen de baja resolución resultante, mientras que otras estrategias de acumulación generarían las imágenes correspondientes a planos de reenfoque diversos como se muestra en la Figura 2.12, en la que únicamente se muestra cómo se conseguiría uno de los píxeles de la imagen resultante:

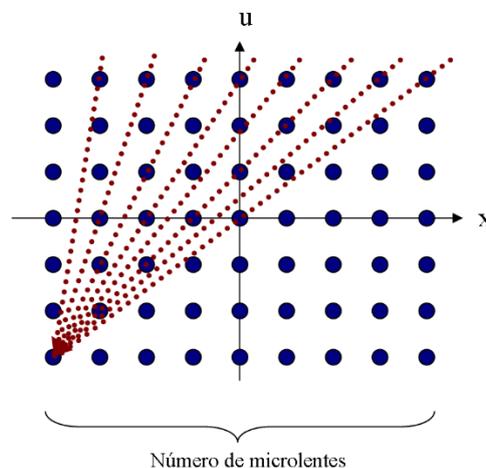


Figura 2.12 Acumulaciones oblicuas indicando diversos planos de enfoque

La Figura 2.12 también permite mostrar el hecho de que la cámara plenóptica únicamente proporciona un cierto muestreo de la función plenóptica, dado que solamente son conocidas las muestras del plano que se indican en la figura. Por esta razón será necesario recurrir a interpolaciones o aproximaciones para generar las zonas del plano de las que no hay información directa.

El cálculo de las imágenes correspondientes a diversos planos de enfoque ha sido el motivo de trabajos de otros compañeros del grupo de investigación (Marichal-Hernández et al, 2012), por lo que no incidiremos en ello especialmente. Se trata, sin embargo, del campo que en primer lugar ha sido explotado y que permite operar sobre el concepto de “Focal Stack”, o conjunto de imágenes a diversas distancias de enfoque, que es la base de la obtención de los mapas de distancias de cara a las cámaras 3D.

## 2.4 Síntesis de las imágenes asociadas a cada zona de la apertura.

La prestación de la Cámara Plenóptica que en mayor medida se va a emplear en esta Tesis no es la que permite el reenfoque, ni el cálculo de la tercera dimensión ya comentados, sino la capacidad de generar digitalmente la imagen correspondiente a cada una de las zonas de la apertura, lo cual permitirá estimar directamente la pendiente del frente de onda en ese punto y por lo tanto, el frente de onda total.

La Figura 2.13 representa cuál es la correspondencia entre una determinada zona de la apertura y su equivalente en la imagen plenóptica. A la izquierda se parte de un esquema de la apertura, que representa el caso típico de un telescopio en el que la pupila está compuesta esencialmente por el oscurecimiento central causado por el espejo secundario y las cuatro barras de soporte del mismo. En la parte central de la figura aparece una indicación de la imagen plenóptica que se obtendría en el sensor, en la que la radiación procedente de cada uno de los ángulos de incidencia es aislada en la correspondiente subimagen, según se indica por las flechas discontinuas. Finalmente, en la parte derecha se muestra, indicado por flechas continuas, cuál es el procedimiento para la reconstrucción de la imagen correspondiente al punto de la apertura citado.

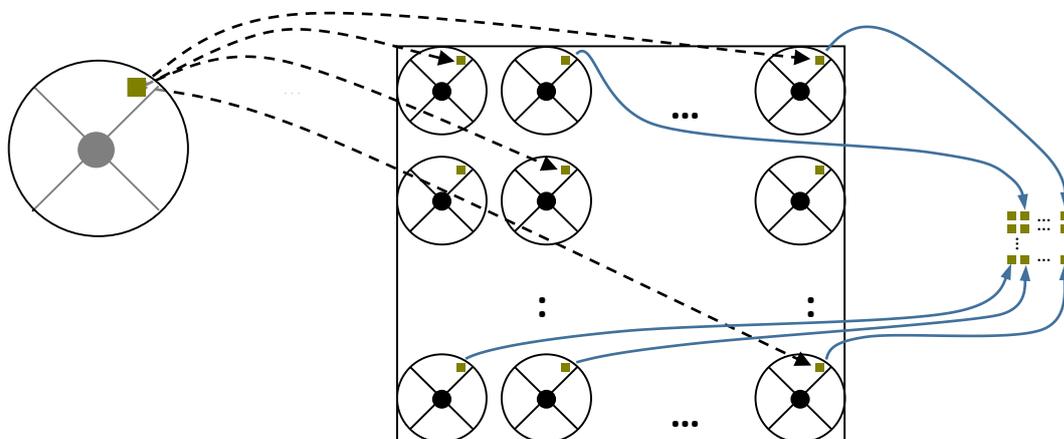


Figura 2.13 Esquema conceptual del algoritmo de síntesis de las imágenes asociadas a cada zona de la pupila. La luz que atraviese el punto indicado en color verde oliva acabará en alguno de los puntos asociados de las imágenes, dependiendo del ángulo de incidencia. La recomposición indicada permitirá sintetizar la imagen correspondiente.



desplazamiento lateral relativo y de ahí extraer la pendiente del frente de onda asociada a ese punto. Naturalmente, el sistema de representación utilizado únicamente contempla uno de los dos ejes, en este caso el X, por lo que sólo indica en la Figura 2.14 cómo se obtendría el desplazamiento en dicho eje y por tanto la pendiente del frente de onda en esa dirección. Un procedimiento análogo se utilizaría en el eje Y.

## 2.5 Recuperación del frente de onda a partir de los gradientes

La Cámara Plenóptica, como se demuestra en esta Tesis, es capaz de medir los gradientes del frente de onda en la apertura del sistema. Al igual que sucede con muchos otros sensores de frente de onda, la obtención del frente de onda propiamente dicho requiere la realización de una integración de coordenadas espaciales que convierta los gradientes medidos en la superficie que se pretende conocer, proceso que habitualmente se denomina “reconstrucción”. Este paso, no obstante, puede obviarse en ocasiones en sistemas de óptica adaptativa, dependiendo del tipo de control que se desee llevar a cabo, es decir, del conjunto de modos en los que este control vaya a actuar, ya que en este caso son únicamente esos modos los que deben estimarse, quedando la reconstrucción como mero elemento de visualización o referencia.

Sin embargo, al tratarse de un problema ampliamente tratado en el pasado y muy estudiado en la literatura (Hardy J. F., 1974), únicamente plantearé aquí unas breves pinceladas sobre los métodos más habituales, y un esbozo del método utilizado en la presente Tesis, procedente de trabajos realizados en el pasado por miembros del grupo de investigación. (Rodríguez-Ramos J., 1997)

Normalmente hay muchos caminos de gradientes entre dos muestras de frente de onda, por lo que la solución en general no es única y debe seguirse una aproximación estadística o una optimización. Hay también múltiples posibilidades de relacionar los gradientes que se miden con las muestras de fase que se pretende recuperar, como se muestra en la Figura 2.15, dependiendo de si las muestras del frente de onda se ubican en los laterales de las microlentes (o zonas equivalentes en nuestro caso), en las esquinas, o directamente en el centro.

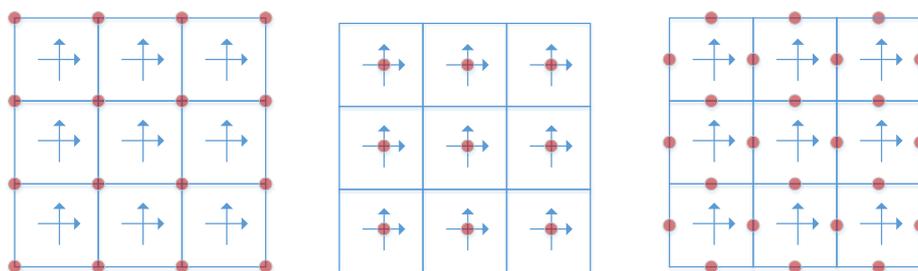


Figura 2.15 Algunos esquemas de reconstrucción dependiendo de las relaciones geométricas existentes entre las muestras calculadas y los gradientes medidos. (Izquierda: “Fried”, centro: “Southwell”, derecha: “Hudgin”)

Cada una de las organizaciones posee ventajas e inconvenientes, sobre todo dependiendo de cuál sea la posición de los actuadores en un hipotético espejo deformable que se encargue de corregir en tiempo real el frente de onda.

Una solución relativamente simple es plantear la resolución matricial, a partir de la formulación de que los gradientes medidos están relacionados linealmente con las muestras de fase que se desea averiguar, de la forma:

$$\mathbf{s} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{w} + n$$

Donde  $\mathbf{s}$  es el vector de gradientes medido,  $\mathbf{w}$  es el vector de muestras del frente de onda correspondiente y “ $n$ ” es un término que resume el ruido inherente a toda medida física. “ $\mathbf{A}$ ” es entonces una matriz que depende únicamente de la geometría y que relaciona los gradientes con las muestras en sus alrededores, y que en general no es cuadrada. Esta ecuación puede invertirse en forma de aproximación por mínimos cuadrados (Hardy J. W., 1998), resultando:

$$\mathbf{w} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{s}$$

Otra alternativa, que puede ser útil cuando el número de operaciones a realizar en la inversión anterior es elevado, consiste en plantear una solución de la forma:

$$\mathbf{w}_{j,k}|_{(m+1)} = \frac{1}{g_{j,k}} \left( \mathbf{w}_{j,k}^S|_{(m)} + \mathbf{s}_{j,k}^S|_{(m)} \right)$$

En la que iterativamente se van obteniendo actualizaciones de los valores del frente de onda a partir de los valores de la iteración anterior y de los gradientes medidos, ambos combinados en los puntos adyacentes, en la medida en la que:

- $\mathbf{w}_{j,k}^S$  es la suma de los valores de frente onda adyacentes al punto de coordenadas  $(j,k)$
- $\mathbf{s}_{j,k}^S$  es la suma de los gradientes adyacentes al punto de coordenadas  $(j,k)$
- $g_{j,k}$  es el número de muestras adyacentes al punto de coordenadas  $(j,k)$ , (4 en general, pero 3 en los bordes y 2 en las esquinas)

Este método, conocido como de Gauss-Seidel, utiliza mayoritariamente sumas complementadas con divisiones simples, puede resultar más eficiente en muchos casos, y ha sido implementado en tiempo real mediante lógica reconfigurable (FPGA) en nuestro grupo de investigación (Marichal-Hernández, J.G. et al, 2005) (Díaz-García, 2010).

Por último mencionamos un tercer método, que es el que ha sido utilizado en la presente Tesis para la reconstrucción de los frentes de onda, que consiste en desarrollar el frente de onda en exponenciales complejas de la forma:

$$\phi(u_1, u_2) = FFT^{-1}(a_{pq})$$

Donde  $p$  y  $q$  son las frecuencias espaciales vertical y horizontal y  $\phi(u_1, u_2)$  es la fase en la apertura. Puede entonces demostrarse (Marichal-Hernández, Rodríguez-Ramos, & Rosa, 2007) que los coeficientes del mencionado desarrollo que minimizan el error cuadrático medio son:

$$a_{pq} = \frac{i \cdot p \cdot FFT[S^x(u_1, u_2)] + i \cdot q \cdot FFT[S^y(u_1, u_2)]}{p^2 + q^2}$$

...que no es más que la integración realizada en el dominio de Fourier mediante división por la variable independiente. Este método debe completarse con un cierto número de iteraciones de Gerschberg-Saxton (Gerchberg & Saxton, 1972) para poder compensar el efecto negativo de las irregularidades provocadas por la geometría circular, o incluso anular, de las aperturas de los sistemas habituales en Astrofísica.

## 2.6 Comparaciones con otros sensores de frente de onda

Cabe preguntarse qué beneficios pueden obtenerse de la formulación basada en Cámara Plenóptica frente a otros sensores conocidos, tales como el Pirámide o el tradicional sensor de Shack-Hartmann, el cual se ha usado para mostrar el proceso de reconstrucción del frente de onda. En el primer caso se resuelve de forma natural el problema de la saturación, y respecto al segundo, las ventajas se encuentran esencialmente en dos direcciones: La flexibilidad en el muestreo del frente de onda recuperado y la simplicidad en el caso de objetos extensos.

### 2.6.1 Comparación con el sensor de frente de onda de Pirámide

Para el caso de un objeto puntual, el sensor de frente de onda plenóptico quedaría asimilado al Pirámide (Ragazzoni, 1996) en cuanto situáramos la estrella en la esquina entre cuatro microlentes cualesquiera, con la sensible diferencia a favor de que no tienen por qué sufrirse los inconvenientes derivados de la saturación para deformaciones grandes, ya que en este caso sencillamente la mancha se extendería a lo largo de más de cuatro microlentes, resolviéndose de una forma natural el problema de la saturación.

Para ilustrar en mayor medida la comparación con el sensor de frente de onda de Pirámide, partimos de que en este sensor la imagen del objeto (puntual o asimilado) cuyo frente de onda se desea medir se hace incidir sobre el vértice de una pirámide (Figura 2.16), de forma que la luz queda físicamente repartida espacialmente en cuatro partes, procediendo luego a generar sobre el detector una imagen de la apertura con la luz de cada una de ellas. Un posterior análisis local comparativo de la luz que ha recibido cada una de las cuatro aperturas proporciona directamente una estimación de la pendiente del frente de onda en ese punto.

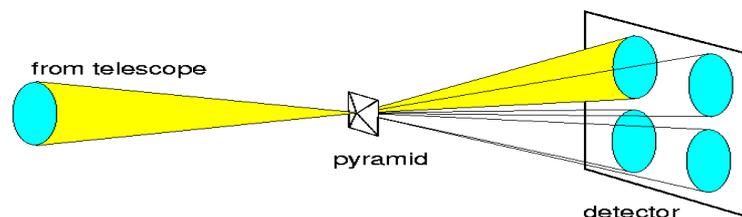


Figura 2.16 Esquema óptico conceptual del sensor de pirámide. (Crédito: A. Tokovinin)

Directamente puede observarse que uno de los inconvenientes aparece enseguida en cuanto la pendiente local del frente de onda es elevada, en cuyo caso la luz de alguna de las facetas de la pirámide sencillamente desaparece, y la relación de iluminaciones que permite la obtención de las inclinaciones satura. Este problema puede soslayarse provocando artificialmente una modulación que haga que la imagen rote sobre la pirámide, en sincronía con el tiempo de integración del detector, lo que sin duda presente problemas prácticos significativos.

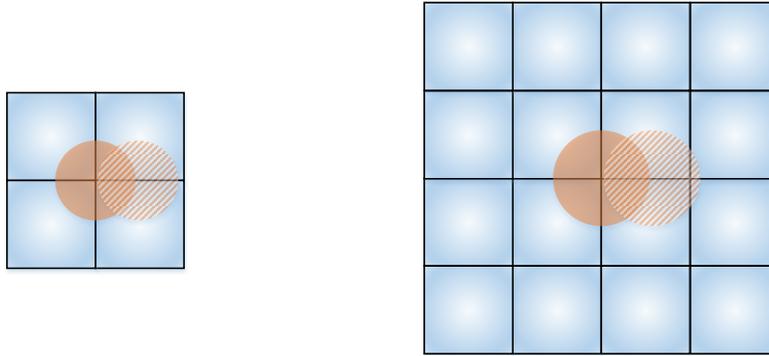


Figura 2.17 Comparación de los efectos de saturación en el sensor de pirámide (Izq.) y plenóptico (der.), donde puede apreciarse la forma natural en la que desaparece en este último.

En la Figura 2.17 se muestra esquemáticamente la situación de saturación del sensor de pirámide, en la que un desplazamiento horizontal excesivo (spot rayado) aleja el spot del vértice y, por lo tanto, se pierde la capacidad de determinar el desplazamiento en ese eje. De una manera natural, la cámara plenóptica resuelve ese problema, para el caso de spots mayores que una microlente, sencillamente incluyendo éste en la microlente adyacente.

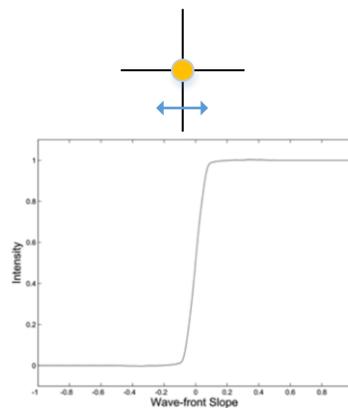


Figura 2.18 Determinación gráfica de la zona lineal de respuesta del sensor de pirámide sin oscilación, la cual queda esencialmente limitada al ancho del spot.

Básicamente la linealidad queda, entonces, limitada al ancho del spot, ya que si la desviación es mayor, incluso localmente, alguna de las facetas se queda sin luz en ese punto de la imagen de la apertura (Figura 2.18).

Cuando se usa la cámara plenóptica como sensor de frente de onda, este problema desaparece de forma natural en la medida en la que existe una multiplicidad de imágenes de la apertura adyacentes a la central, de modo que en el caso de que la pendiente local sea lo bastante grande como para que una de las imágenes se quede sin luz, aparecerá seguidamente en la imagen de la apertura adyacente por el lado opuesto, siempre que se cumpla que el tamaño del spot de difracción, o el spot de seeing esperado, sea mayor que el tamaño de una microlente en el plano focal.

No obstante, tal y como razonan impecablemente Clare y Lane (Clare & Lane, 2005), el caso en

el que el spot de difracción sea lo bastante grande como para que ocupe el tamaño de una microlente, aunque lograría linealidad debido a que nunca estaría el haz contenido en una única microlente, no permitiría en absoluto obtener información de la fase en la apertura, ya que quedaría completamente emborronada como resultado del paso por una microlente tan pequeña. No tendría utilidad pues para los efectos de medida de fase la generación de un spot de difracción del tamaño de la microlente. En cambio, sí que sería útil cuando el spot resultado del seeing atmosférico sea mayor que el tamaño de una microlente, o cuando el objeto de referencia no sea puntal sino extenso, tal y como serían los casos de granulación solar o de estrella láser elongada, justo en los cuales es donde el uso del sensor plenóptico resulta más recomendable y eficaz.

Aunque sobre el papel la existencia de la ventaja mencionada anteriormente es indudable, es honesto señalar igualmente que la colocación de la estrella en el intersticio existente entre cuatro microlentes es un caso especialmente inadecuado desde el punto de vista práctico ya que, a consecuencia de los métodos de fabricación habituales, es donde peor calidad óptica presentan, pudiendo provocar aberraciones e irregularidades comparables o incluso mayores que las que se pretende medir. Por otro lado, la distribución de la luz de la estrella entre más de cuatro imágenes de la pupila, en general tenderá a proporcionar una menor relación señal/ruido en los detectores, limitando así la magnitud límite utilizable.

## **2.6.2 Comparación con el sensor Shack-Hartmann: Concepto de Flexibilidad**

El concepto de flexibilidad en el muestreo del frente de onda está directamente relacionado con el funcionamiento en la práctica en distintas condiciones de turbulencia, en las que puede estar indicado el realizar un muestreo más o menos denso del frente onda intentando optimizar la relación señal a ruido de la medida realizada.

El sensor de frente de onda de Shack-Hartmann, que en realidad mide gradientes al igual que la Cámara Plenóptica, es extremadamente simple conceptualmente y a ello debe su popularidad. Está basado en una técnica bien conocida desde principios de siglo XX para evaluar la calidad de espejos y lentes, que consiste en colocar una máscara opaca con un conjunto de agujeros equiespaciados detrás del objeto a caracterizar. Cuando la lente o espejo es convergente, los agujeros de la máscara producirán imágenes independientes en el plano focal, y la posición de cada una de estas imágenes informará de la pendiente del frente de onda en cada uno de los agujeros. Este test conocido como de Hartmann (Hartmann, 1904), fue mejorado por Shack (Shack & Platt, 1971) sustituyendo los agujeros, que provocaban una sensible pérdida de iluminación inaceptable en Astrofísica, por un conjunto de microlentes.

El sensor de Shack-Hartmann consiste, pues, en colocar un array de microlentes positivas en la pupila del haz óptico cuyo frente de onda se desea conocer (Figura 2.19). Cada una de las microlentes producirá un foco independiente, que estará en el eje óptico de cada microlente para un frente de onda plano. Para otras inclinaciones, la posición en el detector informará directamente de la pendiente del frente de onda promedio en la zona que abarca la microlente.

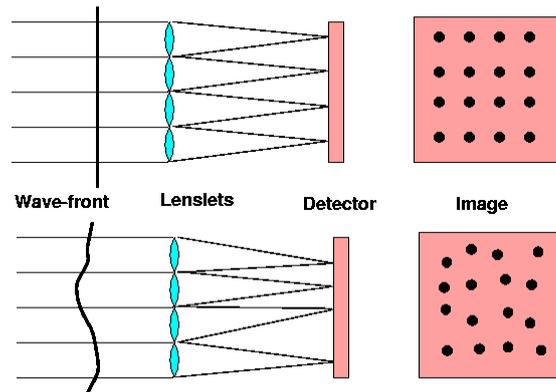


Figura 2.19 Esquema de funcionamiento del sensor de frente de onda de Shack-Hartmann.  
(Crédito A. Tokovinin)

Para ilustrar el concepto de flexibilidad de la Cámara Plenóptica, la Figura 2.20 muestra un ejemplo de imagen de la apertura correspondiente al telescopio OGS, mencionado previamente, en la que se han superpuesto un conjunto de hipotéticos píxeles de un detector. Tras identificar cuáles de ellos reciben suficiente luz como para proveer una relación señal a ruido adecuada, se acaba obteniendo un total de 203 muestras del frente de onda, que en principio podrían permitir el ajuste de un número similar de modos de Zernike, Karhunen-Loeve, o cualesquiera se desee utilizar como base de la reconstrucción del frente de onda.

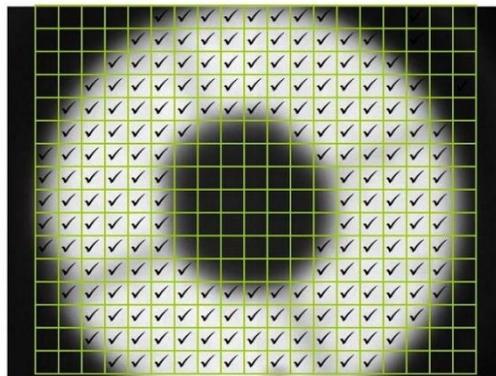


Figura 2.20 Apertura del telescopio OGS en la que han sido señalados, para una subdivisión en píxeles determinada, aquéllos que previsiblemente alcanzan una relación señal/ruido mínima para permitir su utilización.

Sin embargo, podría darse el caso de que el nivel de la turbulencia existente, en combinación con la potencia de luz recibida, y también teniendo en cuenta la naturaleza del instrumento para el que el sensor de frente de onda está siendo utilizado, aconseje realizar un muestreo menor del frente de onda, lo cual conducirá a -por ejemplo- combinar la luz de los píxeles de dos en dos dando lugar únicamente a 55 muestras del frente de onda, pero cada una de las cuales con cuatro veces la potencia recibida. Naturalmente, como se indica en la Figura 2.21, ello proporcionará una medida del frente de onda con menor número de frecuencias espaciales, pero permitirá ampliar el funcionamiento del sistema hacia estrellas más débiles en noches de mejor comportamiento de la turbulencia atmosférica.

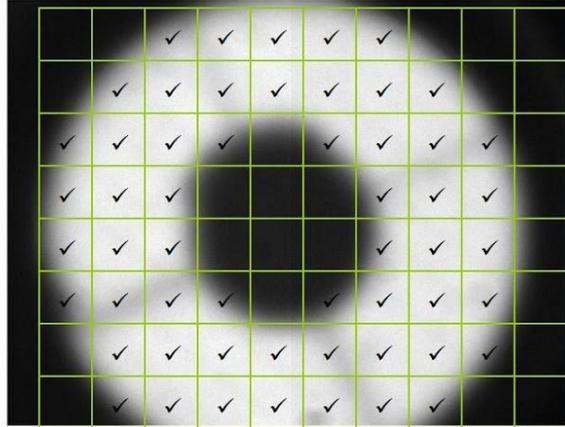


Figura 2.21 Efecto de la disminución del muestreo del frente de onda, que conduce a un número menor de muestras pero con mayor relación señal/ruido.

Incluso en ocasiones en las que interese conocer únicamente los modos más bajos de la turbulencia, por ejemplo, porque se combinen técnicas de corrección diversas (Mackay, Craig et al, 2012) y únicamente se espere del espejo deformable la corrección de los modos más bajos, una combinación de los píxeles de tres en tres conduciría a un total de 28 muestras, pero cada una de ellas con 9 veces la radiación original (Figura 2.22):

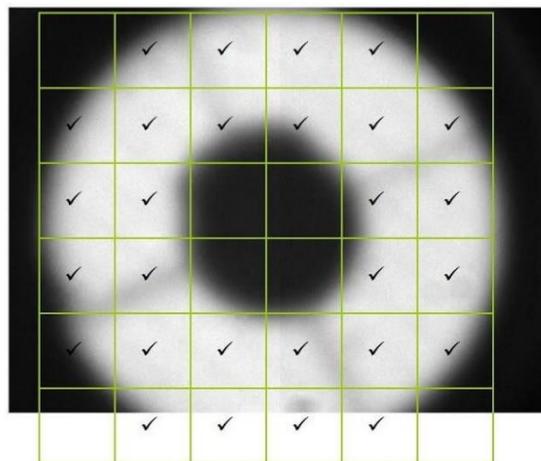


Figura 2.22 Muestreo disminuido en un factor 9, resultando únicamente 28 muestras pero con 9 veces la radiación original en cada muestra.

Comentar únicamente que la combinación de las señales de los píxeles originales para producir las muestras del frente de onda puede realizarse numéricamente tras la lectura y digitalización del detector, pero sería óptimo poderla realizar mediante “binning” de la carga recibida en cada uno de los píxeles originales, al objeto de que el ruido de lectura del detector se vea mitigado, a menos que se utilicen detectores de amplificación electrónica en modo de alta ganancia, en donde el modo contador de fotones puede aconsejar realizar la acumulación tras el conteo de los mismos en lugar de combinar la carga generada.

Esta recombinación de píxeles a posteriori, que podría realizarse incluso en paralelo con la misma imagen plenóptica para múltiples muestreos, es completamente inviable en el sensor de frente de onda de S-H, salvo que se proceda al cambio del array de microlentes (García-Lorenzo, B. et al, 2008). En cambio, sí que podría abordarse en el sensor de pirámide.

### 2.6.3 Sencillez conceptual del sistema óptico

La medida de fase de frente de onda con la Cámara Plenóptica puede argumentarse como la que requiere el sistema óptico más simple de los posibles, ganando en simplicidad a los sensores de frente de onda convencionales. Así por ejemplo, el sensor de Shack-Hartmann requiere habitualmente la utilización de al menos una lente que obtenga una imagen de la apertura, para colocar ahí el array de microlentes. El sensor de Pirámide necesita de la propia pirámide y una lente extra para obtener la imagen de la apertura sobre el detector. El sensor plenóptico únicamente necesita la ubicación del array de microlentes en el plano focal del telescopio, con tal de que se respete la relación de focales óptima entre el telescopio y las microlentes, para que se pueda obtener con ella una medida de la fase de frente de onda tal y como se demuestra en la presente Tesis.

Quedaría entonces únicamente en desventaja respecto a la simplicidad del sistema óptico respecto a los sensores de curvatura, que trabajan con parejas de imágenes tomadas en al menos un lugar fuera de foco, lo cual introduce inevitablemente la problemática práctica de división del haz que permita obtener simultáneamente ambas imágenes, lo cual no está exento de dificultades.

Respecto a la simplicidad para el caso de objetos extensos, puede constatarse que de una forma natural la cámara plenóptica utiliza la totalidad del campo disponible para realizar la medida de frente de onda, sin que haya que instalar limitadores específicos de éste para evitar que -en el caso de un objeto extenso- los campos procedentes de una y otra microlente se vean acumulados en el detector.

Ya se ha analizado la relación de la Cámara Plenóptica con los sensores tradicionales de S-H y Pirámide. Podríamos igualmente elaborar la relación con los sensores de curvatura simplemente teniendo en cuenta que éstos utilizan pares de imágenes obtenidas antes y después de foco (Roddier, F. et al, 1988), o variaciones de esta configuración, y que estas imágenes pueden también obtenerse a partir de la función plenóptica aplicando las propiedades estudiadas. Demostrar la viabilidad de usar los algoritmos de reconstrucción del frente de onda a partir del sensor de curvatura aplicados a la imagen capturada por la cámara plenóptica queda fuera de los objetivos de la presente Tesis, pero puede intuirse cómo sería el proceso sencillamente partiendo de las imágenes reconstruidas antes y después del foco, las cuales se obtienen mediante la acumulación oblicua de las muestras con arreglo a la pendiente que corresponda al plano conjugado que se desee.

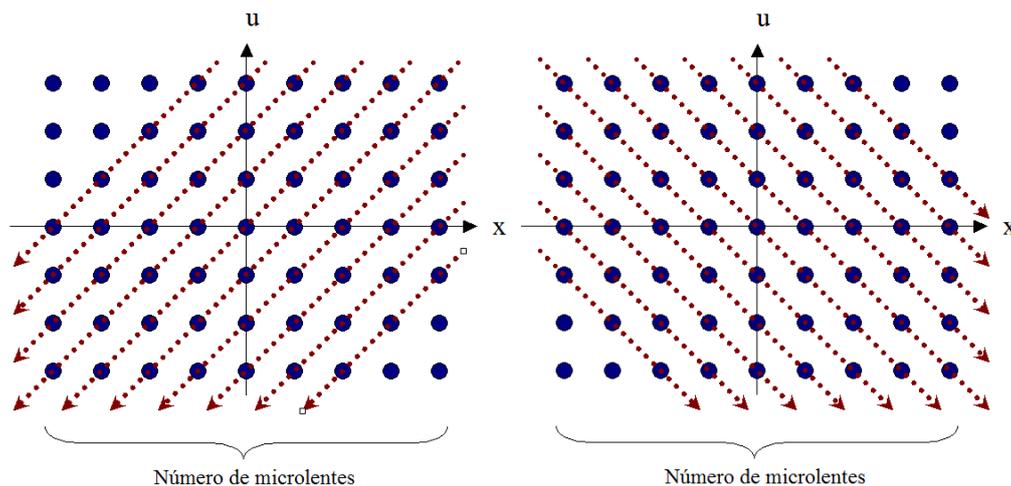


Figura 2.23 Esquema explicativo de cómo serían las acumulaciones necesarias para sintetizar las imágenes correspondientes a ambos lados del foco, punto de partida de sensado de frente de onda de curvatura.

La Figura 2.23 muestra cómo serían las acumulaciones de las muestras que conducirían a las imágenes anterior y posterior al foco, sobre las que se aplicarían los algoritmos. Cabía esperar la existencia de esta posibilidad en la medida en la que la cámara plenóptica es capaz de captar todas las características de la luz que entra en un sistema, con la limitación del muestreo que se utilice. Sin embargo, es cuando menos de dudosa justificación práctica el proceder a la acumulación de muestras para obtener unas imágenes sobre las que aplicar los algoritmos, en lugar de analizar independientemente las muestras sin haber procedido a ninguna acumulación, lo cual necesariamente producirá emborronamiento y pérdida de información espacial, como se hace en el análisis propuesto en la presente Tesis para la recuperación del frente de onda.

Las imágenes correspondientes a planos anterior y posterior al foco se obtendrían utilizando la técnica anteriormente descrita para la realización del “Focal Stack”, mediante la selección adecuada de píxeles de la imagen plenóptica combinada con la interpolación en los casos en los que no hay información correspondiente al punto exacto deseado. Desafortunadamente, en el caso de que se trate de un objeto puntual, es de esperar que la imagen plenóptica tenga iluminadas un número reducido de microlentes, con lo que sería muy difícil construir imágenes razonablemente alejadas del foco. Una vez más, habría que reservar la utilización del sensor plenóptico para el caso de objetos extensos, en los que todas las microlentes estarían iluminadas y no se encontraría este inconveniente.

En la línea de utilizar el sensor plenóptico combinado con sensores de curvatura, merece especial mención el sensor “Geoplano” propuesto por nuestro grupo de investigación (Trujillo-Sevilla, J.M. et al, 2014), en el que un sensor geométrico convencional (van Dam, 2002) se complementa con un sensor plenóptico al objeto, por ejemplo, de poder distinguir las imágenes desenfocadas de apertura de una constelación de estrellas guía láser.

La Figura 2.24 muestra a la izquierda la configuración óptica del sensor Geoplano, en la que las imágenes desenfocadas de la pupila se sustituyen por imágenes plenópticas, adquiridas –no obstante- en las mismas posiciones simétricas respecto a la imagen enfocada de la apertura.

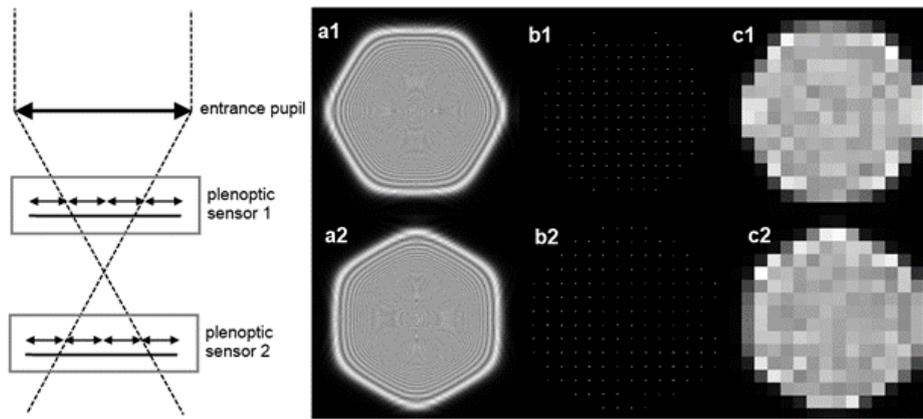


Figura 2.24 Diagrama óptico del sensor Geoplano (izq.) con dos sensores plenópticos en posiciones simétricas fuera de foco. A la derecha, a1 y a2 son las imágenes que aparecerían en un sensor geométrico convencional; b1 y b2 son las que obtienen los sensores plenópticos y c1, c2 son las imágenes recompuestas desde el punto de vista central.

Entre las ventajas que ofrece este sensor cabe destacar la posibilidad de analizar conjuntamente, con una sola imagen, la información proveniente de una constelación de estrellas láser que de otra manera se verían confundidas en la imagen de la apertura, como muestra en la Figura 2.25.

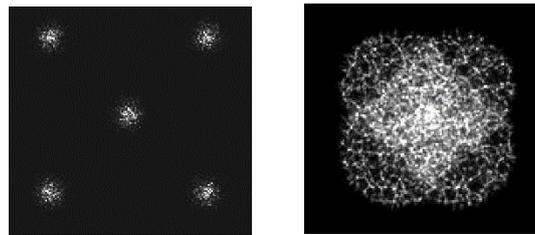


Figura 2.25 (Izq.) Constelación simulada de cinco estrellas con el efecto de la turbulencia atmosférica. A la derecha una de las imágenes desenfocadas de la pupila, en la que se superpone la información de las cinco estrellas.

La introducción del sensor plenóptico en las imágenes de la apertura permite virtualmente separar la información proveniente de los diversos puntos de vista, y en este caso, permitiría examinar el frente de onda en cada una de las direcciones correspondientes a las cinco estrellas guía. La Figura 2.26 muestra una simulación de cómo sería una de las imágenes plenópticas y el resultado de identificar la imagen correspondiente a una de las microlentes, en la que se distinguen las cinco estrellas separadamente:

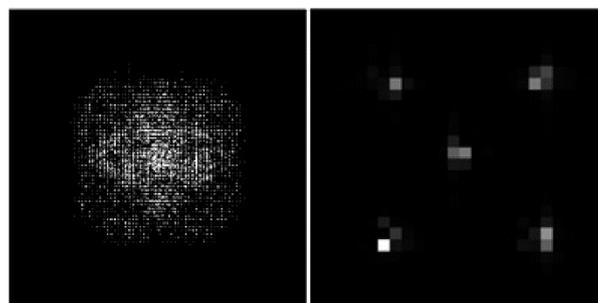


Figura 2.26 A la izquierda, imagen simulada del sensor propuesto. A la derecha el resultado de seleccionar una microlente determinada.

La formación de los pares de imágenes de pupila desenfocadas sería realizada a posteriori

mediante un método “conjugado” al expuesto para la obtención de la fase en pupila de la cámara plenóptica, ya que la recomposición a posteriori conduce a imágenes de pupila en lugar a imágenes del objeto, pero permitirá la aplicación de algoritmos de recuperación tomográfica como el de Tallon y Foy (Tallon, M. & Foy, R., 1990), según se ha comprobado en nuestro grupo.

## 2.7 Limitaciones de la cámara plenóptica como sensor de frente de onda

Naturalmente no todo iban a ser ventajas. Demostraremos seguidamente que vamos a pagar un precio por las flexibilidades y las características que hemos comentado, y que aparecen en cuanto pasemos a considerar que la longitud de onda de la luz involucrada no es infinitamente pequeña, y que por lo tanto el paradigma de trazado de rayos, que nos ha permitido hasta ahora realizar un análisis extremadamente intuitivo de la cámara plenóptica y de su aplicación al sensado de frente de onda, debe sustituirse por óptica ondulatoria para que represente de una forma más cercana a la realidad las prestaciones de la cámara plenóptica. Usaremos óptica de Fourier para mostrar que el efecto de utilizar una cámara plenóptica en lugar de un sensor de S-H, por ejemplo, consiste en un emborronamiento de las medidas de fase, el cual, no obstante, podemos medir y caracterizar e incluso utilizar como verificación de que estamos haciendo medidas correctas y obteniendo resultados coherentes, como se demostrará en el capítulo 5.

La naturaleza del emborronamiento causado a la medida de la fase en pupila se deriva directamente de la limitación en frecuencias espaciales inherente a la obtención de las imágenes de pupila a través de microlentes, las cuales van a presentar en general un diámetro físicamente pequeño. Si formulamos el campo en la pupila como un fásor dotado de módulo -aproximadamente igual a la unidad- y una fase que es el objeto de nuestra medida, como ya se introdujo anteriormente,

$$U(P) = A(P)\exp[-j\phi(P)]$$

podremos expresar la imagen de la pupila creada por la microlente como resultado de la convolución del campo en pupila con la PSF (point spread function) de la microlentilla (Goodmann, 1996),

$$I = U * h$$

Para el caso frecuente en el que las microlentes sean cuadradas, su PSF, que acabará siendo el kernel de la convolución que genera el emborronamiento, quedará:

$$h(x, y) \propto \left[ \text{sinc} \left( \frac{wx}{\lambda f} \right) \right]^2 \cdot \left[ \text{sinc} \left( \frac{wy}{\lambda f} \right) \right]^2$$

siendo  $(x, y)$  las coordenadas transversales del plano,  $\lambda$  la longitud de onda,  $w$  el tamaño de la microlente y  $f$  la distancia focal de la misma.

El kernel mencionado tiene un ancho a altura mitad (FWHM) de valor

$$FWHM = 0.886 \frac{\lambda f}{w}$$

y teniendo en cuenta la relación focal:

$$FWHM = 0.886 \cdot \lambda \cdot F\#$$

es decir, el emborronamiento es proporcional a la longitud de onda y a la relación focal del sistema. En resumen, la medida de fase en pupila que proporciona la cámara plenóptica sufre un cierto emborronamiento dependiente de la relación focal del sistema de imagen que se esté utilizando, cosa que no sucede en el sensor Shack-Hartmann en el que las medidas de fase son completamente independientes unas de otras. No obstante, eligiendo relaciones focales pequeñas este problema quedará obviado.

### 2.7.1 Límite de resolución en pupila

Analizaremos en el presente apartado el comportamiento esperado de la cámara plenóptica de cara a su utilización como sensor de frente de onda en las observaciones solares, en las que la respuesta del mismo a la granulación es especialmente relevante.

Es sobradamente conocido que hace falta disponer de una apertura en el rango de 70-100 mm de diámetro para poder obtener una imagen razonablemente buena de la granulación solar, de forma que pueda ésta ser utilizada para la determinación, mediante correlaciones, de los gradientes del frente de onda. Cuando se usa un sensor Shack-Hartmann esta necesidad impone directamente un límite en la resolución máxima alcanzable en la medida de frente de onda en pupila, debido a que no más de

$$N_D = \frac{D}{D_{SH}}$$

subpupilas podrán ubicarse a lo largo del diámetro de la apertura, siendo  $D$  el diámetro del telescopio y  $D_{SH}$  la mínima apertura aceptable para tener granulación en la imagen del sensor Shack-Hartmann.

La información de granulación solar está ubicada en las frecuencias espaciales altas, con un contraste muy bajo desafortunadamente. Se necesita pues un sistema óptico con suficiente transmisión a esas frecuencias espaciales, cuestión que representaremos mediante la frecuencia de corte de la función de transferencia óptica de una apertura circular (Goodmann, 1996),

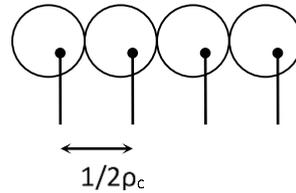
$$\rho_c = \frac{D}{\lambda \cdot f}$$

...donde  $D$  es el diámetro de la apertura,  $f$  la distancia focal y  $\lambda$  la longitud de onda de trabajo. En nuestro caso particular, dicha frecuencia de corte vendrá determinada por el la apertura correspondiente el sensor S-H y la focal del telescopio utilizado

$$\rho_c = \frac{D_{SH}}{\lambda \cdot f_T}$$

Tal y como se ha descrito anteriormente, la imagen sintetizada correspondiente a cada punto de la apertura se obtiene mediante la extracción de un píxel de la cada microlente. Para poder alcanzar un nivel razonable de contraste de la granulación solar con la que realizar la correlación,

esas frecuencias espaciales deben estar muestreadas suficientemente, como ocurriría en el sensor de S-H. Usando el teorema de Shannon, una representación correcta de esas frecuencias espaciales requerirá el muestreo al doble de su valor ( $2\rho_c$ ) y este hecho va a imponer un límite en la separación de las microlentes: éstas no deberán estar separadas en el plano focal más allá de  $1/2\rho_c$  metros (o micras en la práctica), y por lo tanto no pueden ser mayores que esta dimensión, como se indica en la Figura 2.27:



*Figura 2.27 Esquema indicativo de la separación máxima a la que pueden ubicarse las muestras de la imagen solar para que la función de transferencia óptica mantenga respuesta a las frecuencias espaciales a las que se encuentra la granulación.*

Sobre este esquema, puede deducirse fácilmente que el tamaño máximo de la microlente está relacionado con la mínima pupila de un sensor S-H por

$$D_{\mu L} = \frac{1}{2\rho_c} = \frac{\lambda f_T}{2D_{SH}}$$

Esta relación indica que una longitud focal grande en el telescopio permitirá utilizar microlentes más grandes y por lo tanto obtener mejor imagen de la pupila, ya que ésta se ve afectada de un cierto emborronamiento como ya se ha comentado anteriormente, y que se cuantifica a continuación.

Si consideramos ahora el resultado de la propagación de la luz a través de las microlentes, utilizando de nuevo el resultado de la transmisión a través de una apertura circular, la máxima frecuencia espacial disponible en la imagen de la pupila será

$$F_c = \frac{D_{\mu L}}{\lambda f_{\mu L}}$$

Y por lo tanto la frecuencia espacial de muestreo adecuada para acoger toda la información disponible será el doble, es decir, un periodo de

$$\delta_{pupil} = \frac{\lambda f_{\mu L}}{2D_{\mu L}}$$

Si en la expresión anterior sustituimos el diámetro calculado anteriormente podremos entonces conocer cuál puede ser el muestreo de pupila máximo, es decir, la separación mínima entre las muestras de pupila en las que la información del frente de onda puede medirse independientemente.

$$\delta_{pupil} = \frac{\lambda f_{\mu L}}{2D_{\mu L}} = \frac{\lambda f_{\mu L}}{2 \frac{\lambda f_T}{2D_{sh}}} = D_{sh} \frac{f_{\mu L}}{f_T}$$

Este muestreo de pupila máximo resulta entonces igual a producto del muestreo original del sensor S-H multiplicado por la relación de focales. Si además tenemos en cuenta la condición habitual de las cámaras plenópticas, según la cual los números-F de telescopio y microlentes deben ser iguales,

$$\frac{f_T}{D_T} = \frac{f_{\mu L}}{D_{\mu L}}$$

...se obtiene directamente que la separación entre microlentes será

$$\delta_{pupil} = D_{\mu L} \frac{D_{SH}}{D_T}$$

Que es exactamente la misma que proporciona el sensor S-H, ya que el cociente  $D_{SH}/D_T$  es la inversa del número de subpupilas existentes en el diámetro del telescopio, y aparece multiplicando al diámetro de la microlente, que es prácticamente igual al tamaño de la imagen de la pupila en el detector de la cámara plenóptica.

Por lo tanto, en lo que a capacidad de resolución de la granulación solar, las prestaciones de la cámara plenóptica como sensor de frente de onda son esencialmente iguales a las del sensor de S-H.

## 2.8 Tomografía con la cámara plenóptica

La cámara plenóptica como herramienta para la caracterización tomográfica de la turbulencia atmosférica queda fuera de los objetivos de la presente Tesis. No obstante, se presentan a continuación algunas pinceladas conceptuales de las posibilidades que presenta en este terreno, el cual será sin duda objeto de trabajos futuros.

Hasta el momento se ha considerado que la turbulencia afecta por igual a todas las microlentes, lo que equivale a considerar que ésta esté concentrada en la apertura o en las proximidades de la misma, como indica la Figura 2.28:

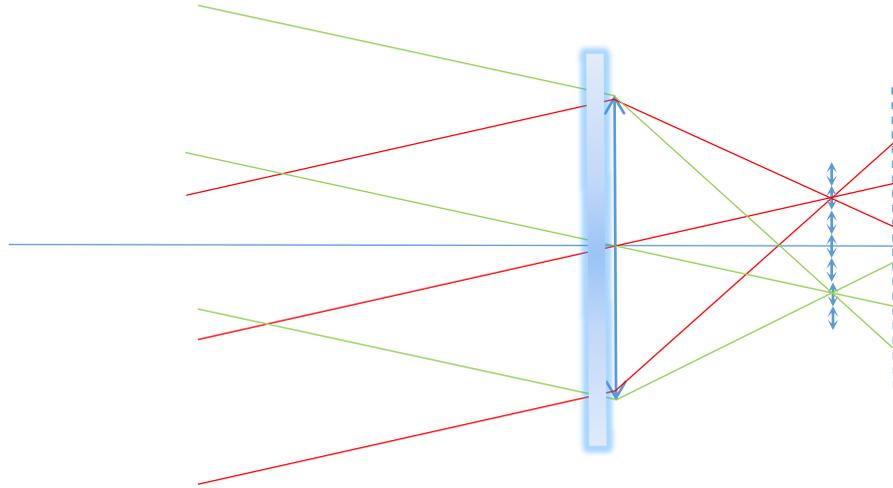


Figura 2.28 Esquema conceptual de la Cámara Plenóptica con turbulencia concentrada en las proximidades de la apertura. Todos los puntos de vista atraviesan la misma turbulencia.

Sin embargo, en el caso en el que la turbulencia no está ubicada en la apertura del sistema, sino a una cierta altitud, los diversos puntos de vista se verán afectados por distintos niveles de turbulencia, como se indica en la Figura 2.29, en la que se han dibujado dos ángulos de llegada procedentes de objetos ubicados en el infinito, y se han indicado las fracciones de turbulencia que afectan a cada uno de ellos:

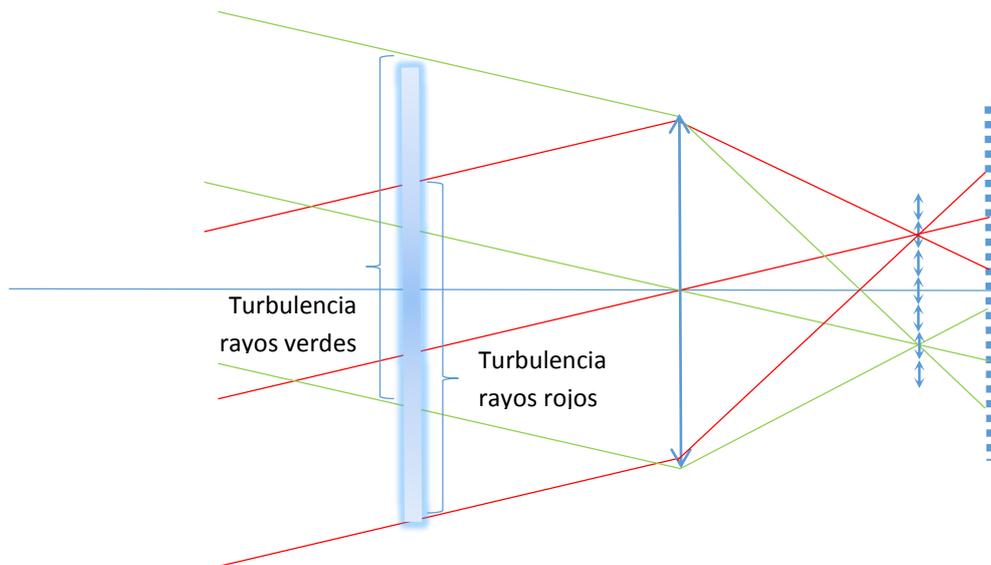
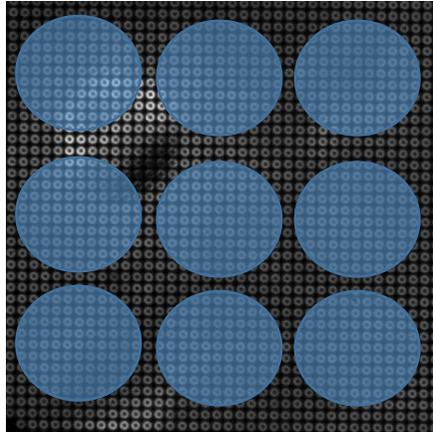


Figura 2.29 Esquema conceptual de la cámara plenóptica con una capa de turbulencia situada a una cierta altitud respecto a la apertura. Puede verse cómo los rayos de los extremos del campo atraviesan turbulencias físicamente diferentes.

La conclusión es que la información volumétrica de la turbulencia está disponible en la imagen plenóptica en forma de diferencias entre las inclinaciones del frente de onda medidas en una zona del campo (dirección, punto de vista) u otra.

La forma más inmediata de extraer esta información consistiría en subdividir el campo sobre el que se calculan las correlaciones, definiendo por ejemplo 3x3 líneas de visión en la forma que se indica en la Figura 2.30. El cálculo del frente de onda sobre cada una de estas fracciones de

campo daría lugar a frentes de onda resultado de la propagación a lo largo de esas direcciones, lo cual equivaldría a todos los efectos a disponer de una constelación de 9 estrellas guía láser, pagando naturalmente el precio de disponer de menor número de píxeles con los cuales calcular las correlaciones.



*Figura 2.30 Definición de un conjunto de 3x3 líneas de visión a lo largo de las cuales realizar la medida del frente de onda, para obtener la información tomográfica.*

También existirían otras posibilidades de subdividir el campo de cara a obtener las líneas sobre las que se calcula el frente de onda resultante, como podrían ser dejar un cierto solapamiento, el cual mejoraría el cálculo de las correlaciones a costa de perder una cierta independencia entre ellas, o incluso utilizar combinaciones cualesquiera de píxeles del campo.

# 3 Capítulo III Calibración de una Cámara Plenóptica

*“For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for Nature cannot be fooled.”*

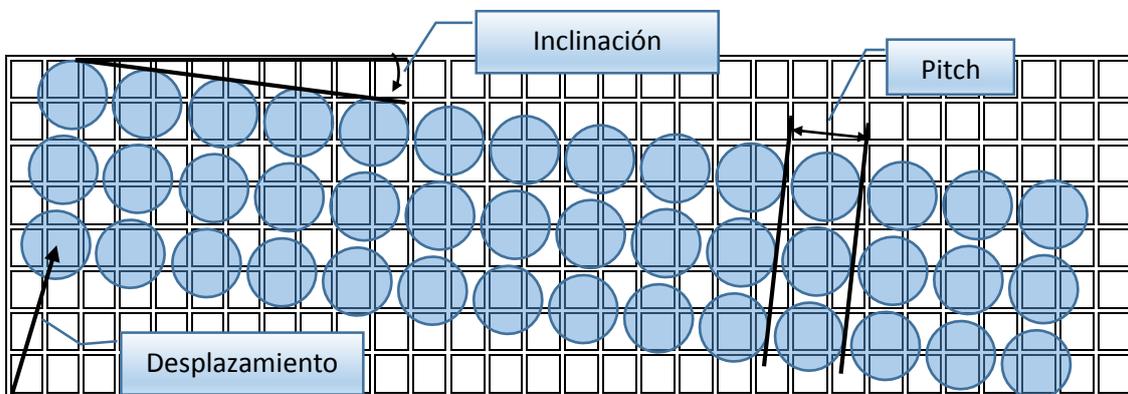
Richard Feynman

Como ya se ha indicado en el capítulo anterior, el proceso de fabricación de una cámara plenóptica requiere el emplazamiento de un conjunto o “array” de microlentes en el foco de un sistema óptico, al objeto de obtener en el detector un elevado número de imágenes de la pupila de entrada, los cuales constituirán los diversos puntos de vista sobre los que operan los algoritmos de reconstrucción presentados en esta Tesis.

Aunque cabría esperar que en un futuro ambos componentes, array y detector, se fabricaran simultáneamente en el mismo proceso, la realidad es que pasará mucho tiempo hasta que el volumen de producto fabricado justifique el coste involucrado, y por lo tanto, tiene sentido contar con que se requerirá el montaje y alineado de ambos componentes, el cual no será perfecto en general, como así se ha encontrado en las cámaras construidas hasta la fecha en el grupo de investigación. Sucede además que en general el módulo o “pitch” (separación entre microlentes o tamaño de las mismas) utilizado, no conduce a unas imágenes de la pupila que sean múltiplos enteros de los píxeles del detector, pues se fabrican de manera independiente. Se ha encontrado, incluso, que existen cámaras comerciales que incluyen una corrección de campo realizada a posteriori sobre la imagen cruda, para permitir un ahorro en la economía relacionada con la calidad y dimensiones de las lentes, la cual acaba produciendo una muy apreciable irregularidad en la distribución de las microlentes sobre el detector.

El proceso de calibración puede entonces entenderse como la obtención de la información de registro que asocia las posiciones de las múltiples imágenes de la pupila, obtenidas por las microlentes, con los píxeles del detector. A este efecto, se ha supuesto que en todos los casos tanto el detector como las microlentes están fabricados por separado y de una forma esencialmente perfecta, quedando cada uno completamente definido por sus dimensiones físicas, es decir, el tamaño (o frecuencia espacial de repetición, habitualmente denominada "pitch") tanto de las microlentes como de los píxeles del detector. La calibración es pues necesaria como resultado del montaje imperfecto de uno respecto al otro en el sistema óptico, y está basada en obtener una medida de los parámetros que se relacionan a continuación, realizada sobre una imagen plenóptica de una escena convenientemente elegida:

- La separación entre imágenes de la pupila, medida en píxeles del detector ("pitch"). Se supondrá que es idéntico tanto para la dirección horizontal como para la vertical, aunque también se podrían admitir microlentes distribuidas hexagonalmente o con cualquier otra estructura. En principio en la presente Tesis supondremos que las microlentes están fabricadas con una distribución cartesiana.
- La inclinación relativa entre las líneas de píxeles del sensor y las de microlentes en el array.
- El desplazamiento lateral que permita referir las coordenadas de las microlentes a las del detector.



*Figura 3.1 Diagrama descriptivo de la naturaleza de los tres parámetros principales involucrados en la calibración de una cámara plenóptica.*

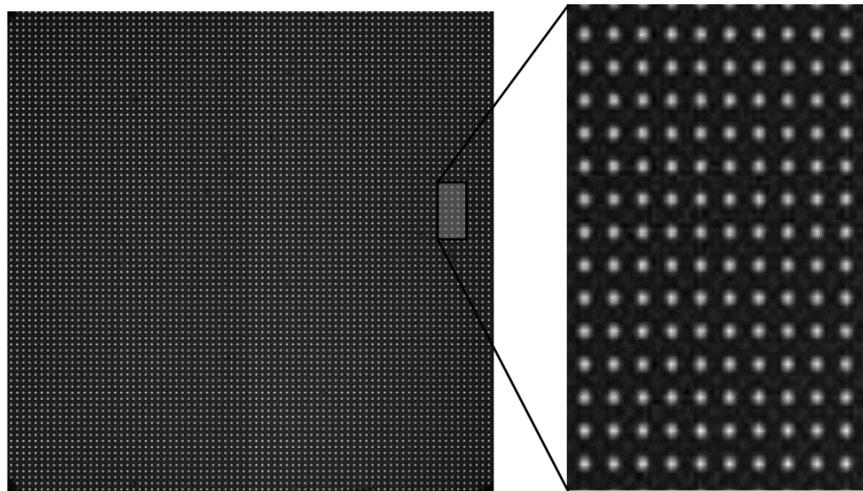
La Figura 3.1 representa la situación relativa de las imágenes de la pupila producidas por las microlentes respecto a los píxeles del detector, e indica el significado de cada uno de los parámetros. Se ha preferido utilizar el concepto de "pitch" en lugar del tamaño de la imagen de la pupila ya que éste depende en general de la apertura del sistema óptico, que se ha hecho variable en este caso, mientras que el pitch depende únicamente de la focal, y ésta se ha mantenido constante para un montaje dado. Se ha indicado el desplazamiento lateral como la información de posición de una cualquiera de las microlentes, ya que con ella y con los otros dos parámetros pueden obtenerse todas las demás posiciones.

La calibración de una cámara plenóptica puede entonces definirse como la obtención de los parámetros que describen el resultado del proceso de montaje, a partir de una imagen adquirida convenientemente, para optimizar la determinación de los mismos. De manera ideal, sería especialmente conveniente que no fuera necesaria ninguna imagen especial para realizar la calibración, sino que ésta pudiera obtenerse a partir de una imagen cualquiera. Se describen seguidamente algunos de los métodos seguidos para obtener los mencionados parámetros en las diversas condiciones.

En el presente capítulo procederemos a considerar no solo la calibración de una cámara plenóptica para su uso en astrofísica, sino que será también aplicable a cualquier otro uso. Naturalmente, cada aplicación acabará teniendo un conjunto de opciones que resultarán adecuadas en mayor o menor medida.

### 3.1 Método de reducción de apertura.

Este método está basado en el procesado de una imagen adquirida con una reducción significativa de la apertura del sistema, accionando manualmente el iris instalado al efecto. En esta situación, sólo los centros de las microlentes estarán iluminados, y bastará con que la inclinación sea inferior a una microlente entre extremos del detector para que pueda definirse una cuadrícula en la que únicamente se encuentre una imagen por recuadro.



*Figura 3.2 Imagen plenóptica en la que se ha procedido a una reducción de la apertura, al objeto de que únicamente estén iluminados los centros de las imágenes de la pupila. A la derecha se muestra la ampliación de la zona indicada.*

Aunque es recomendable que la escena esté uniformemente iluminada y desprovista de diferencias de fase o distancia, se ha comprobado que no es estrictamente necesario.

El primer paso es hacer una estimación del pitch mediante una transformación de Fourier bidimensional de la imagen de partida, cuyo módulo poseerá un pico en la frecuencia espacial inversa del pitch. Para ello se procede a realizar un filtrado Blackmann-Harris en la imagen de partida (Gasior & González, 2004) y un orlado con ceros en un factor cuatro al objeto de obtener la resolución necesaria en la posición del pico. La ubicación del pico se estima entonces ajustando una parábola al conjunto de tres valores formado por el máximo hallado y los valores

adyacentes, tanto vertical como horizontalmente. Para obtener una mejor estimación, se combinan los ajustes resultantes de los cuatro picos del primer armónico, dos verticales y dos horizontales, aunque también se podrían combinar otros armónicos para ulteriores mejoras.

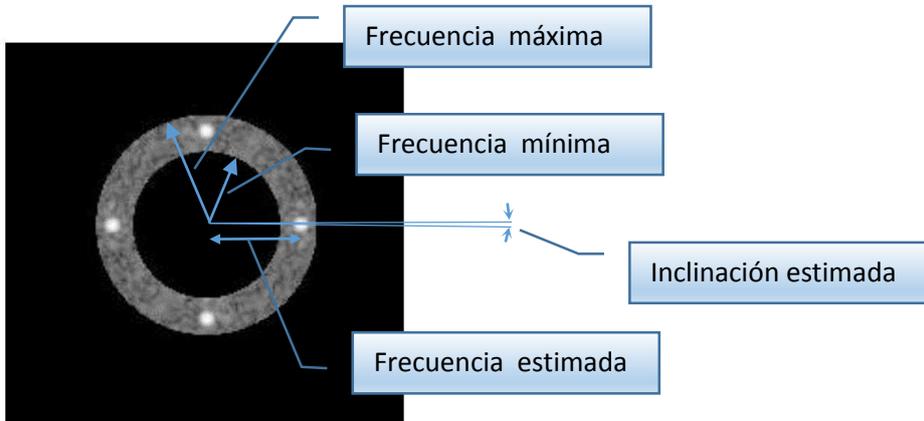
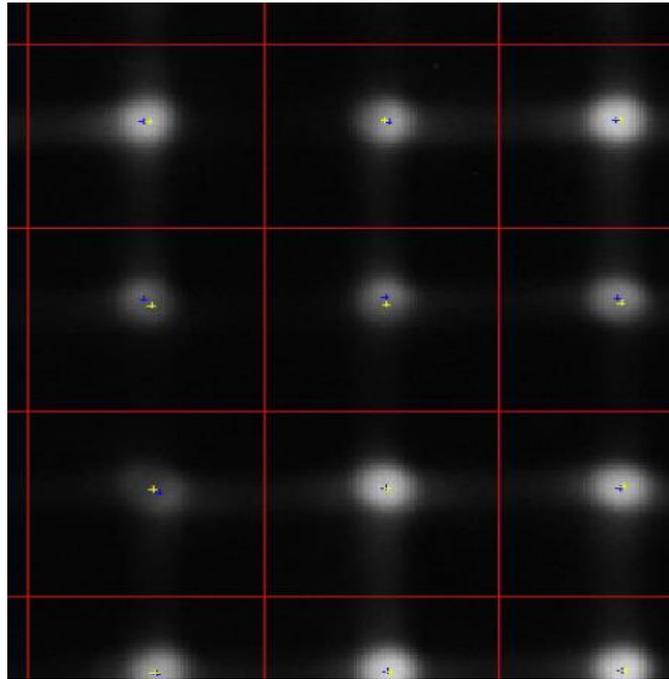


Figura 3.3 Módulo de la Transformada de Fourier de una imagen plenóptica real, limitado entre dos frecuencias espaciales.

La Figura 3.3 representa el módulo de la transformada de Fourier de una imagen plenóptica real, en la que se ha establecido una frecuencia espacial mínima y otra máxima de cara a localizar el pico, mostrando únicamente dicho anillo. También se puede obtener una estimación inicial de la inclinación, de la manera indicada gráficamente en la Figura 3.3, la cual servirá para situar adecuadamente la cuadrícula de la forma que indica la figura siguiente, usando los parámetros estimados y las coordenadas del máximo de la imagen como estimación de la posición del centro de una microlente:



*Figura 3.4 Detalle de una imagen plenóptica con la apertura reducida en la que se ha superpuesto la cuadrícula calculada automáticamente a partir del pico de la Transformada de Fourier, y los centros de gravedad calculados en cada celda de la cuadrícula.*

Se procede entonces a calcular los centros de gravedad de la luz contenida en cada celda de la retícula, convenientemente corregida de umbral, lo que proporciona una primera estimación de todas y cada una de las coordenadas de los centros de las microlentes, que es lo que se persigue en la calibración.

Sin embargo, esta primera aproximación adolece de un gran número de irregularidades debido a la iluminación no uniforme de la escena, la existencia de aberraciones residuales, defectos en las microlentes, etc., por lo que se utiliza únicamente como punto de partida para resolver un problema de optimización en el que un modelo con los cuatro parámetros indicados (pitch, inclinación, desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical) es ajustado de forma que la suma cuadrática de las distancias desde los puntos medidos a los que proporciona el modelo sea mínima. Además, al objeto de verificar la correcta convergencia de la optimización, se modelan separadamente un pitch vertical y un pitch horizontal, de forma que el hecho de que se obtengan valores extremadamente similares para ambos sea prueba de fiabilidad en los resultados obtenidos. En la Figura 3.4 anterior se han indicado con cruces amarillas los centros generados por el modelo, que estarán necesariamente equiespaciados y con una única inclinación, mientras que los azules son los que se obtuvieron inicialmente. Puede observarse en la imagen inferior izquierda el efecto por el que una irregularidad local es soslayada, así como también se contribuye a combatir los efectos negativos de la falta de uniformidad en la escena.

## **3.2 Métodos para imágenes sin reducción de apertura.**

En los casos en los que no se puede obtener una imagen especial con la apertura casi cerrada, cosa que por ejemplo sucede en imágenes plenópticas de telescopio (en donde la apertura tiene forma anular y por lo tanto no puede cerrarse hasta dejar iluminado únicamente el centro de la

microlente), es necesario utilizar métodos más elaborados (y menos precisos) para obtener la calibración. También se pueden usar estos otros métodos para las aplicaciones en que se desee una calibración a partir de una imagen cualquiera.

El proceso de estimación del pitch y la inclinación mediante la utilización de la Transformada de Fourier es el mismo que se describió anteriormente, aunque ahora el pico no está tan pronunciado y por lo tanto las estimaciones poseen en general menor calidad que en el caso de la imagen de apertura reducida, como no podría ser de otra manera.

Para el cálculo del desplazamiento lateral se puede utilizar alguno de los tres métodos que se describen a continuación:

### **3.2.1 Cálculo del desplazamiento lateral mediante correlación.**

Habiendo obtenido en el punto anterior el pitch y la inclinación de una imagen plenóptica cualquiera, únicamente queda por determinar cuáles son los desplazamientos laterales del conjunto de las microlentes respecto al sensor, o lo que es lo mismo, las coordenadas del centro de alguna microlente. Este proceso puede realizarse mediante el siguiente procedimiento:

- i. Se genera una imagen plenóptica simulada en la que la luz de la microlente sigue un perfil sinusoidal tanto en el eje vertical como en el horizontal, cumpliendo los valores de pitch y de inclinación conocidos. Este proceso utiliza la propiedad habitual de que los centros de las microlentes están en general mucho más iluminados que los intersticios, y que la variación de la luz en el interior de la imagen de la microlente es suave.
- ii. Se calcula la correlación cruzada entre la imagen plenóptica de partida y la imagen generada, habiendo suprimido la componente continua (y otras frecuencias bajas si fuera necesario).
- iii. Sobre el máximo de la correlación cruzada, se realiza una interpolación cuadrática con los valores adyacentes y se obtiene directamente el desplazamiento vertical y horizontal con precisión subpíxel.

### **3.2.2 Cálculo del desplazamiento lateral mediante la detección directa de fase.**

El método de cálculo del desplazamiento basado en la correlación tiene el inconveniente de que requiere un apreciable esfuerzo de cálculo, debido al coste computacional de la correlación cruzada. Por este motivo, se ha desarrollado también un método alternativo más simple que se basa en realizar una detección directa de la fase de una línea vertical y otra horizontal, de la forma que se describe a continuación.

El algoritmo utiliza la identidad trigonométrica que indica que el producto de un seno por un coseno puede expresarse como la suma del seno del ángulo diferencia y del seno del ángulo suma:

$$\sin(\alpha)\cos(\beta) = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{2} + \frac{\sin(\alpha + \beta)}{2}$$

Cuando ambas fases sean muy similares, el término en diferencia de ángulos será proporcional a la mitad de dicha diferencia, y el término suma corresponderá a una frecuencia doble que podrá filtrarse o considerarse cero mientras la longitud de la línea corresponda exactamente con un número entero de longitudes de onda. El proceso queda de la siguiente forma:

- i. Se extrae de la parte central de la imagen una línea vertical, habiendo tenido en cuenta la inclinación medida anteriormente.
- ii. Se genera una línea simulada mediante una senoide con fase inicial cero de la frecuencia espacial medida (pitch) y de amplitud normalizada al valor máximo de la línea de la imagen. La longitud de esta línea debe ser un múltiplo del pitch medido.
- iii. Se multiplican punto a punto la línea original y la simulada, y se halla el promedio del resultado, que tenderá a la mitad de la diferencia de fase entre la línea y la señal simulada.
- iv. Se actualiza la fase de la señal simulada añadiendo el valor hallado en "iii.", y se vuelve al punto "ii.", iterando hasta que el valor hallado de diferencia de fase sea inferior a un cierto residuo admisible, o bien un número finito de veces, del orden de 100.

Este procedimiento se repetirá con una línea horizontal para obtener el desplazamiento correspondiente.

### 3.2.3 Cálculo del desplazamiento lateral mediante correlación lineal.

En este método se utiliza la correlación cruzada de una línea vertical y otra simulada, pero únicamente en una dimensión. De esa forma, con un gran ahorro de cálculo, se obtienen resultados aceptables.

Quedaría como sigue:

- i. Se extrae de la parte central de la imagen una línea vertical, habiendo tenido en cuenta la inclinación medida anteriormente.
- ii. Se genera una línea simulada mediante una senoide de la frecuencia espacial medida (pitch) y de amplitud normalizada al valor máximo de la línea de la imagen. La longitud de esta línea debe ser un múltiplo del pitch medido.
- iii. Se calcula la correlación cruzada de ambas señales. El máximo de la misma informará sobre el desplazamiento lateral buscado.

Al igual que el anterior, este procedimiento se repite con una línea horizontal, para obtener el desplazamiento correspondiente.

### 3.2.4 Comparación de métodos.

Se realizó en el seno de nuestro grupo de investigación un análisis comparativo de los diferentes algoritmos mediante simulación (Trujillo-Sevilla, 2011), variando el pitch entre 22 y 25 píxeles y la inclinación entre  $-1.15^\circ$  y  $+1.15^\circ$ . En cada iteración el desplazamiento lateral tanto vertical como horizontal se ha variado entre 1 píxel y el valor del pitch en cada caso.

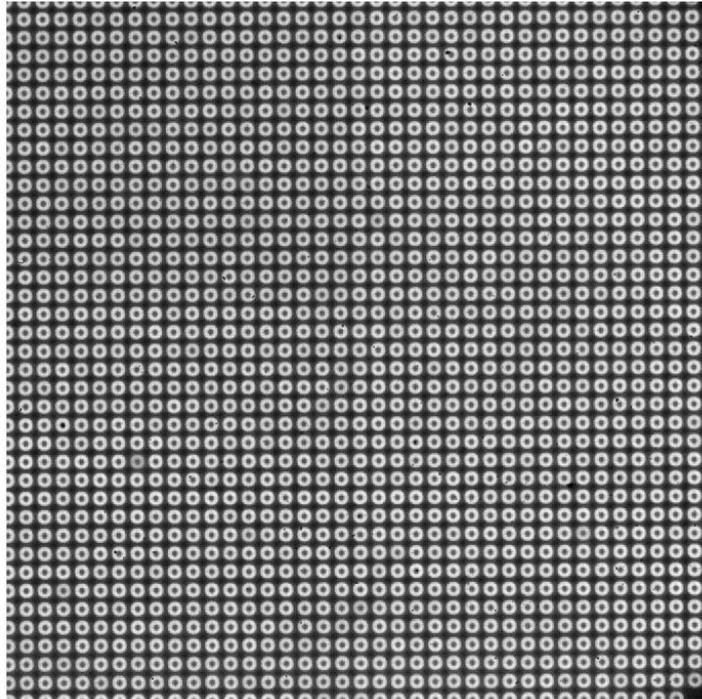
Como se obtienen dos valores por cada desplazamiento (horizontal y vertical), el error al que nos referiremos se ha obtenido como la distancia euclídea de ambas componentes, comparada con el valor correcto introducido en la simulación. Se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 3-1) para el mencionado error medio y su desviación típica, que muestran que el método de correlación bidimensional proporciona los mejores resultados, como cabía esperar, para los diversos tamaños de imagen considerados:

Tamaño de imagen de entrada	Método	Error medio (píxeles)	Desviación típica (píxeles)
512x512	Correlación unidimensional	0.5319	0.2951
	<b>Correlación bidimensional</b>	<b>0.2957</b>	<b>0.1333</b>
	Detección directa	1.0673	0.7187
1024x1024	Correlación unidimensional	0.2133	0.1356
	<b>Correlación bidimensional</b>	<b>0.2254</b>	<b>0.0797</b>
	Detección directa	1.2129	0.8128
2048x2048	Correlación unidimensional	0.1952	0.1438
	<b>Correlación bidimensional</b>	<b>0.1051</b>	<b>0.0498</b>
	Detección directa	1.1374	0.8849

Tabla 3-1 Comparación de la exactitud de los diferentes métodos de obtención del parámetro de calibración "desplazamiento lateral", expresado en error medio de la combinación de los componentes vertical y horizontal respecto del valor correcto introducido en la simulación.

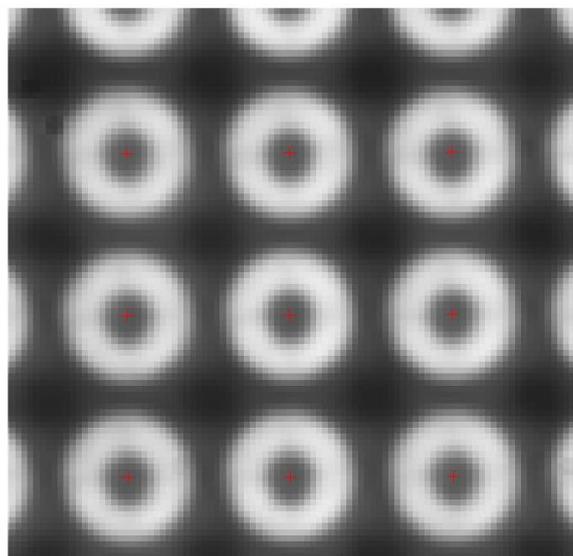
### 3.3 Ejemplo real de utilización.

Como ejemplo real de la eficacia de los métodos desarrollados presentamos seguidamente una imagen de calibración generada a partir de la acumulación de 1000 imágenes consecutivas de 105 ms de tiempo de integración, al objeto de suprimir las variaciones generadas por la turbulencia atmosférica, correspondientes a las observaciones realizadas en el telescopio OGS en abril de 2012:



*Figura 3.5 Imagen de calibración de la cámara plenóptica en el telescopio OGS, adquirida con iluminación de cielo diurno y resultado de acumular 1000 imágenes.*

La Figura 3.6 muestra un conjunto de 3x3 microlentes en donde se atisba con dificultad el soporte del espejo secundario (conocido como “araña”), así como las cruces rojas en donde se han ubicado los centros de las mismas.



*Figura 3.6 Detalle de resultado de la calibración realizada sobre la imagen tomada al efecto.*

### 3.4 Calibración de una cámara plenóptica con corrección de campo incorporada.

Las cámaras de propósito general destinadas al gran público, que presentan elevadas resoluciones a coste bajo, incorporan a menudo una corrección de campo realizada por procesado de la imagen a posteriori, de la que no necesariamente se informa al usuario. Tal es el caso de la cámara SONY QX-100, que posee un sensor CMOS de 13,2 mm x 8,8 mm capaz de entregar imágenes con la elevada resolución de 5472 x 3648 píxeles, la cual ha sido utilizada en el grupo de investigación en combinación con un array de microlentes del fabricante SUSS Micro-optics, de 30  $\mu\text{m}$  de pitch y 90  $\mu\text{m}$  de distancia focal, cuyo montaje se realizó en las instalaciones de la empresa en la ciudad suiza de Neuchâtel.

Como advertencia previa al lector, ha de advertirse que la resolución de las imágenes conseguida es tan alta que es preciso tomar precauciones, de cara a su representación gráfica a las escalas que requiere una hoja de papel o un monitor de ordenador normal. Sucede que con mucha facilidad el re-escalado a una dimensión inferior produce efectos de aliasing cuya supresión destruye también la información de ubicación de las microlentes que es de máximo interés. Así por ejemplo, presentamos seguidamente (Figura 3.7) la imagen de nuestro compañero Juan Trujillo tomada con la cámara inmediatamente después de completar el proceso de montaje,



*Figura 3.7 Imagen plenóptica procesada para lograr su reproducción correcta en las dimensiones en las que se muestra.*

habiendo tomado las precauciones necesarias para que no aparezcan figuras extrañas en la presentación. Sin embargo, si se presenta la imagen con la resolución completa, pero con la reducción necesaria para que quepa en la hoja de papel, tendremos la Figura 3.8:



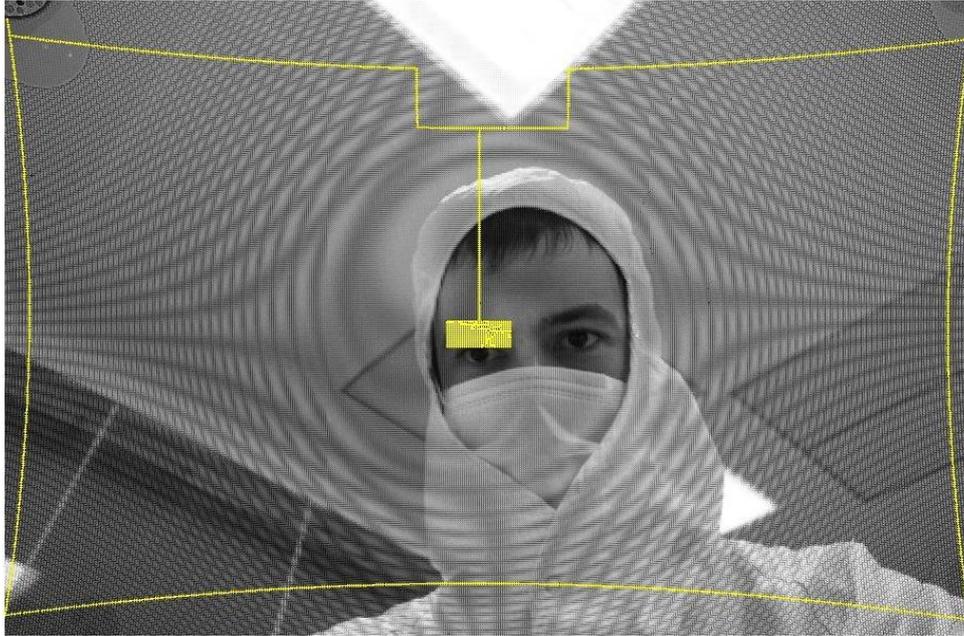
*Figura 3.8 Imagen plenóptica reproducida sin reducción de frecuencias espaciales, mostrando el efecto de "aliasing", y visualizando además el resultado de la corrección de la distorsión de campo.*

...donde por una parte podemos observar la aparición de múltiples patrones de "aliasing" consecuencia de la reducción de resolución, los cuales sencillamente ignoraremos a partir de ahora una vez explicado su origen, y por otra vemos la magnitud de la corrección de campo realizada, la cual ponemos de manifiesto mediante la identificación manual de un rectángulo de microlentes en color amarillo, salvo por la pestaña de la parte superior que se construyó para obviar la zona en la que la imagen presentaba una saturación total y no permitía identificar las posiciones de las microlentes.

Esta corrección es altamente dependiente de la configuración de la cámara en lo que a focal se refiere, y afecta sobremanera a la ubicación relativa de las microlentes, las cuales, naturalmente, al colocarse en el plano focal no están afectadas por la deformación de campo y no necesitarían corrección.

Se ha supuesto que el modelo de corrección que realiza la cámara es únicamente de tipo radial, habiéndose modelado mediante un polinomio de hasta quinto grado con centro a determinar por la propia optimización. También se consideraron parámetros libres, al igual que se hiciera en el caso anteriormente descrito de cámaras sin corrección de campo, una cierta inclinación de las microlentes con respecto a los píxeles, un desplazamiento lateral en ejes cartesianos y, para confirmar la credibilidad del proceso de minimización, un pitch vertical diferente del horizontal, cuya esperada coincidencia nos servirá también de comprobación.

Al objeto de facilitar el trabajo de la minimización en cuanto a velocidad y precisión de la convergencia, se procuró elegir un número de microlentes ubicadas a distancias cortas para compensar el elevado número de microlentes a distancias grandes que constituyen el rectángulo de la periferia, habiéndose entonces utilizado el siguiente conjunto de 1813 microlentes (Figura 3.9):



*Figura 3.9 Imagen plenóptica en la que se han señalado manualmente en amarillo, un total de 1813 microlentes para calibración, cuya posición nominal es, por lo tanto, conocida.*

El problema de optimización planteado consiste en minimizar la suma de las distancias al cuadrado entre las coordenadas de las microlentes obtenidas manualmente y las obtenidas mediante un modelo que calcula dichas posiciones a partir de sus coordenadas cartesianas y los siguientes parámetros:

- Centro de la corrección radial
- Pitch vertical
- Pitch horizontal
- Inclinación cualquiera
- Desplazamiento lateral vertical y horizontal
- Polinomio de grado hasta 5 para expresar la corrección.

Se utilizó la función de búsqueda “ciega” sin información de gradiente, “fminsearch” en la “toolbox” de optimización de MATLAB, ya que no se dispone de información de éste en general y la estimación del mismo conducía a situaciones de no convergencia. Se incorporó un mecanismo de búsqueda dotado de límites superior e inferior de forma que el tiempo de cálculo se mantuviera en cantidades razonables, pero sin llegar en ningún momento a “dirigir” la minimización mediante conocimientos disponibles a priori.

Los resultados para los diferentes grados de polinomio utilizado, respecto al error promedio obtenido como diferencia promedio entre los valores medidos manualmente y los obtenidos por el modelo, fueron:

Grado	Error promedio (distancia en píxeles)
1	52.454
2	10.913
3	1.6349
4	0.7214
5	0.7176

Tabla 3-2 Error promedio obtenido tras la optimización, en función de grado del polinomio radial de corrección utilizado.

...de donde se deduce que sería suficiente utilizar un polinomio de grado cuatro, ya que el incluir un quinto grado no produce efecto significativo en la optimización. No obstante, en muchas de las calibraciones que siguen se han utilizado los cinco grados del polinomio para maximizar la precisión obtenida.

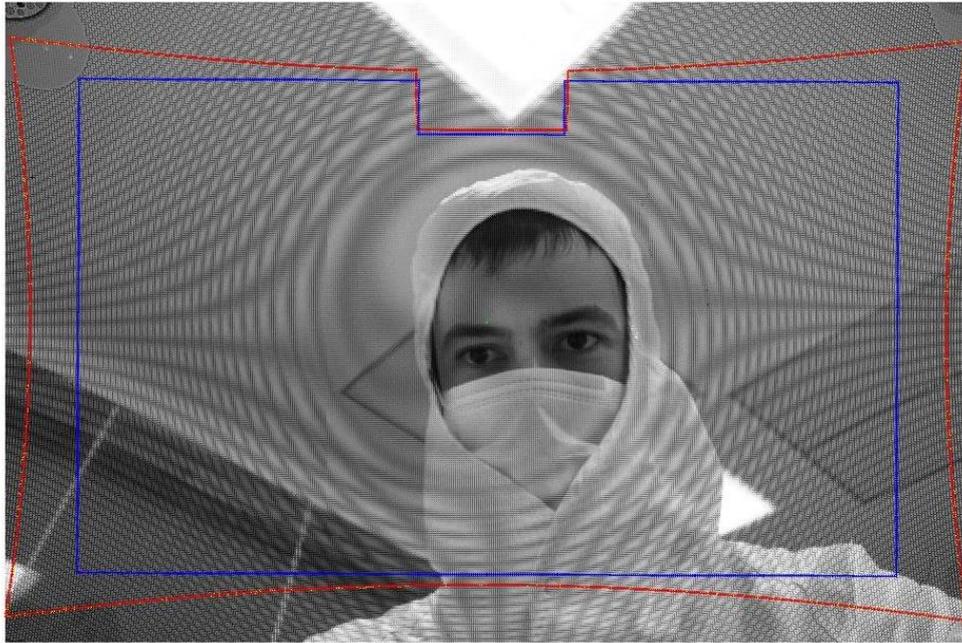
También se ha optado por obligar a que el coeficiente del término de primer grado sea siempre la unidad, ya que de lo contrario interacciona con las estimaciones del pitch y compromete seriamente la convergencia, terminando siempre –no obstante, como cabía esperar- en valores muy próximos a la unidad.

El modelo resultante se resume en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Comentario
Nombre	Rectángulo manual	
Centro X	2734.41	Centro geométrico en 2736,5
Centro Y	1824.57	Centro geométrico en 1824,5
Pitch horizontal	11.8195	píxeles
Pitch vertical	11.8226	píxeles
Inclinación	-0.00434	radianes
Desplaz. Lateral X	-0.19	píxeles
Desplaz. Lateral Y	0.04	píxeles
Coeficiente grado 1	1	
Coeficiente grado 2	7.06E-006	
Coeficiente grado 3	1.02E-008	
Coeficiente grado 4	2.86E-012	
Coeficiente grado 5	3.78E-016	
Suma de distancias	1283.90	píxeles
Numero de microlentes	1813	
Distancia media	0.708	píxeles

Tabla 3-3 Modelo resultante de la optimización de los parámetros a partir de 1813 microlentes identificadas manualmente.

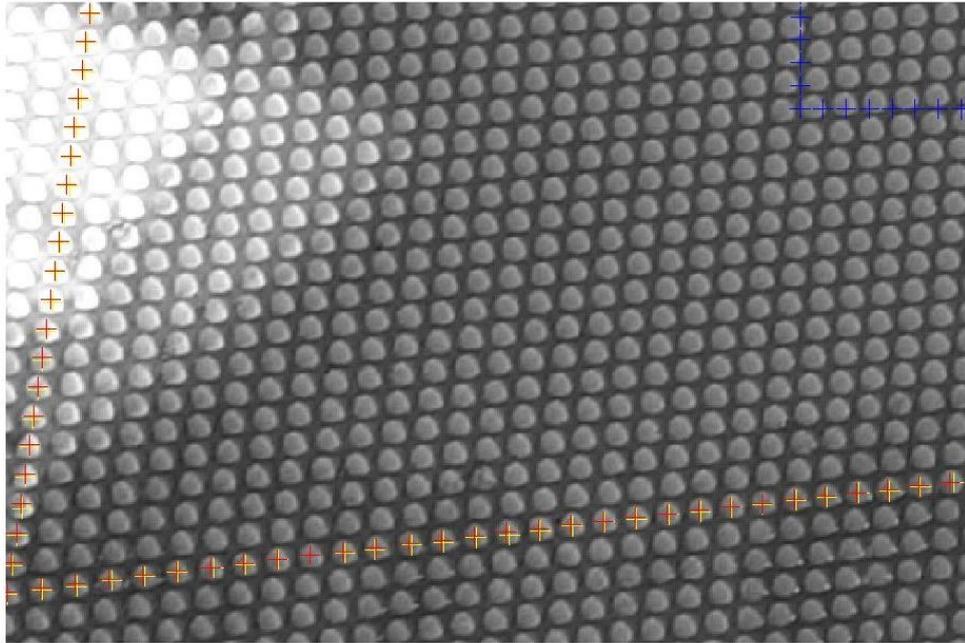
Con este modelo, el rectángulo de microlentillas definido anteriormente quedaría ajustado de la forma que indica la Figura 3.10:



*Figura 3.10 Resultado de la calibración tras la optimización del modelo. Se muestra en azul la posición física de las microlentes según ha estimado el modelo, y en rojo el resultado de aplicar la corrección de campo también modelada. En amarillo –normalmente debajo del rojo- las identificaciones manuales. Punto verde dibujado en el centro de la corrección.*

...donde se dibujan en azul las microlentes en su posición estimada, obtenida mediante sus coordenadas cartesianas y el pitch calculado, en rojo las posiciones obtenidas tras la aplicación del modelo, y en amarillo (que casi no se ve por estar casi siempre oculto bajo el rojo) las posiciones determinadas manualmente. Se ha representado también con un punto de color verde el centro de la corrección resultante del cálculo.

Para mayor detalle, reproducimos seguidamente una ampliación de la esquina inferior izquierda, donde sí que se pueden apreciar los tres diferentes tipos de posiciones:

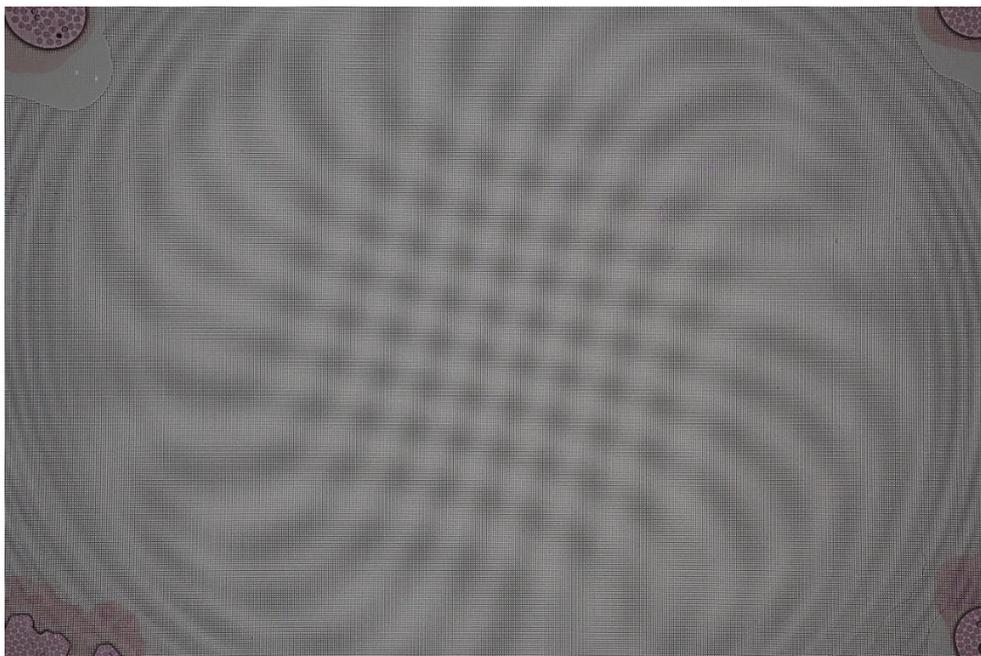


*Figura 3.11 Ampliación de la esquina inferior izquierda de la Figura 3.10, en la que pueden distinguirse los centros de microlentes identificados manualmente (amarillo) y los calculados por el modelo (rojo).*

### **3.4.1 Identificación automática de las posiciones de las microlentes en la imagen plenóptica.**

En el apartado anterior se realizó una identificación manual de las posiciones de las microlentes elegidas para hacer la calibración, lo que indudablemente supone un considerable esfuerzo personal y por lo tanto debería ser mejorado mediante la utilización de un sistema automático.

Para ello, se ha partido de una imagen de calibración obtenida al efecto en unas condiciones especialmente adecuadas para identificar las posiciones de las microlentes, como es el que esté desprovista de cualquier información espacial, así como que posea una cierta uniformidad en la iluminación. Partimos pues de la imagen de calibración siguiente (Figura 3.12):



*Figura 3.12 Imagen de partida para la identificación automática de microlentes, desprovista de información espacial en la medida de lo posible. Se observan las imperfecciones en las esquinas debidas al adhesivo utilizado.*

...en la que se aprecian fuertemente las imperfecciones de las esquinas debidas al procedimiento utilizado para el pegado de las microlentes al detector.

Al objeto de poder identificar de forma automática la posición de las microlentillas, se utiliza un procedimiento desarrollado en el grupo de investigación (Marichal-Hernández J. , 2014) (comunicación interna), simplificándolo para facilitar la identificación de microlentes adyacentes a una dada. De esa forma, el algoritmo utiliza únicamente una subimagen local de dimensiones 40x40 píxeles, en la que –tras un filtrado bilateral para uniformizar la iluminación- calcula el histograma para quedarse con el valor medio y utilizarlo como umbral de binarización de la imagen. Otras estrategias de determinación del umbral pueden usarse igualmente con diferentes resultados según la imagen concreta de la que se trate.

La subimagen binarizada se entrega a las herramientas de procesado de imagen de MATLAB para que identifique las regiones adyacentes y nos devuelva los centroides de las mismas, los cuales consideraremos que son los centros de las microlentes detectadas. Estos centros se ordenan de menor a mayor distancia para ver si alguno de ellos cae dentro de una hipotética caja, en el interior de la cual esperamos que se encuentre la microlente adyacente a una dada. La ubicación de esta caja, en la que se busca el centroide de la microlente, se supone desplazada en igual medida que la microlente inmediatamente anterior, de forma que tenga en cuenta el previsible incremento de la separación entre microlentes según nos alejamos del centro óptico del sistema.

Tanto si no hay ningún centroide dentro de la caja como si hay más de uno se consideran situaciones especiales de error que trataremos adecuadamente. En el primer caso, cuando no hay centroides, sencillamente obviaremos esa coordenada, desplazándonos lateralmente hasta la siguiente utilizando el desplazamiento estimado. Para el caso de que haya más de uno, se ha decidido obviarlo y tomar el primero que se detecte, que puede ser erróneo pero que, al final,

queda absorbido en la optimización por la mayor cantidad de valores correctos.

La Figura 3.13 muestra un ejemplo de la obtención de centroides, con las imágenes de partida y filtrada, la representación gráfica del histograma, y finalmente se aprecian las regiones identificadas:

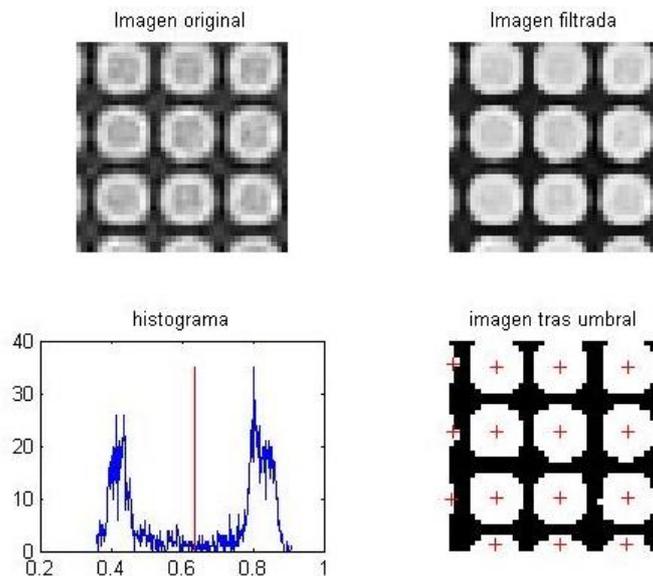
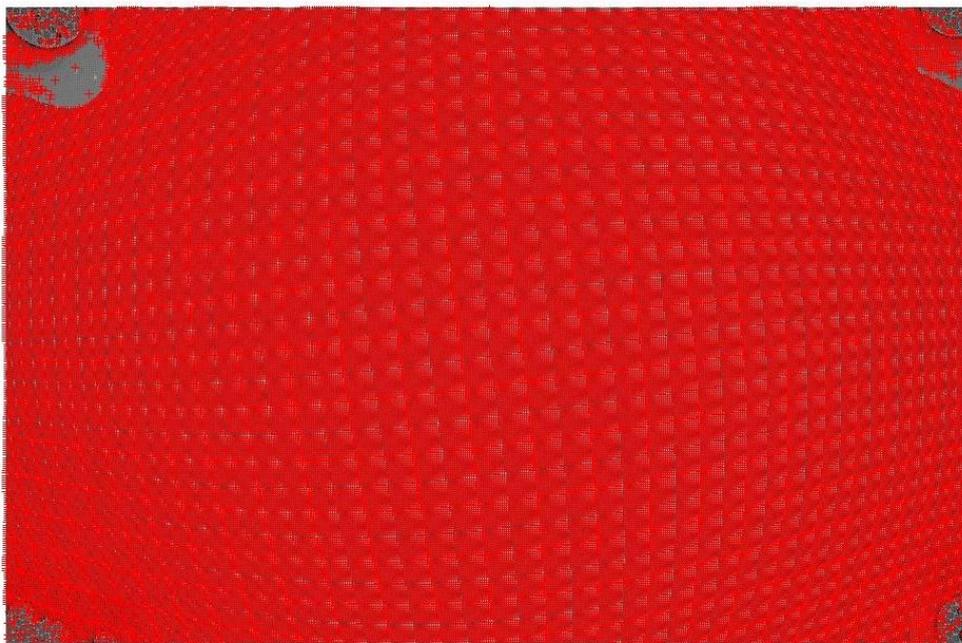


Figura 3.13 Obtención de los centroides de las microlentes adyacentes a una dada. Se utiliza el histograma para realizar la binarización previa a la identificación de centros.

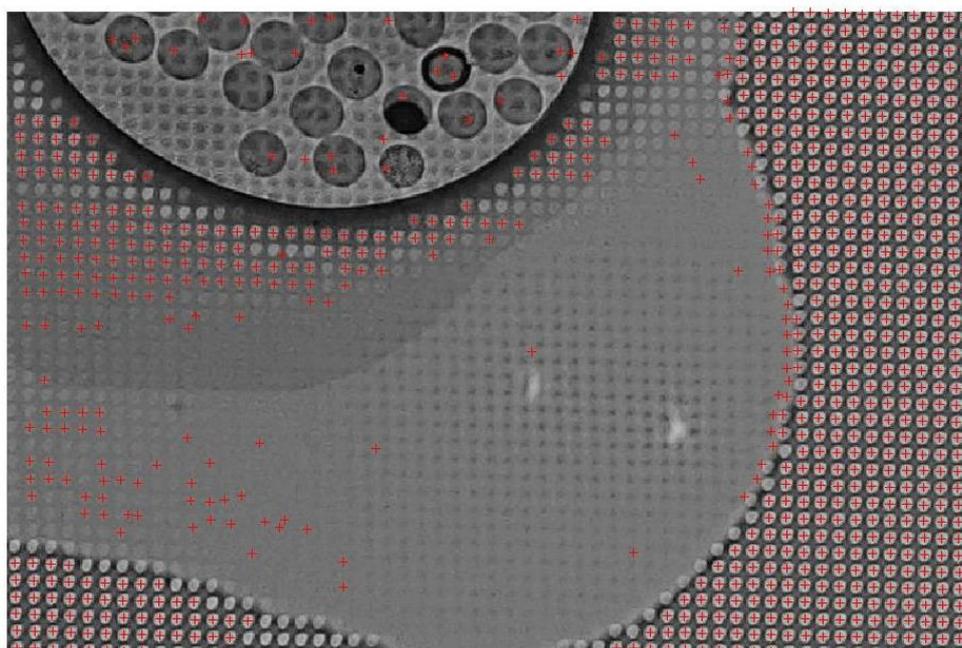
El proceso para identificar sucesivamente todas las microlentes comienza buscando el centro de microlente más cercano al centro geométrico de la imagen. Esa microlente es considerada el origen, y se le asignan por tanto las coordenadas  $x=0, y=0$ . A partir de esta microlente se hace una búsqueda horizontal, primero hacia la derecha y luego hacia la izquierda, de forma que se vayan averiguando paulatinamente todos los centros de las microlentes de esa línea. Cuando se ha concluido la búsqueda horizontal, se busca verticalmente en la abscisa central, inicialmente hacia arriba, para ir encontrando las microlentes de coordenadas  $x=0$ , las cuales son utilizadas para a continuación ir realizando búsquedas horizontales.

El algoritmo de búsqueda puede tardar decenas de minutos pero acaba identificando más de 120.000 microlentes, la inmensa mayoría de ellas correctamente ubicadas, como aparecen en la siguiente imagen (Figura 3.14):



*Figura 3.14 Resultado de la identificación automática de más de 120.000 microlentes*

...y para más detalle se puede observar una ampliación de la zona superior izquierda (Figura 3.15):



*Figura 3.15 Ampliación de la zona superior izquierda de la imagen resultante de la identificación automática, mostrando las microlentes correctamente identificadas cuando ello es posible, dejando un número pequeño de identificaciones erróneas.*

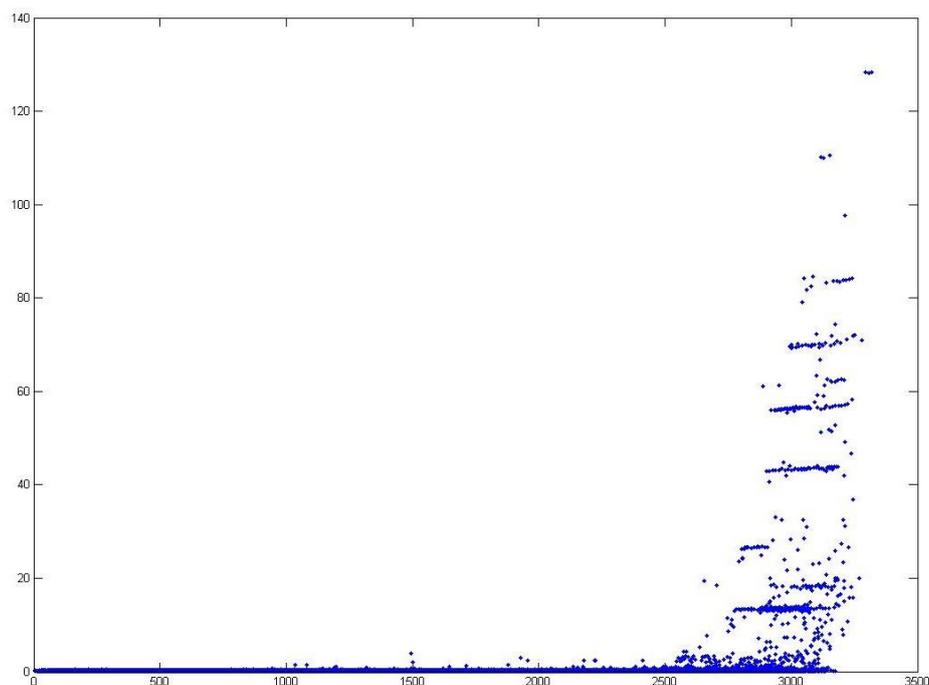
...que muestra la elevada medida en que las microlentes de la zona uniforme central son identificadas con precisión, mientras que en las zonas inutilizadas por el adhesivo aparecen un cierto número de errores, los cuales recibirán el tratamiento que se describe seguidamente.

### 3.4.2 Optimización en dos etapas.

La obtención de un modelo especialmente preciso se ha dividido en dos etapas: una primera que obtiene unos parámetros aproximados, que sirve para descartar aquellas microlentes que estén excesivamente “lejos” de las coordenadas calculadas, y una segunda con el grueso de las microlentes en posiciones “correctas”.

Para ello, sobre el conjunto de las 120.000 microlentes, se elige aleatoriamente una muestra representativa del 1 por ciento de las mismas, realizando sobre ellas la optimización y obteniendo un conjunto inicial de parámetros. Esta reducción deliberada del procesado se realiza para disminuir el tiempo empleado en esta primera etapa, sin sacrificar por ello los resultados finales.

Usando ese conjunto de parámetros, se calculan las posiciones corregidas de la totalidad de las microlentes, lo que arroja una figura como la siguiente (Figura 3.16), que representa la distancia entre la posición identificada y la calculada por el modelo, en función de la distancia al centro óptico:



*Figura 3.16 Representación gráfica de la separación entre las microlentes identificadas y las predichas por el modelo, en función de la distancia al centro. A distancias elevadas, correspondientes a las esquinas, la separación es elevada debido al adhesivo y otras irregularidades.*

Se aprecia un elevado número de microlentes que se separan apreciablemente de la distancia que obtendría el modelo, especialmente a distancias elevadas, como es el caso de las esquinas por los efectos mencionados del pegamento. Se ha aplicado a continuación el criterio de suprimir de la lista, considerándolas manifiestamente erróneas, las posiciones de microlentes identificadas automáticamente que tengan una distancia superior a la mitad del pitch nominal, es decir de 6 píxeles en este caso.

Con este conjunto de microlentes seleccionadas se realiza nuevamente la optimización del modelo, que arroja entonces los resultados resumidos en la Tabla 3-4, tras 5,28 horas de procesado en un ordenador DELL optiplex 790, Intel i5-2400, 3,1 Ghz, 8GB RAM:

Parámetro	Valor	Comentario
Nombre	Calibración focal larga	
Centro X	2735.17	Centro geométrico en 2736,5
Centro Y	1824.81	Centro geométrico en 1824,5
Pitch horizontal	12.4164	píxeles
Pitch vertical	12.4163	píxeles
Inclinación	-0.00426	radianes
Desplaz. Lateral X	0.08	píxeles
Desplaz. Lateral Y	-0.03	píxeles
Coeficiente grado 1	1	
Coeficiente grado 2	3.35E-006	
Coeficiente grado 3	-3.09E-009	
Coeficiente grado 4	2.16E-012	
Coeficiente grado 5	-1.34E-016	
Suma de distancias	13792.4	píxeles
Numero de microlentes	113441	
Distancia media	0.122	píxeles

Tabla 3-4 Parámetros del modelo obtenido mediante dos etapas, sobre más de 100.000 microlentes.

Se obtiene pues una distancia promedio, entre lo calculado por el modelo y lo identificado automáticamente, de una décima de píxel, lo cual supone una gran aproximación. Podemos también analizar la efectividad del ajuste en función de la distancia al centro óptico en la siguiente figura (Figura 3.17):

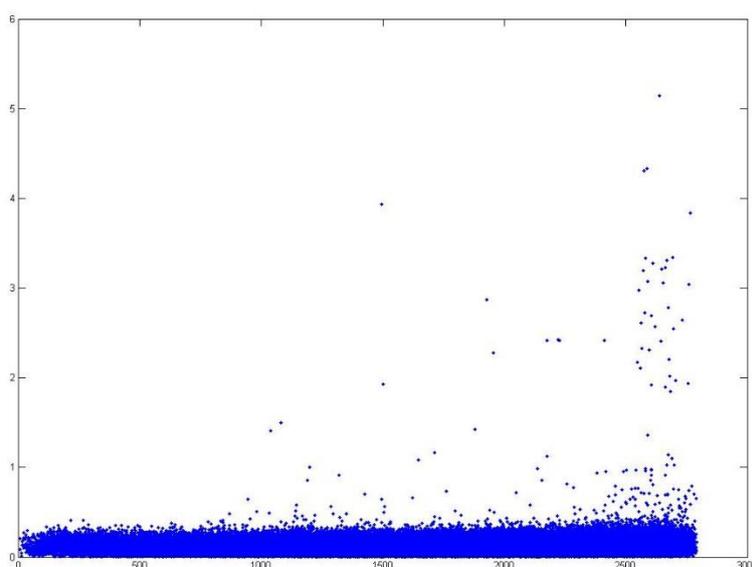


Figura 3.17 Representación gráfica de la separación identificada-modelada, en función de la distancia al centro de la corrección. Puede observarse que la inmensa mayoría se concentra en torno al valor medio de una décima de píxel.

Donde se observa un reparto del error equilibrado en las diversas distancias, con algunas excepciones en las distancias elevadas, correspondientes a las esquinas. La efectividad de la corrección puede ilustrarse con la rejilla que se muestra en la Figura 3.18, la cual está generada mediante líneas cada 75 microlentes horizontalmente (5 líneas verticales) e idéntica cantidad verticalmente (3 líneas horizontales):

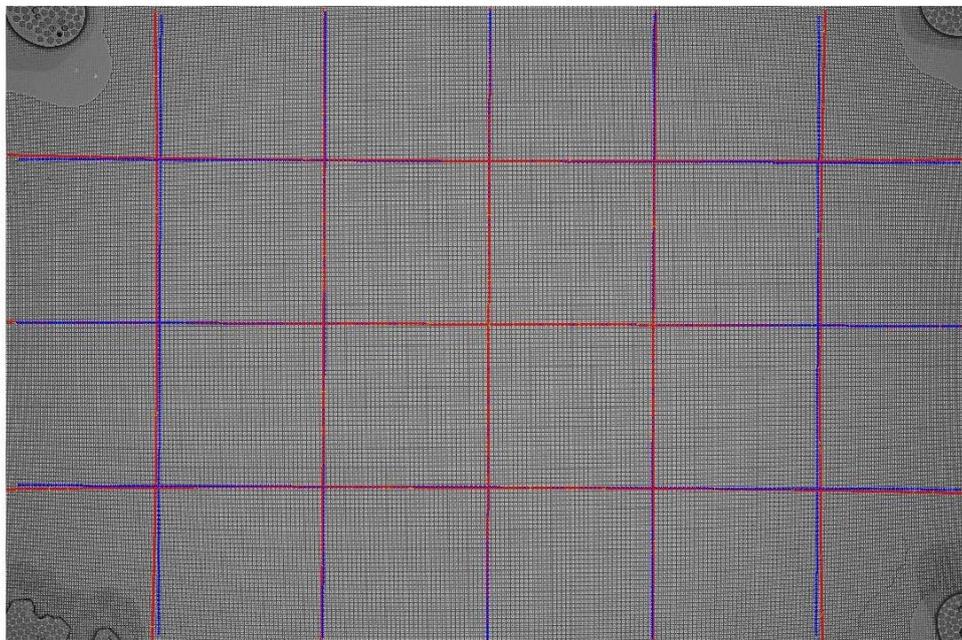


Figura 3.18 Resultado de la corrección modelada para una rejilla cuadrada de 75 microlentes de lado. En rojo se señalan las microlentes en la imagen y en azul las posiciones “reales”, tras deshacer la corrección del modelo calculado.

Una vez más se ha usado el color azul para representar las posiciones “reales” de las microlentes, el rojo para las posiciones obtenidas por el modelo, y el amarillo, que casi no se ve por quedar prácticamente debajo del rojo, para las posiciones de partida identificadas automáticamente en el presente caso.

### 3.4.3 Calibración para el caso de focal corta.

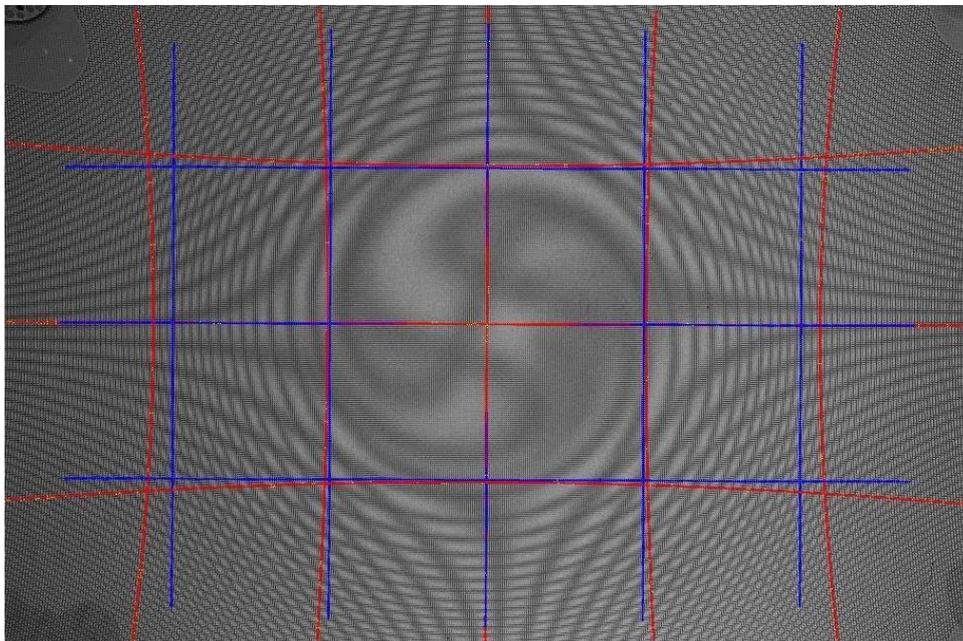
La calibración de la cámara plenóptica para el caso de focal corta presenta la dificultad adicional de que la distorsión de campo es mucho más acusada que en la focal larga. Siguiendo el mismo mecanismo de dos etapas se consigue el siguiente modelo (Tabla 3-5), esta vez tras algo menos de tres horas de procesado:

Parámetro	Valor	Comentario
Nombre	Calibración focal corta	
Centro X	2734.42	Centro geométrico en 2736,5
Centro Y	1825.50	Centro geométrico en 1824,5
Pitch horizontal	11.8453	píxeles
Pitch vertical	11.8470	píxeles
Inclinación	-0.00425	radianes
Desplaz. Lateral X	-0.01	píxeles
Desplaz. Lateral Y	-0.06	píxeles
Coeficiente grado 1	1	

Coeficiente grado 2	-7.29E-007	
Coeficiente grado 3	1.87E-008	
Coeficiente grado 4	-1.05E-012	
Coeficiente grado 5	9.78E-016	
Suma de distancias	30156	píxeles
Numero de microlentes	110715	
Distancia media	0.272	píxeles

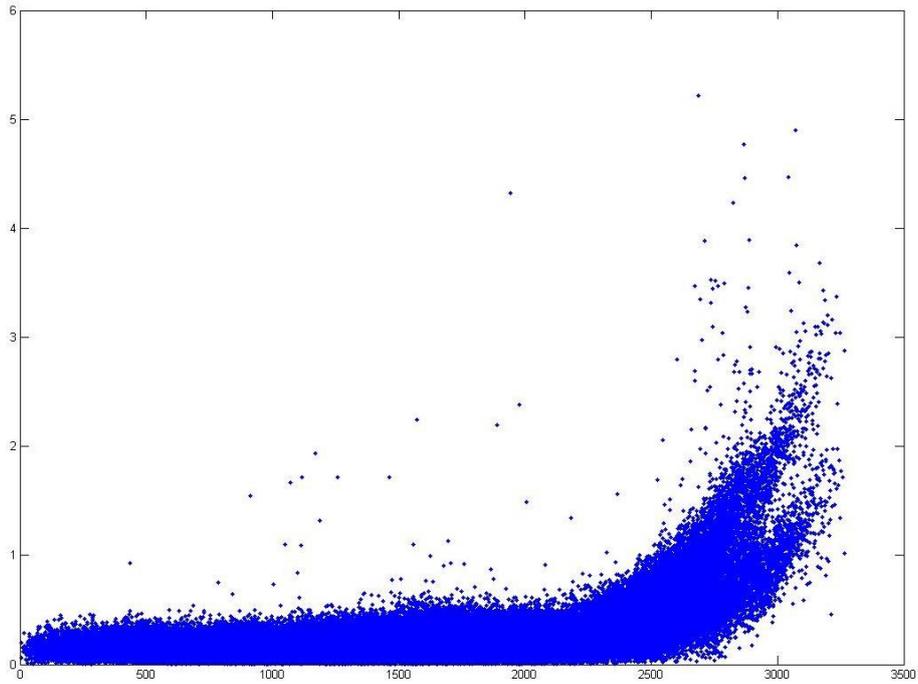
*Tabla 3-5 Resumen de los parámetros del modelo calculado para la situación de focal corta.*

Con el modelo anteriormente descrito, la misma rejilla antes usada ilustra sobre la mayor distorsión involucrada, como aparece en la Figura 3.19, que mantiene el código de colores ya explicado:



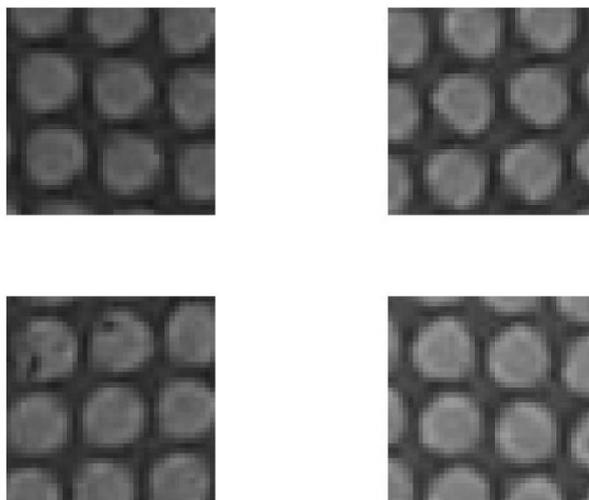
*Figura 3.19 Resultado de la corrección para misma rejilla de 75 microlentes de lado, mostrando en esta ocasión una corrección mucho más acusada. Se señalan en rojo las microlentes identificadas sobre la imagen y en azul las posiciones "reales" calculadas tras el modelo.*

Sin embargo, a pesar de que el error promedio del modelo es bastante bajo, se observa una desviación significativa a las distancias elevadas, sobre todo en las esquinas, tal y como indica la siguiente gráfica (Figura 3.20), en la que se representan los errores del modelo en píxeles frente a la distancia al centro óptico.



*Figura 3.20 Representación de la separación entre las microlentes identificadas y las calculadas por el modelado, en función de la distancia al centro de la corrección. Se observa un incremento apreciable en las distancias grandes, dividido además en dos ramas.*

Entendemos que este efecto se debe a un viñeteo tanto más apreciable cuanto mayor es la distancia al centro óptico, que hace que las imágenes de las microlentes dejen de ser circulares y muestren un oscurecimiento en un lateral. La Figura 3.21, que reúne a cuatro conjuntos de microlentes de las cuatro esquinas, muestra claramente dicho viñeteo, especialmente en la zona superior derecha.



*Figura 3.21 Montaje de cuatro trozos de la imagen plenóptica de calibración elegidos en las proximidades de las cuatro esquinas, donde puede verse el efecto del viñeteo que provoca la determinación errónea de la posición de la microlente debido a que ésta pierde la forma circular.*

Es importante notar que este efecto es ajeno a las posiciones de las microlentes en la imagen y por lo tanto no debe corregirse con un modelo más preciso, ya que se trata únicamente de un

error en la identificación automática de los centros de las microlentes, no en que éstas realmente tengan un desplazamiento diferente por efecto de la distorsión cuando las distancias al centro óptico son grandes.

### 3.5 Procesado final.

Una vez identificados los parámetros de los modelos que definen la configuración de una cámara plenóptica concreta, se puede proceder de dos maneras distintas de cara a realizar la calibración propiamente dicha.

Una posibilidad es realizar una corrección de la imagen mediante giro e interpolación de forma que la resultante esté perfectamente alineada con los píxeles del detector y con un número entero de píxeles en cada microlente.

Otra aproximación, que es la que se ha seguido en la presente Tesis, es la de extraer el conjunto de coordenadas de los centros de las microlentes, y referir todos los demás programas de procesado a este conjunto (Figura 3.22). De esta forma, cuando se desea acceder a una determinada posición de la pupila, se combinan las coordenadas relativas de la pupila con las del centro de la microlente correspondiente, pudiéndose entonces realizar alguna interpolación en caso necesario. No obstante, dado el elevado número de píxeles por microlente que se utiliza habitualmente en los casos manejados, no se ha visto necesario utilizar interpolaciones, aunque podría hacerse en caso necesario.

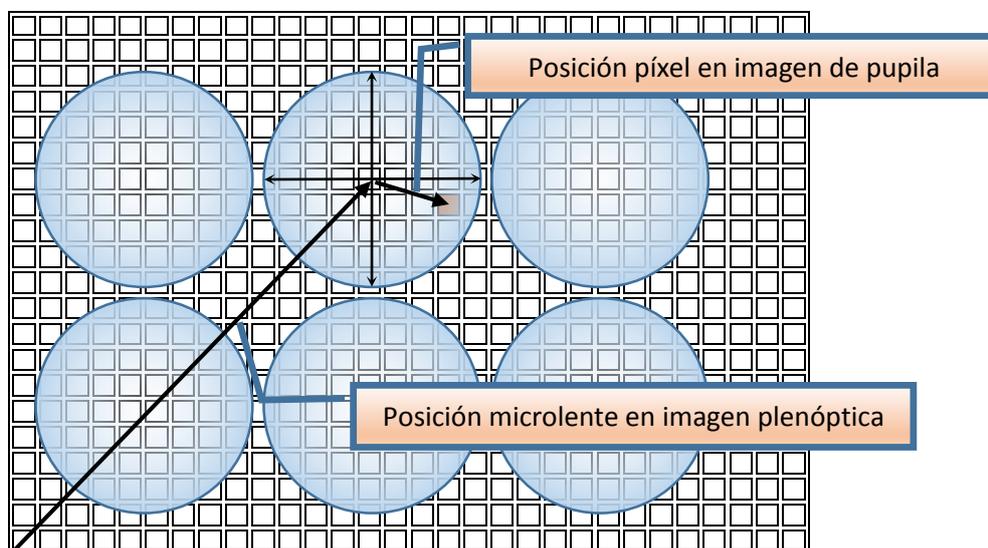


Figura 3.22 Esquema conceptual ilustrativo del resultado de la calibración, que consiste en el conjunto de coordenadas de los centros de las microlentes. A partir de estos centros, se obtienen las posiciones en la pupila en cada microlente, y así se determina el píxel correspondiente a cada cuádrupla de coordenadas, dos en pupila y dos en el plano focal.

El resultado final de la calibración es pues, de cara a los programas utilizados en la presente Tesis, el conjunto de las posiciones de los centros de las microlentes en la imagen, expresadas mediante las coordenadas X e Y en unidades de píxel y representadas en general en coma flotante.

# 4 Capítulo IV. Ensayos en Laboratorio

*“A tidy laboratory means a lazy chemist.”*

Jöns Jacob Berzelius

Se describen seguidamente dos verificaciones de laboratorio que se realizaron para determinar la viabilidad de realizar el sensado de frente de onda mediante la Cámara Plenóptica. En ambos casos se genera un frente de onda conocido, el cual se hace llegar a la cámara plenóptica para su medida e identificación. Se documentan los conceptos y elementos utilizados, así como los conceptos empleados en los programas de recuperación, y finalmente los resultados obtenidos.

## 4.1 Verificación con espejo deformable

En esta primera ocasión se realizó una valoración cualitativa de la respuesta de la cámara plenóptica a una variación determinada de la fase en pupila. Con tal objetivo se utilizó el montaje óptico descrito en la Figura 4.1,

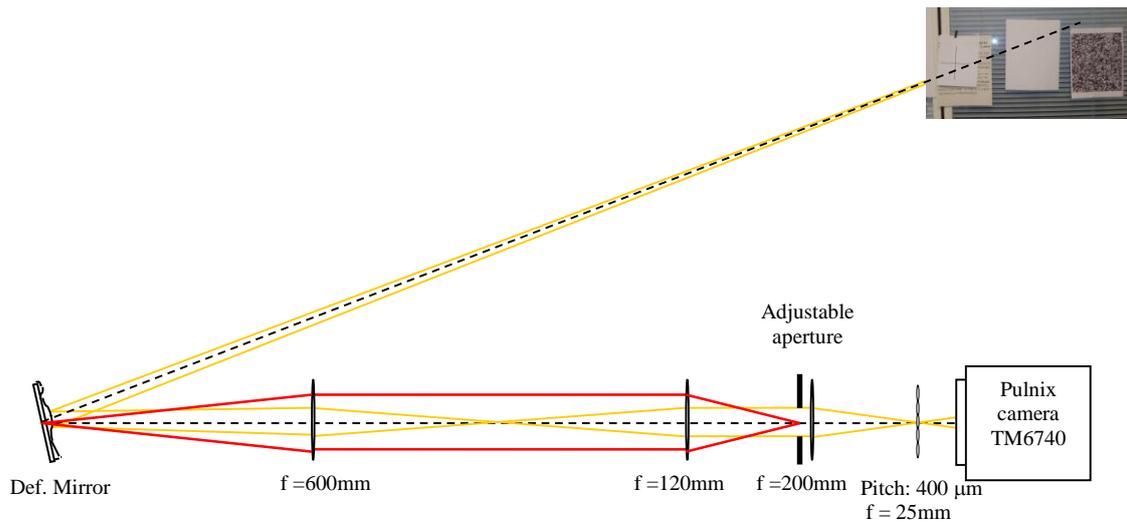
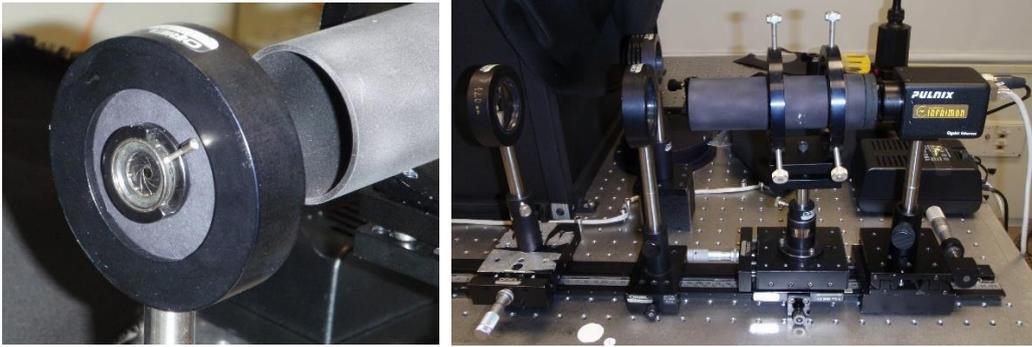


Figura 4.1 Diagrama del montaje óptico utilizado para verificación cualitativa de la cámara plenóptica respecto a cambios de fase en pupila.

...el cual combina la obtención de una imagen plenóptica de un objeto con la reimaginación de un espejo deformable en la apertura. Se ha utilizado el color amarillo para representar los rayos principales que indican la formación de la imagen plenóptica, al menos en lo que a la microlente central se refiere, y en color rojo los rayos que muestran la reimaginación del espejo deformable en la apertura de la cámara plenóptica. El montaje óptico podía utilizar como objeto tanto una imagen de granulación solar como una cruz, así como una referencia uniforme para calibración; todos ellos aparecen fotografiados en la parte superior derecha. Dada la elevada distancia focal del conjunto reimaginador fue preciso ubicarlos en la pared del laboratorio LISA (Laboratorio de Imagen y Sensores en Astronomía) del IAC, donde se realizaron las pruebas.

Como espejo deformable se utilizó un modelo de 25 mm de diámetro y 37 actuadores piezoeléctricos fabricado por OKOTECH, mientras que para lograr la reimaginación se utilizaron dos dobletes acromáticos de 600 y 120 mm respectivamente, de forma que se adaptara un poco mejor el diámetro del espejo a la apertura de la cámara plenóptica.

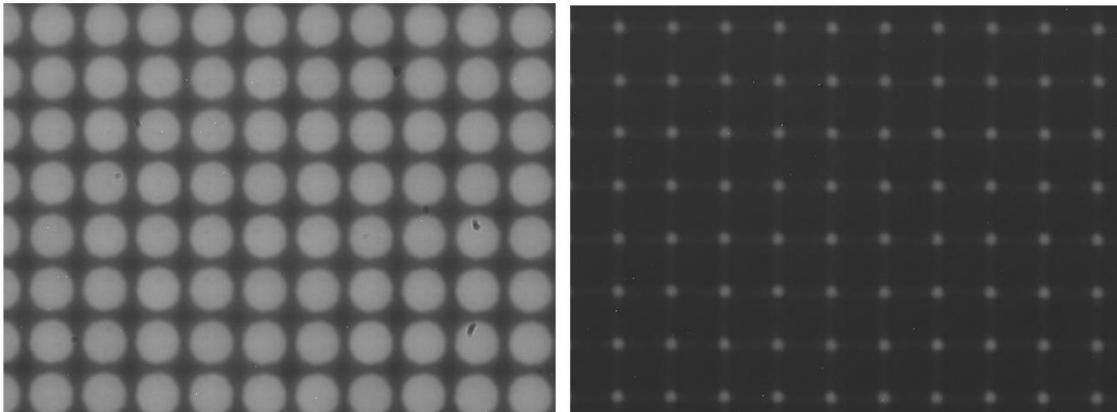
La cámara plenóptica se construyó combinando un doblete acromático de 200 mm de focal con un array de microlentes fabricado por Adaptive Optics Associated, con 400 micras de “pitch” y 25 mm de focal. Se utilizó un iris para reducir la apertura hasta conseguir que la lente de cámara y las microlentes tuvieran un número F similar, el cual se situó muy próximo a la superficie de la lente, casi adherido a la misma. Como detector para la cámara plenóptica se instaló la cámara PULNIX TM6740, de interfaz Gig-E con 640x480 píxeles cuadrados de 7,4 micras.



*Figura 4.2 A la izquierda, montura del iris adherido a la superficie de la lente de cámara, utilizado para ajustar la relación focal. A la derecha, vista lateral del montaje mostrado el bafle utilizado para limitar la entrada de luz difusa.*

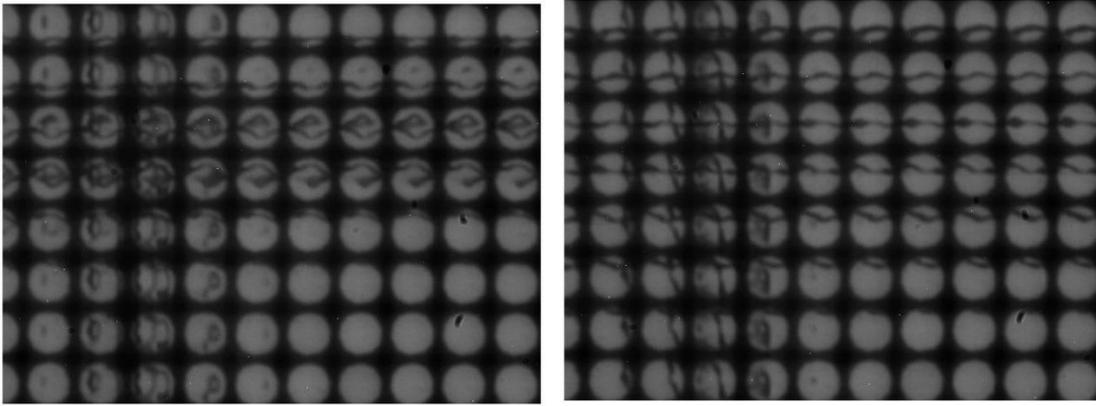
La Figura 4.2 (izq) muestra la apertura ajustable montada en el mismo soporte que la lente de cámara, así como el bafle utilizado para reducir la cantidad de luz difusa que recibe el sensor. A la derecha se muestra la segunda lente reimaginadora (120 mm de focal) y los componentes de la cámara plenóptica (cámara, bafle, soporte de las microlentes y detector).

Con esta configuración, la imagen plenóptica resultante se muestra en la Figura 4.3, para el caso de una iluminación uniforme, estando a la derecha la situación de apertura manualmente cerrada (casi) al objeto de poder realizar la calibración averiguando las posiciones de los centros de las microlentes.



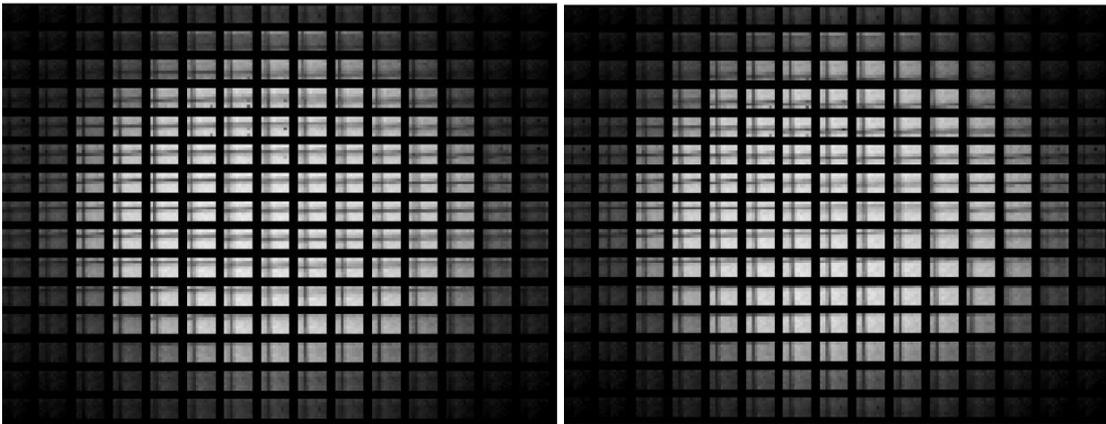
*Figura 4.3 Izquierda: Imagen plenóptica con iluminación uniforme. Derecha: Imagen con aperturas casi cerradas adquirida para la calibración.*

La Figura 4.4 muestra dos imágenes plenópticas de un objeto extremadamente simple - una cruz- obtenidas en dos posiciones extremas del actuador número 14 del espejo deformable, dejando los demás actuadores en la posición intermedia de reposo.



*Figura 4.4 Imágenes plenópticas adquiridas en dos posiciones extremas del actuador número 14 del espejo deformable, entre las que se aprecia gran diferencia.*

Una vez recompuestas las imágenes de pupila para las dos posiciones extremas del actuador número 14, utilizando un muestreo de 15x15 puntos a lo largo de las coordenadas vertical y horizontal de la misma, se representa el resultado en la Figura 4.5.



*Figura 4.5 Imágenes recompuesta de cada zona de la pupila, para las dos posiciones extremas del actuador número 14. Un examen detallado permite observar que el desplazamiento del objeto (la cruz) es distinto según la posición de la pupila que se trate, como cabe esperar.*

Un examen detallado de las diferencias entre ambas figuras muestra que el movimiento de la cruz debido al actuador número 14 es diferente dependiendo de la posición de la pupila de que se trate, siendo muy pequeño en los bordes de la pupila y máximo hacia el centro de la misma, que es donde está situado el actuador 14. Estos efectos pueden visualizarse con mucha mayor facilidad con ayuda del video <http://youtu.be/kKRUYSvg8b8>, al que también puede llegarse mediante el código QR disponible en la Figura 4.6, para el caso en el que el lector disponga de un Smartphone con esta capacidad.



Figura 4.6 Código QR para acceder a la película ilustrativa de los efectos del movimiento del actuador número 14.

Con ello queda demostrado que el efecto del actuador, que es un cambio de fase especialmente acusado en la zona en la que éste se reimagina, conduce a un desplazamiento de la imagen correspondiente a esa zona de la pupila, del cual puede extraerse una medida del mismo.

## 4.2 Verificación con placa de fase

Una verificación más próxima a la situación habitual de una observación telescópica se realizó mediante el montaje óptico representado en la :

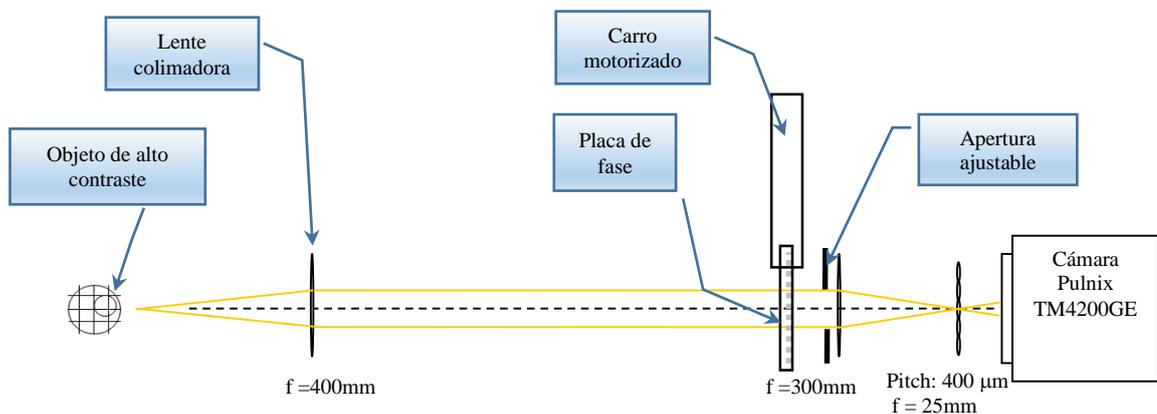


Figura 4.7 Diagrama del montaje óptico utilizado para la verificación en laboratorio con placa de fase.

El montaje utiliza un doblete acromático de 400 mm de focal para colimar un objeto de alto contraste, confeccionado sin simetrías para facilitar la correcta identificación y procesado de las imágenes, de forma que se simule la ubicación del mismo en el infinito, como sucede habitualmente en las observaciones astrofísicas. Los rayos llegarán entonces completamente paralelos a la placa de fase que simula una capa de turbulencia atmosférica de grosor infinitesimal, la cual se ha ubicado tan próxima a la apertura como ha sido posible, emulando así lo que constituiría la capa de turbulencia de superficie.

La cámara plenóptica se configuró en esta ocasión con una apertura ajustable muy próxima a la lente de cámara, un doblete acromático de 300 mm de focal, seguido del ya descrito array de microlentes de 400 micras de pitch y 25 mm de focal. El detector en esta ocasión fue una cámara Gig-E de 2048x2048 pixeles cuadrados de 7,4 micras de lado, PULNIX TM-4200-GE.

La Figura 4.8 muestra una fotografía del montaje realizado en la que se pueden observar algunos de los componentes más significativos, como la placa de fase en su montura rotatoria –a la izquierda de la fotografía-, en la que se puede apreciar el adhesivo “post-it” amarillo que se

utilizó para identificar la zona de interés.

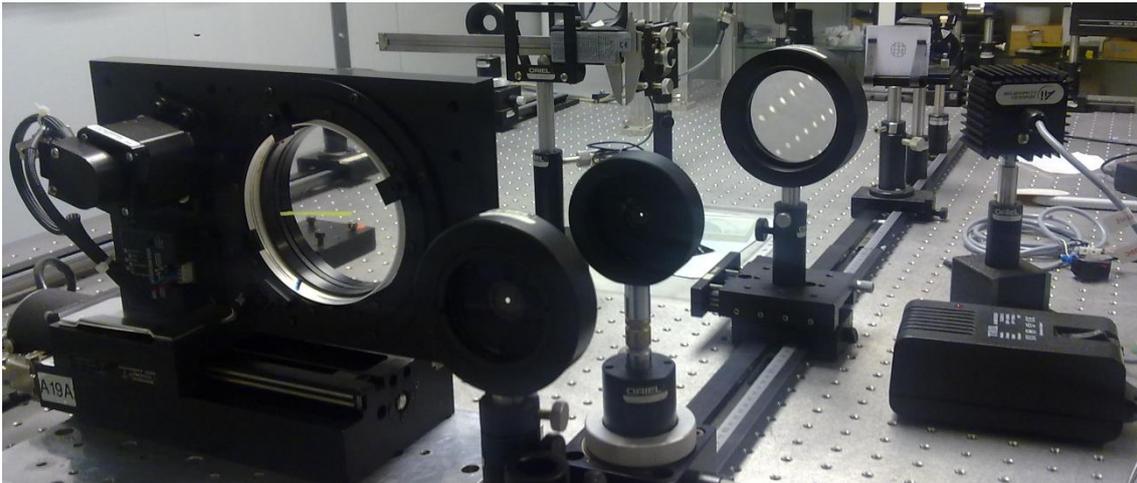


Figura 4.8 Montaje óptico realizado para la verificación con placa de fase. Ésta puede verse a la izquierda en su montura rotatoria.

#### 4.2.1 Descripción de la placa de fase

Se ha utilizado una placa de fase fabricada por Lexitek (USA) mediante mecanizado en fresa de control numérico de materiales de índice de refracción muy similar (Ebstein, 1996), que dibujaba una turbulencia con estadística de Kolmogorov de parámetro  $r_0 = 1,5$  mm medido en unidades físicas de la propia placa. Esta placa, cuyo mapa de fase se representa en la figura siguiente, se eligió por tener una zona de fases fácilmente reconocible en la zona seleccionada.

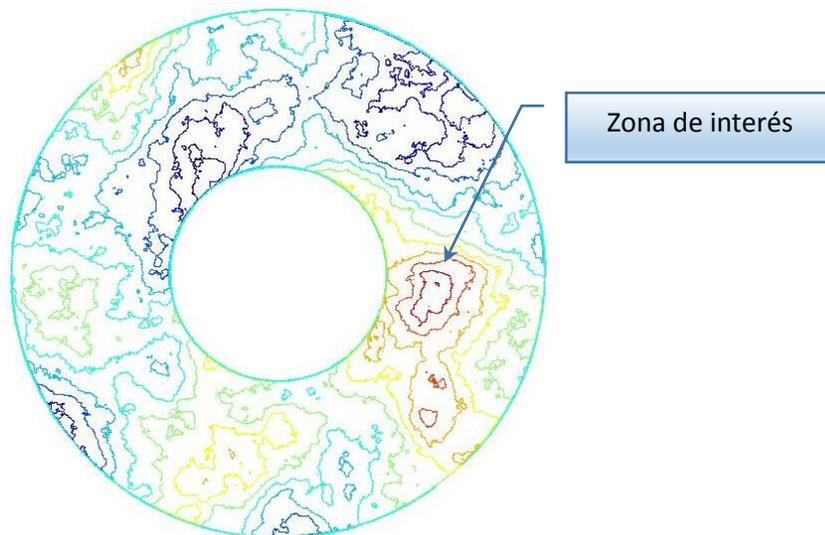


Figura 4.9 Representación gráfica, mediante líneas de nivel, de la fase nominal de fabricación correspondiente a la placa utilizada.

La identificación de la zona de fase en la práctica no está exenta de dificultades, ya que a simple vista es sencillamente imposible de distinguir. Por tal motivo se utilizó la imagen proporcionada por un interferómetro Zygo XPZ, señalando la zona de interés mediante un papel adhesivo, como se indica en la Figura 4.10:

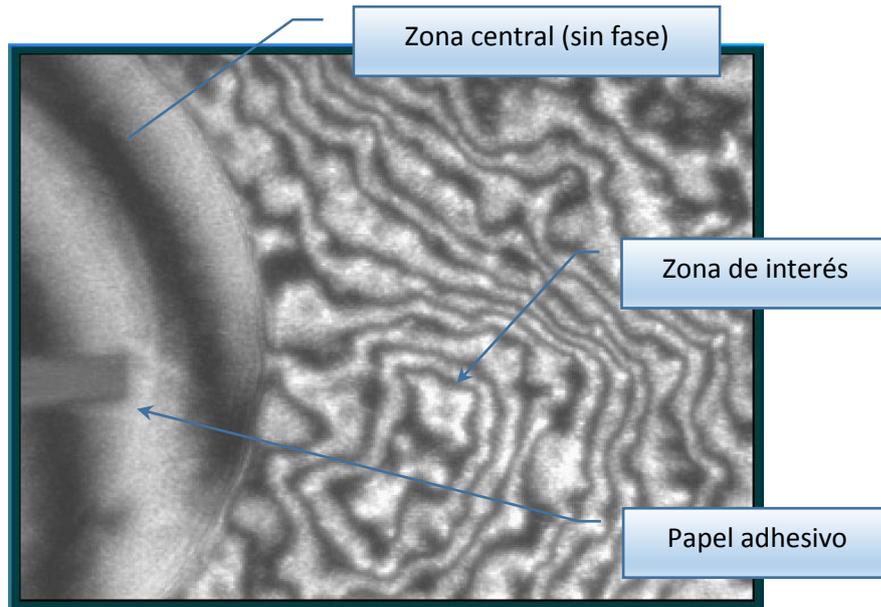


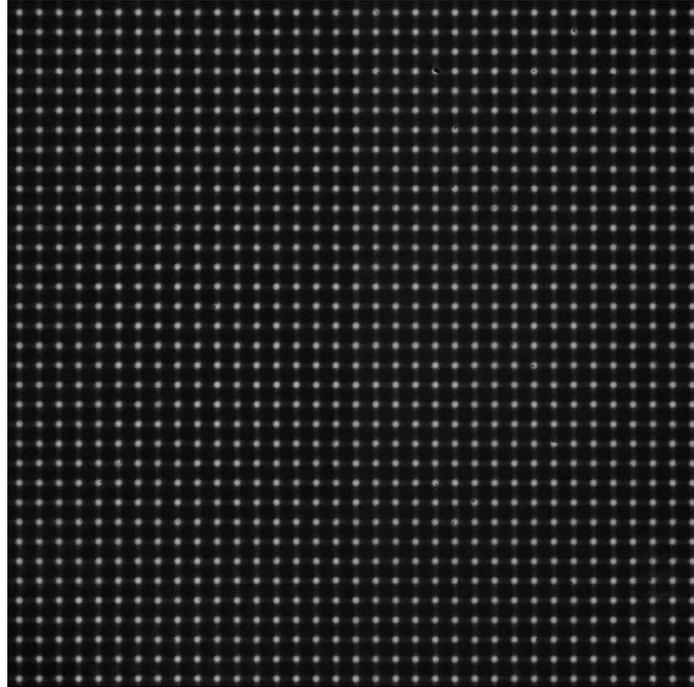
Figura 4.10 Identificación de la zona de interés mediante visualización del mapa de fase en el interferómetro Zygo XPZ.

## 4.2.2 Procesado de la imagen plenóptica para la obtención del frente de onda

Se describe seguidamente el conjunto de procesados que se realizaron en las imágenes plenópticas de cara a la determinación del frente de onda en pupila.

### 4.2.2.1 Calibración

Se utilizó el procedimiento de cierre de la apertura, que presenta excelentes resultados cuando el alineado entre píxeles y microlentes es razonablemente correcto. Aunque puede hacerse directamente con la imagen del objeto, se utilizó una imagen uniforme para este menester, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 4.11:

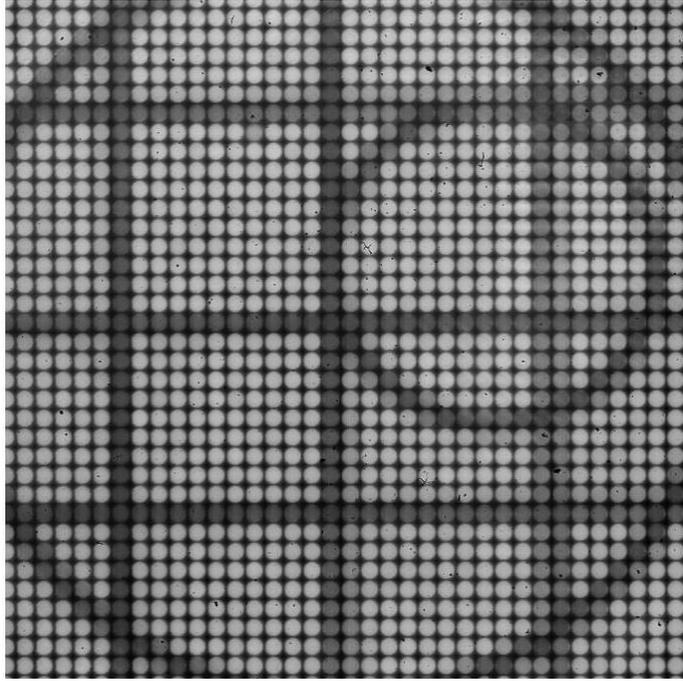


*Figura 4.11 Imagen plenóptica de calibración adquirida mediante el método de reducción de la apertura.*

El modelo de calibración obtenido poseía 0.013 píxeles por microlente de inclinación, 58.38 píxeles de pitch vertical y 58.35 píxeles de pitch horizontal.

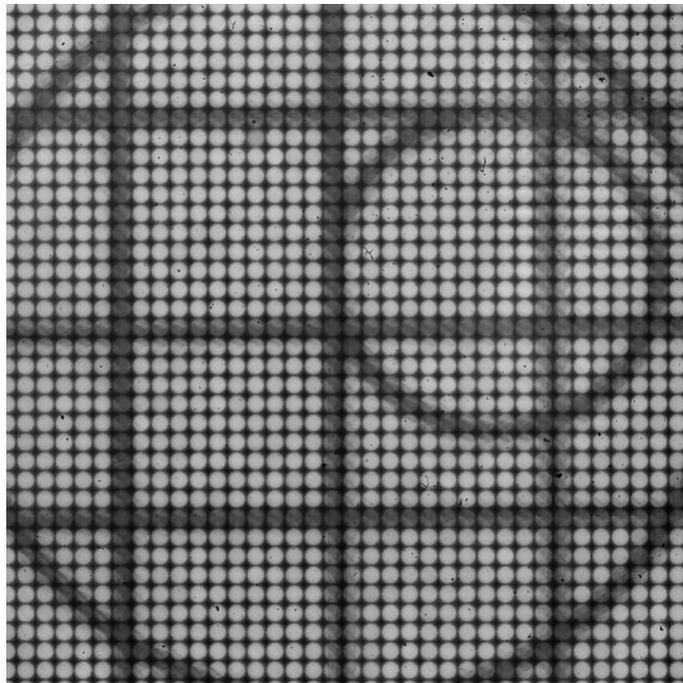
#### **4.2.2.2 Enfoque y adquisición de referencia**

La Figura 4.12 muestra la imagen de referencia, en la que la placa de fase se ha retirado del camino óptico. En la imagen puede identificarse claramente la forma elegida para el objeto de alta resolución, y se observa que las microlentes están uniformemente iluminadas, como corresponde a lo que sería una imagen correcta de pupila para un objeto situado en el infinito. No obstante, la iluminación de cada una de ellas depende de la radiancia del objeto en el ángulo sólido determinado conjuntamente por la lente de cámara y la microlente.



*Figura 4.12 Imagen plenóptica tomada sin introducir la placa de fase en el camino óptico, para realizar un enfoque correcto y utilizarse como referencia.*

Una vez obtenida la imagen de referencia, que consideramos de fase cero, procedemos a colocar la placa de fase en el camino óptico, concretamente en la zona de interés que contiene el pico antes mencionado. La imagen plenóptica resultante se representa en la Figura 4.13:



*Figura 4.13 Imagen plenóptica del objeto en cuestión tomada tras insertar la placa de fase en el camino óptico. Puede observarse claramente una cierta estructura aparecida en muchas de las microlentes.*

Donde ya se observa un cierto dibujo en el interior de las microlentes, a partir del cual obtendremos seguidamente la información de fase.

### 4.2.2.3 Extracción de imágenes correspondientes a los puntos de pupila

La medida de la fase se basa en la obtención del desplazamiento relativo entre las imágenes reconstruidas correspondientes a cada coordenada de la pupila. Se ha utilizado el siguiente sistema de coordenadas (Figura 4.14):

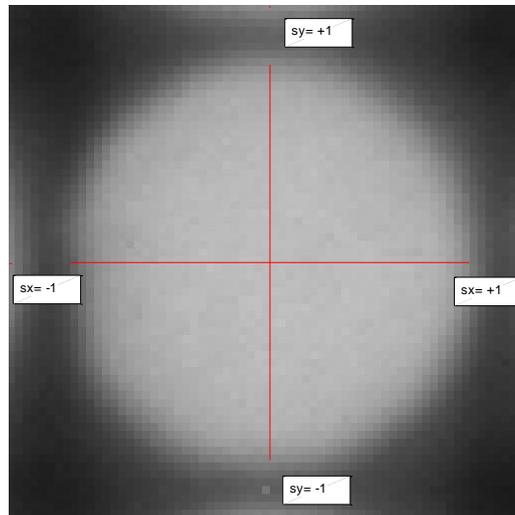


Figura 4.14 Representación del sistema de coordenadas utilizado para identificar las muestras de pupila, otorgándoles valores fraccionarios entre -1 y +1 para ambos ejes.

en el que se asignan los valores +1 y -1 a los extremos de cada eje, estando entonces el centro de la pupila en (0,0), y todas las ubicaciones en la pupila son fraccionarias referidas a la unidad, que a su vez corresponde a la mitad del pitch.

Con esta distribución se puede calcular un cierto número fases en las diversas coordenadas de la pupila, limitados naturalmente por la resolución de la imagen de ésta y –sobre todo- por el número de píxeles por microlente utilizado. En nuestro caso hemos tomado 19 muestras en cada eje.

Las imágenes resultantes, por ejemplo para el caso del centro de la pupila, quedarían como las que se muestran en la Figura 4.15, estando a la izquierda la imagen de referencia sin fase y a la derecha la obtenida tras insertar la placa de fase.

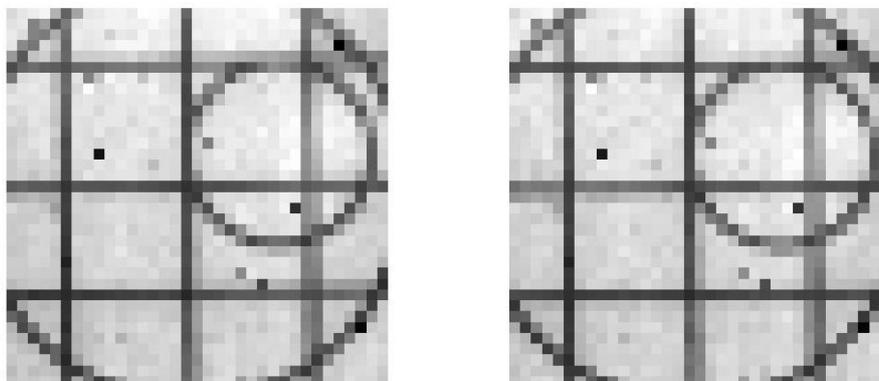


Figura 4.15 Imágenes reconstituidas correspondientes a la zona central de la pupila, sin placa de fase (izq.) y con placa de fase (der.) Puede observarse un leve desplazamiento hacia abajo observando detenidamente las líneas horizontales.

Son el resultado de extraer el píxel central de cada una de las 35x35 microlentes que forman la imagen plenóptica. Aunque ambas imágenes parecen casi iguales, es posible notar un leve desplazamiento hacia la parte inferior si se toman como referencia las líneas horizontales.

#### 4.2.2.4 Preparación previa a la correlación

El cálculo del desplazamiento mediante correlación es especialmente adecuado para el caso que nos ocupa, debido a que se trata de un objeto extenso elegido con contraste especialmente elevado para facilitar el comportamiento en laboratorio del conjunto. Sin embargo, es preciso realizar algunos procesados previos para lograr un resultado coherente en la correlación.

La correlación es especialmente sensible a los componentes de las imágenes situados en frecuencias espaciales bajas, tales como componentes continuas ("bias") e inclinaciones. Esas componentes entorpecen tremendamente la obtención de un pico en la correlación situado correctamente en el desplazamiento que se pretende averiguar, y por lo tanto deben ser extraídos por igual de ambas imágenes.

Por tal motivo, cada una de las imágenes es corregida no solo del valor promedio de la misma, sino que también se le detrae el resultado de ajustar por mínimos cuadrados un plano inclinado.

Finalmente, para lograr que la correlación se concentre en los elementos de alto contraste, que es de donde mejor se puede evaluar el desplazamiento, se realiza un filtrado paso alto con frecuencia de corte en torno al 20% de la frecuencia de Nyquist y un kernel del 80% del tamaño de la imagen. Estos valores, que han demostrado resultar óptimos para las imágenes manipuladas en este experimento, pueden requerir adaptación al tipo de objeto que se utilice, especialmente si se trabaja con objetos de bajo contraste como la granulación solar.

#### 4.2.2.5 Cálculo del desplazamiento mediante correlación.

De cara al cálculo de la correlación entre las dos imágenes, se ha seguido la estrategia de definir un kernel en una de las imágenes de un tamaño levemente inferior, dejando un marco de un tamaño equivalente a los desplazamientos que se quieren explorar, con el mínimo lógico de una unidad (Figura 4.16). Este kernel de tamaño inferior garantiza la exactitud de los cálculos de correlación para desplazamientos inferiores al marco en valor absoluto, independientemente de que la misma se calcule mediante transformaciones de Fourier o directamente mediante sumas de productos.

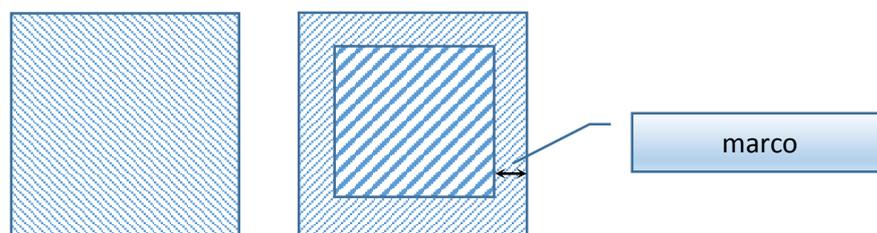


Figura 4.16 Representación gráfica las dos imágenes y del marco que se descarta en una de las imágenes a la hora de definir el kernel con el que se calculará la correlación.

El pico resultante en la correlación se determina con precisión subpíxel mediante un ajuste parabólico basado en el valor máximo y los adyacentes tanto horizontal como verticalmente.

La Figura 4.17 muestra los resultados del procesado descrito,

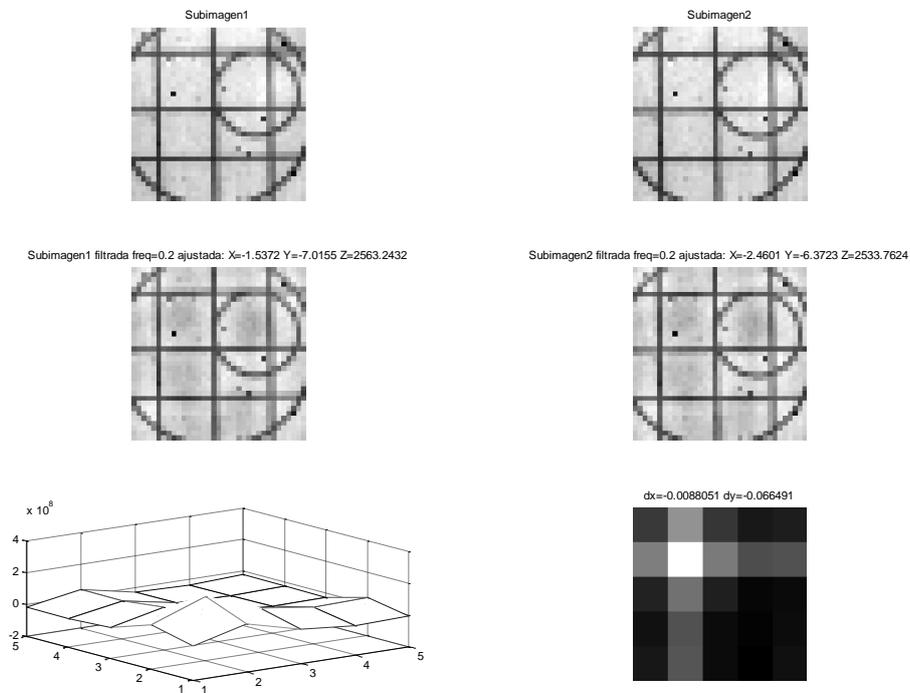


Figura 4.17 Pantalla resumen del cálculo del desplazamiento realizado mediante correlación. En la línea superior, las dos imágenes a comparar. En la línea central, las imágenes tras ajustes y filtrados. En la línea inferior, el resultado de la correlación representado como red y como imagen.

...con las imágenes de partida en la parte superior, las imágenes pre-procesadas para facilitar la correlación y finalmente, en la parte inferior, los valores de correlación en las proximidades del pico, junto con el resultado del ajuste.

Por último, una representación gráfica conveniente de la pendiente medida se realiza colocando en la posición de pupila analizada una línea cuya longitud y orientación es proporcional a las componentes de la pendiente calculada en ese punto, escalada de forma que, en este caso, una longitud igual al espaciado entre muestras equivaldría a un desplazamiento de un décimo de píxel (Figura 4.18):

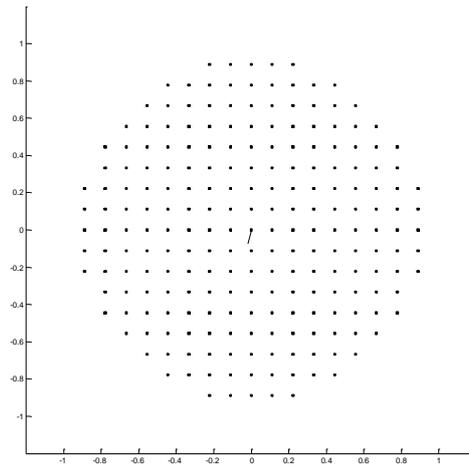


Figura 4.18 Representación gráfica del gradiente de fase medido en la coordenada central de la pupila.

La gráfica muestra únicamente el valor de pendiente calculado para la coordenada central de la pupila, indicando el lugar donde se han establecido las 19x19 muestras. Se han obviado las muestras que tienen una distancia superior a 0,94 en el sistema de coordenadas de pupila comentado, es decir, las que caerían en las esquinas, ya que se trata de los intersticios entre microlentes en los cuales el comportamiento presenta múltiples dificultades prácticas.

### 4.3 Resultados

Durante la realización de los ensayos, la zona de interés de la placa de fase se hacía entrar y salir en el camino óptico mediante un carro motorizado de desplazamiento lateral. Se obtenía así una secuencia de medidas de fase que comienzan en la zona central, donde esencialmente apenas si hay desviaciones de fase, desplazándose paulatinamente hacia la derecha, tal y como indica la Figura 4.19:

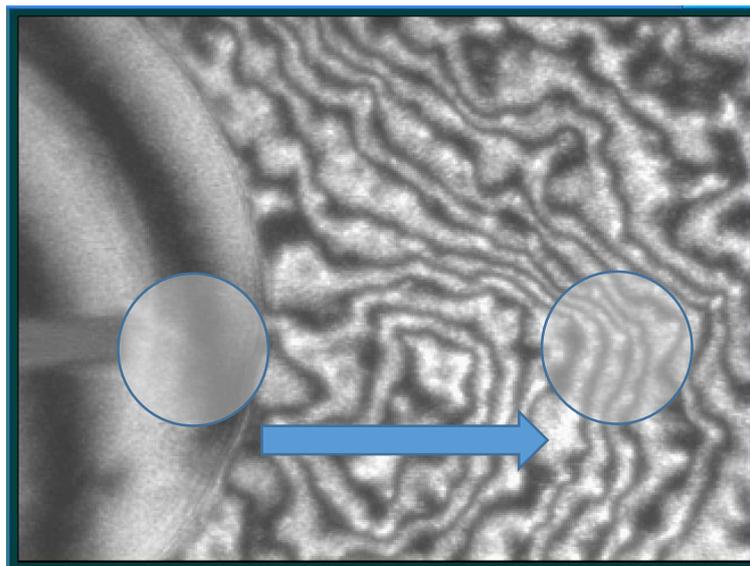


Figura 4.19 Esquema indicativo del desplazamiento lateral utilizado para introducir la placa de fase en el camino óptico, al objeto de evaluar la respuesta de la cámara plenóptica a las diversas zonas de la placa de fase. Se indica la dimensión aproximada de la zona analizada.

Para realizar el desplazamiento lateral se utilizaron 351 posiciones del carro lineal, realizando en cada una de ellas la adquisición de la imagen plenóptica. El resultado del procesado independiente de cada una de ellas puede verse en la película ubicada en la dirección web [https://www.youtube.com/watch?v=be-2ggqNN\\_s&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=be-2ggqNN_s&feature=youtu.be), de la que se extraen tres posiciones representativas seguidamente. También podrá visualizarse a través del código QR que aparece en la Figura 4.20, de utilidad si el lector tiene ante sí un ejemplar en papel.



Figura 4.20 Código QR para el acceso a la película que reúne el desplazamiento del carro descrito en el ensayo de laboratorio.

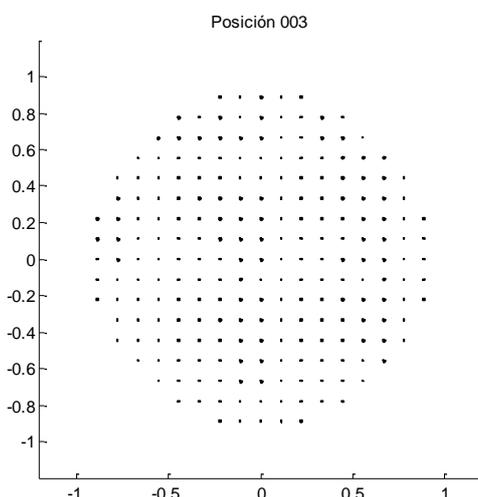


Figura 4.21 Gradientes recuperados en la posición número 3, mostrando la zona completamente sin fases del centro de la placa de fase.

La Figura 4.21 muestra los gradientes de fase en pupila en la posición número 3, que se comprueba que son esencialmente nulos como corresponde a la zona desprovista de fases situada en la parte central de la placa de fase.

Extraemos a continuación la posición número 60 (Figura 4.22), en la que la zona anular con contenido de fases distintas de cero ha entrado en la zona analizada hasta ocupar aproximadamente la mitad derecha, quedando la mitad izquierda con fases nulas.

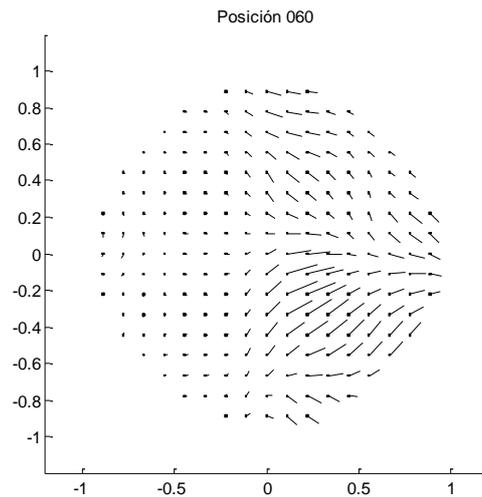


Figura 4.22 Gradientes medidos en la posición número 60, en la que la zona anular con fases ha entrado hasta la mitad de la pupila.

Extraemos finalmente la posición número 210 (Figura 4.23), en la que puede verse claramente la ubicación del pico identificado en la placa de fase, que se reconoce al tener gradiente nulo y por el hecho de que los gradientes de las muestras adyacentes apunten hacia él. También puede constatar que se encuentran pendientes más elevadas en la mitad superior de la pupila, y la forma estirándose a 45 grados hacia la izquierda y arriba, todo lo cual coincide claramente con lo obtenido en el interferograma de la Figura 4.19.

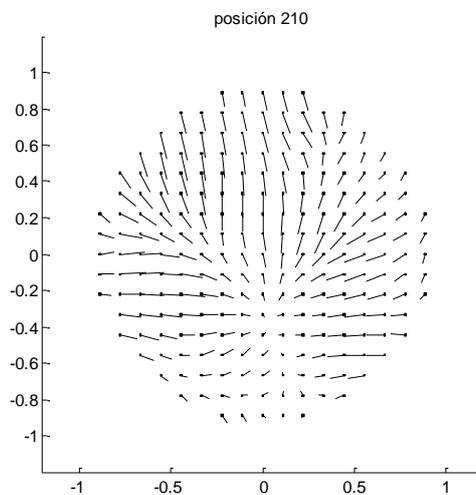


Figura 4.23 Gradientes de fase en pupila para la posición número 210, en la que se observa la ubicación del pico de fase.

Se comprueba pues, de una manera rotunda, que la medida de gradientes que se ha realizado con nuestra cámara plenóptica corresponde fielmente con la información grabada en la placa de fase, lo cual se acredita tanto por la especificación (Figura 4.9) como por el interferograma antes mencionado.

## 5 Capítulo V. Verificación en Telescopio

*“Errors using inadequate data are much less than those using no data at all.”*

Charles Babbage

En este capítulo se presenta el conjunto de pruebas realizadas en telescopio al objeto de confirmar la viabilidad de utilizar la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda en Astrofísica. Estas pruebas se realizaron con telescopios y objetos astronómicos reales, pero con las cámaras de sensibilidad reducida de las que se disponía, habiendo elegido por tanto objetos de gran brillo y, en consecuencia, de escaso interés científico intrínseco, pero perfectamente adecuados para la finalidad de demostración y verificación que se perseguía.

De esa forma, a lo largo de siete periodos de observación en los años 2011 y 2012, se utilizó con este fin el telescopio OGS (Optical Ground Station), propiedad de la Agencia Espacial Europea (ESA) y ubicado en el Observatorio del Teide (Islas Canarias, España). El telescopio OGS es especialmente adecuado para la realización de montajes experimentales tal y como se describirá posteriormente. Los objetos estelares observados fueron elegidos entre los más brillantes y mejor situados en el cielo (mayor elevación, menor distancia al cenit) según las fechas de las observaciones, obteniéndose así las históricas primeras imágenes plenópticas de Sirio, Vega, Arturo, Deneb, Capella y Alnath, entre otras. Como objeto extenso, de especial interés para la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda, se utilizó la Luna, lo cual no estuvo exento de dificultades de tipo práctico como se comentará más tarde.

El objetivo global perseguido era la verificación de la capacidad de la Cámara Plenóptica para la medida del frente de onda, aplicada a la Astrofísica. Este objetivo se consiguió plenamente, como se mostrará a continuación, y para ello se utilizaron tres pruebas diferentes, y complementarias en cierto modo, con un nivel de complejidad práctica ascendente. Inicialmente se utilizó el propio foco del telescopio para provocar un frente de onda curvo ex profeso, el cual se recuperó puntualmente. Posteriormente se realizó un análisis detallado de los parámetros estadísticos de la turbulencia medida, concretamente de la función de

estructura, para verificar que correspondía con lo esperable en una estadística atmosférica (Kolmogorov, 1941) una vez hechas las correcciones adecuadas a la situación existente. Por último, y para borrar definitivamente cualquier sombra de duda, se colocó un sensor convencional de Shack-Hartmann en paralelo y sincronizado electrónicamente con el sensor plenóptico, de forma que fueran capaces de “ver” exactamente la misma turbulencia. Las conclusiones de este montaje, que se describen posteriormente, también conducen a una verificación positiva.

Salvo en este último caso, en el que claramente no es adecuado por la naturaleza del sensor de Shack-Hartmann, se emplearon tanto objetos extensos como puntuales, mostrando así la consistencia del método de medida de fases con Cámara Plenóptica.

## 5.1 El telescopio OGS



*Figura 5.1 Imagen del telescopio OGS en el Observatorio del Teide, Islas Canarias, con el Pico del Teide al fondo.*

La Estación Óptica Terrestre, habitualmente conocida por su acrónimo en inglés OGS, (Optical Ground Station), se construyó dentro de los planes estratégicos de la Agencia Espacial Europea para investigar en el campo de las comunicaciones ópticas entre satélites (Figura 5.1). El cometido inicial de la estación, equipada con un telescopio de 1 metro de apertura, es llevar a cabo las pruebas en órbita de los terminales de telecomunicación láser a bordo de satélites en órbitas bajas y en órbita geoestacionaria. Realiza también un rastreo de basura espacial en la órbita geoestacionaria y en la órbita de transferencia GEO.

Además de dos posiciones de foco Ritchey-Chrétien, el telescopio posee una configuración Coudé en la que el foco es conducido hasta un laboratorio situado en la planta inferior del mismo, con una distancia focal equivalente de 38,95 m.

La Figura 5.2 muestra una sección del telescopio en cuyo interior puede observarse la ubicación del Laboratorio Coudé, que tiene la inestimable cualidad de mantener el foco en una posición fija respecto del suelo, independientemente del objeto estelar al que el telescopio esté apuntando. Dispone además de una mesa óptica convencional en la que es especialmente simple realizar cualquier montaje experimental, como es el caso que nos ocupa, llevando hasta ella la luz del objeto observado con la distancia focal equivalente ya mencionada. Permite

además realizar un enfoque del conjunto mediante control remoto de la posición del secundario, y también ofrece la posibilidad de trabajar en un entorno de temperatura y humedad razonablemente similares a los de un laboratorio convencional, sin estar sometido a las bajas temperaturas existentes en la cúpula.

En la propia Figura 5.2 se muestra en color rojo el recorrido de los rayos principales hasta el laboratorio Coudé, que además de primario y secundario hiperbólicos comprende un total de cuatro espejos planos, un doblete acromático realizado con los materiales KZFN2 y BAK2 (Schott) y que es el que proporciona el aumento de focal respecto a las configuraciones Cassegrain, dos ventanas de dióxido de silicio (fused silica) sin potencia óptica que delimitan la zona evacuada y un último espejo plano a 45 grados que entrega la luz paralela a la mesa óptica.

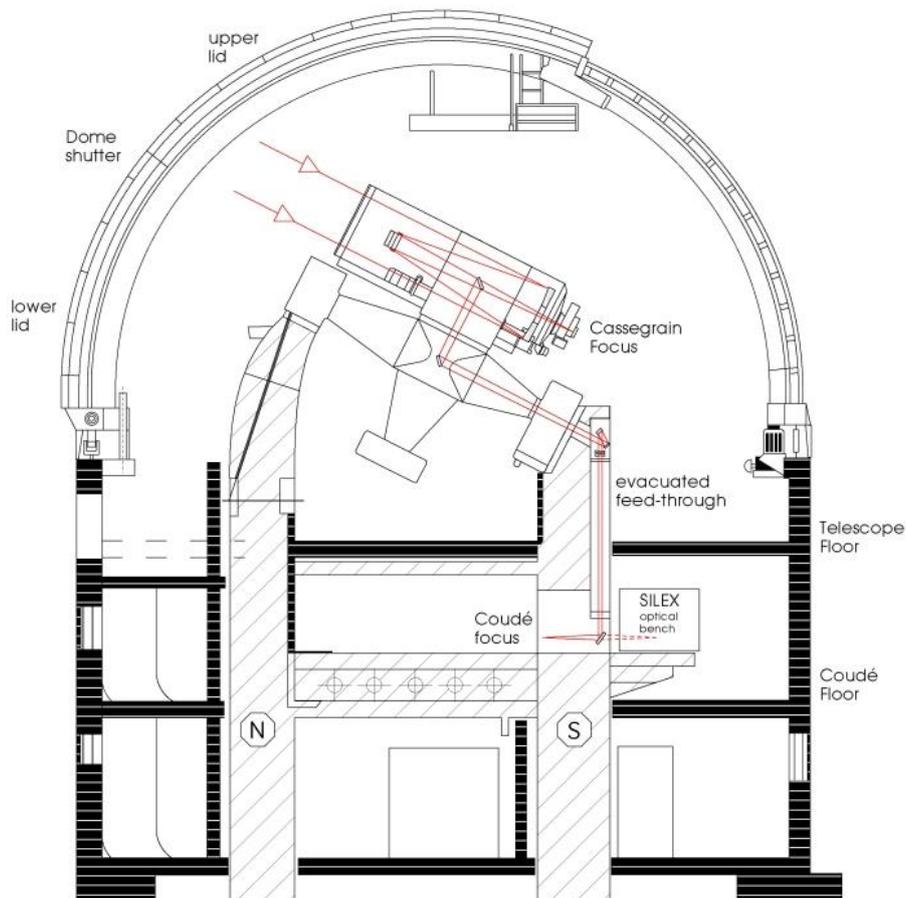
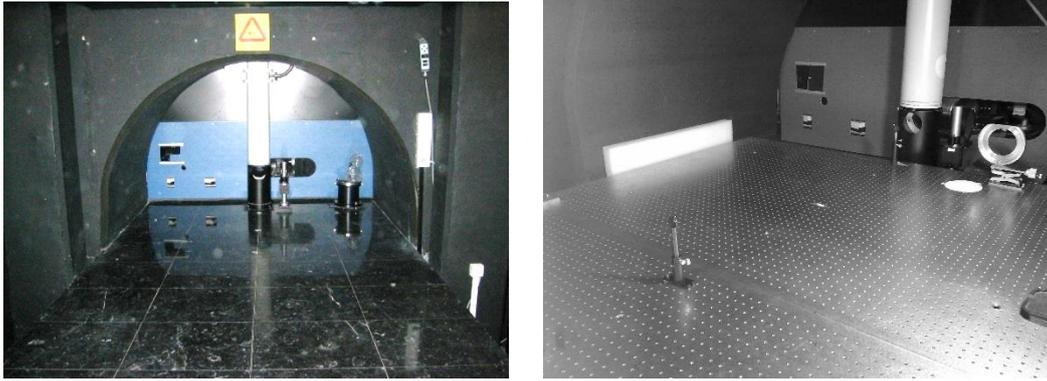


Figura 5.2 Distribución interna del telescopio OGS. El recorrido de la luz hasta el foco Coudé se señala en color rojo.

La Figura 5.3 muestra la salida del tubo evacuado a través del cual es conducida la luz desde la planta superior (nivel de cúpula) hasta el laboratorio Coudé, así como el bloque de granito sobre el que se apoya la mesa óptica convencional de métrica europea. A izquierda y derecha aparecen las paredes de hormigón que forman la estructura del pilar sur, unidas por una bóveda también de hormigón.



*Figura 5.3 (Izq.) Banco óptico de granito ubicado en el Laboratorio Coudè del telescopio OGS. (Der.) Mesa óptica instalada sobre el banco de granito. En ambos casos, en el centro, el tubo blanco evacuado por el que desciende el haz de luz.*

## 5.2 Montaje de la Cámara Plenóptica en el Telescopio OGS

La figura muestra el esquema utilizado para el montaje de la cámara plenóptica en el telescopio OGS. Se utilizó una pareja de lentes cambiadoras de escala al objeto de adaptar el número F de las microlentes de que se disponía,  $f/62.5$ , al cono generado por el telescopio de  $f/38.95$ , ya que en caso contrario el tamaño de las imágenes de la pupila habría resultado excesivo y conducido a diafonía entre las mismas. En esta misma dirección, y para independizar en mayor medida las diversas microlentes, se decidió aplicar un margen extra frente a lo que hubiera sido igualar los números F de telescopio y microlentes, aplicando un factor 2 en la elección de la pareja de lentes reimagadoras, las cuales fueron elegidas de 150 y 300 mm de distancia focal respectivamente, resultando entonces una focal equivalente a la entrada de las microlentes de  $F/\#=78$ .

La Figura 5.4 representa un esquema en planta, realizado a escala, de los detalles principales de la instalación en la sala Coudè del telescopio OGS:

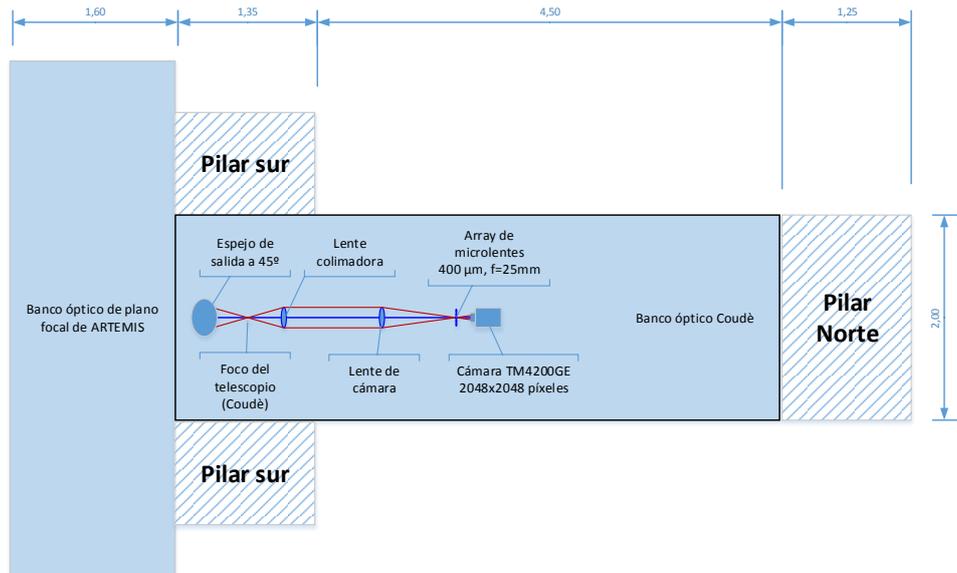


Figura 5.4 Esquema en planta del montaje utilizado para la instalación de la Cámara Plenóptica en el laboratorio Coudé del telescopio OGS

Se utiliza la zona norte del mencionado laboratorio, conviviendo con los elementos permanentes allí ubicados, como es el banco óptico de comunicaciones con el satélite ARTEMIS. La luz provendrá del espejo giratorio a 45 grados con  $F/38.95$  y generará un foco a una distancia nominal de 246 mm del mismo, para posteriormente atravesar la pareja de lentes reimagadoras mencionadas y convertir éste a  $F/78$ , y finalmente alcanzar el array de microlentes y la cámara Gig-E del fabricante PULNIX, con  $2048 \times 2048$  píxeles de  $7.4 \mu\text{m}$ .

Al objeto de verificar la viabilidad de la instalación y de profundizar en sus características y peculiaridades, se realizó un análisis mediante simulación en Zemax del montaje óptico en el telescopio, incorporando el modelo disponible de éste (Figura 5.5).

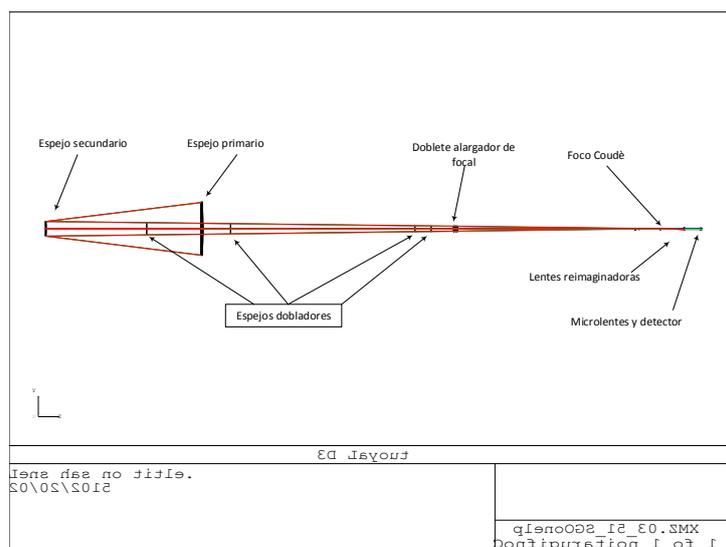
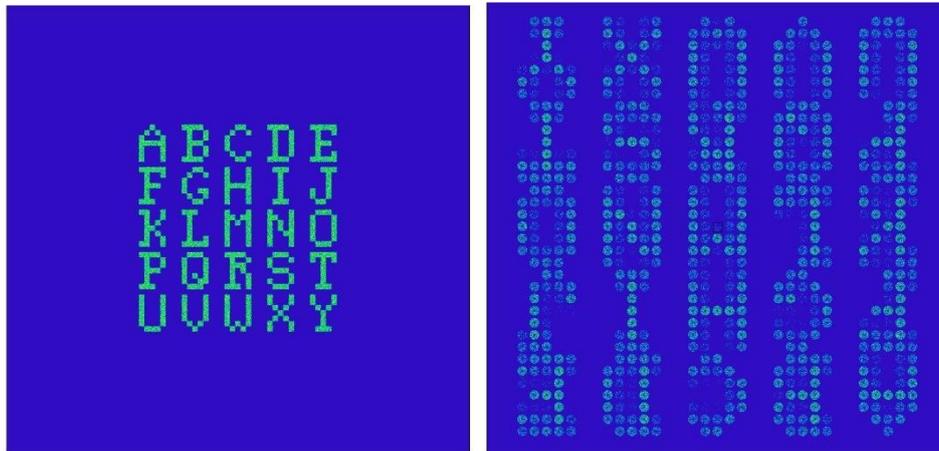


Figura 5.5 Esquema óptico Zemax global, incluyendo el modelo de telescopio, las lentes reimagadoras y la cámara plenóptica al final.

Los resultados más significativos de la simulación se representan seguidamente, en la que se puede apreciar la respuesta a un objeto extenso formado por algunas letras del abecedario, que consiste como cabe esperar en múltiples imágenes de la apertura, cuyo oscurecimiento central se ha representado adecuadamente, las cuales tienen una iluminación determinada por la irradiancia del objeto en el ángulo de visión correspondiente, pero repartida uniformemente.



*Figura 5.6 Objeto utilizado en la simulación (izq.) e imagen plenóptica simulada (der.) generada por el conjunto óptico telescopio + reimaginación + cámara plenóptica.*

### 5.2.1 Fabricación de montura tipo “C” para albergar las microlentes

La necesidad de ubicar el array de microlentes a una distancia del sensor equivalente a su distancia focal requirió el diseño y fabricación específica de una montura al efecto doblemente roscada, capaz de proporcionar la capacidad de enfoque mediante giro del conjunto, combinada con la de alinear las líneas de las microlentes con las de los píxeles del detector por medio de la segunda rosca.

En la Figura 5.7 se muestran los detalles de diseño de la misma, que se basa en desmontar el anillo adaptador a la rosca estándar tipo “C”, utilizada comúnmente en las cámaras científicas, quedando entonces un roscado de métrica 30 y paso 0.75 mm, para el que se ha fabricado una pieza adaptadora que acaba conteniendo un receptáculo roscado en métrica 40 y paso 1 mm, para admitir la ubicación de las microlentes a una distancia regulable mediante el accionamiento conveniente de la rosca. Para alinear las líneas de microlentes con el detector, se aprovecha el posicionado del adaptador de la cámara a la rosca “C”, el cual se sujeta mediante tres prisioneros atornillados ajustados con llave hexagonal de 0.9 mm.



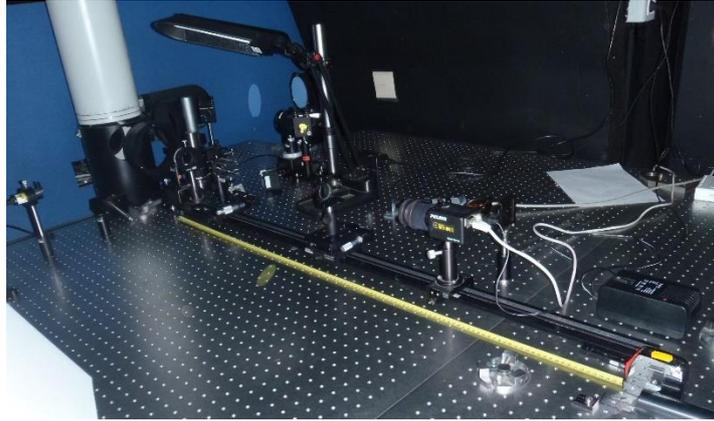


Figura 5.9 Montaje de la cámara plenóptica en el foco Coudé del telescopio OGS.

## 5.3 Procesado de la imagen plenóptica para la obtención de la fase en la apertura.

Se describe seguidamente el recorrido conceptual seguido para realizar el procesado de las imágenes de la cámara plenóptica, de cara a la obtención de las medidas del frente de onda en la apertura del telescopio.

### 5.3.1 Calibración

Como siempre, la primera etapa que debemos abordar es la calibración de nuestra cámara plenóptica en el sentido de obtener la ubicación de los centros de las microlentes en el detector, a partir de los cuales se podrá realizar posteriormente el procesado requerido. Con tal finalidad partimos de una imagen uniformemente iluminada de la totalidad del campo, lo que podemos conseguir utilizando luz de fondo de cielo durante el día o bien con imágenes de la Luna altamente desenfocadas (Figura 5.10), buscando incluso la saturación de los píxeles iluminados:

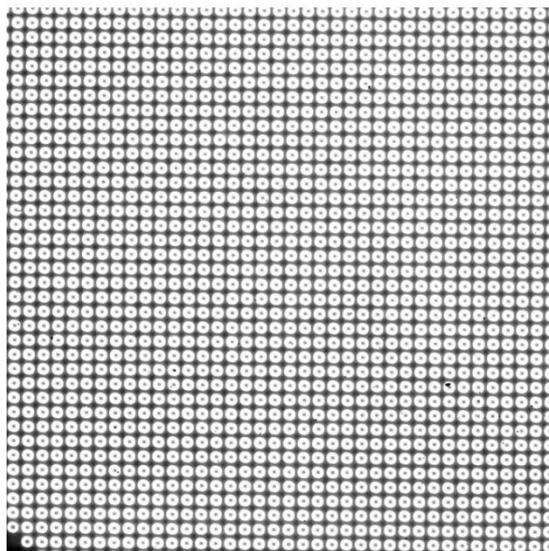
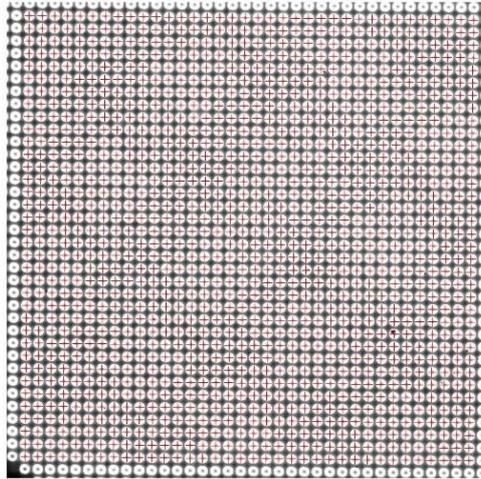


Figura 5.10 Imagen plenóptica de calibración tomada con luz diurna.

Esta imagen es binarizada con un umbral del 90% del nivel de saturación, para favorecer la

extracción correcta de los anillos que forman las imágenes de la pupila, y se entrega a los algoritmos de calibración descritos anteriormente (Capítulo III) en la modalidad de detección “directa”, obteniendo el siguiente resultado (Figura 5.11):

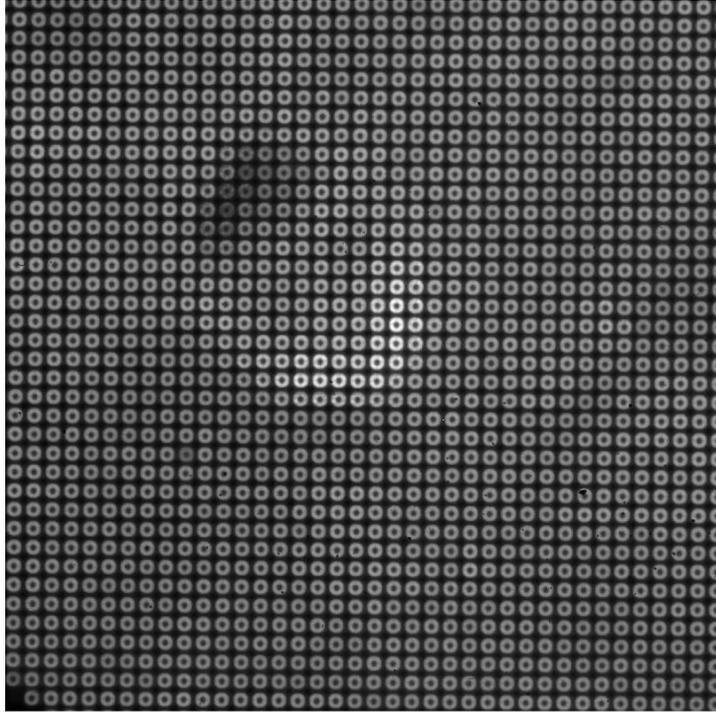


*Figura 5.11 Imagen de calibración una vez identificadas las posiciones de los centros de las microlentes, indicadas mediante cruces de color rojo.*

Donde los centros calculados se han indicado mediante cruces de color rojo superpuestos a la imagen. Se aprecia también que se han obtenido un total de 36x36 imágenes de pupila, ya que el algoritmo automático de reconocimiento descarta las líneas de los bordes ante el riesgo de que estén incompletas. El pitch calculado resulta de 54,2 píxeles.

### **5.3.2 Objetos extensos.**

Una vez realizada la calibración, la obtención de la fase en pupila comienza por la reconstrucción de las imágenes correspondientes a las diversas zonas de la pupila, mediante la adecuada selección de los píxeles correspondientes y la reordenación de los mismos. Consideremos como imagen plenóptica de partida, por ejemplo, al siguiente cráter de la Luna (Figura 5.12):



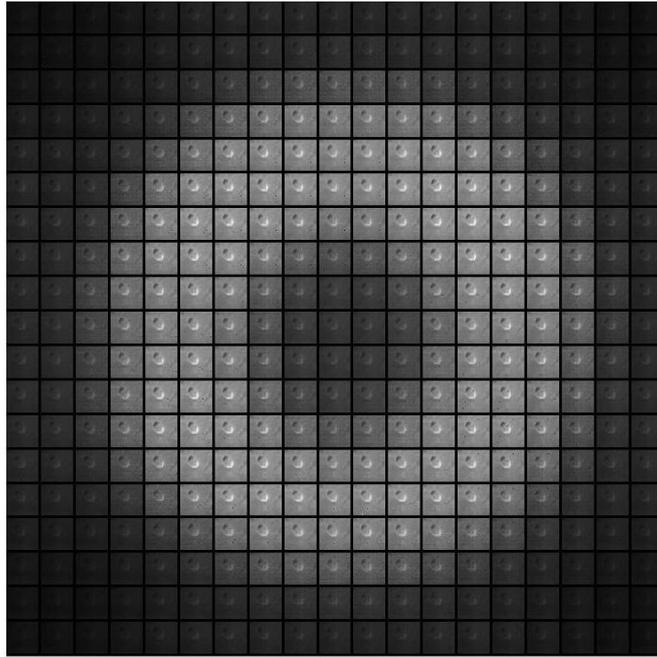
*Figura 5.12 Imagen plenótica de un cráter de la superficie de la Luna*

Si formamos la imagen eligiendo en cada imagen de pupila el píxel que tiene la misma posición relativa y los reunimos todos, tendremos por ejemplo la imagen de la Figura 5.13, para una posición relativa en la pupila de  $s_x=0,5$ ,  $s_y=0,5$ , con arreglo al sistema de coordenadas previamente establecido:



*Figura 5.13 Ejemplo de imagen recompuesta de baja resolución.*

También podemos reunir en una misma imagen (Figura 5.14) todas que se resultarían de la extracción de –por ejemplo- 19 muestras equiespaciadas a lo largo y ancho de la pupila, cada una ubicada en su posición relativa en la pupila:

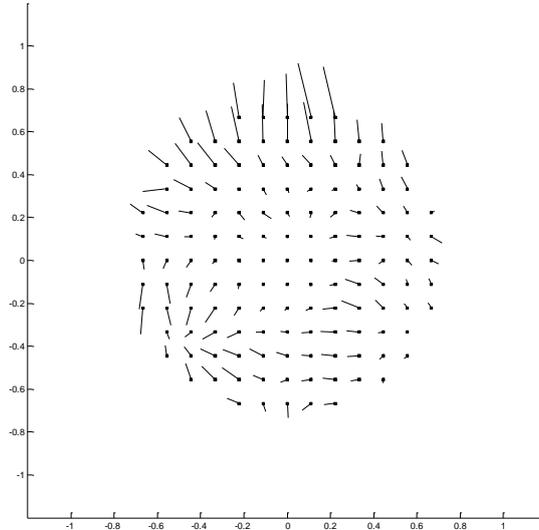


*Figura 5.14 Imagen recompuesta con 19x19 muestras de pupila, en la se ha ubicado cada imagen en la zona de la pupila a la que corresponde.*

Esta imagen contiene la información de fase que estamos persiguiendo en la forma de pequeños desplazamientos verticales y horizontales entre las diversas imágenes correspondientes a las zonas de la pupila, los cuales no existirían si el frente de onda fuera perfectamente plano.

Para el cálculo de estos desplazamientos, que serán proporcionales a las pendientes del frente de onda en estos puntos, utilizaremos las mismas técnicas de correlación que se describieron en el capítulo IV de esta Tesis, tomando como referencia a la imagen central, por ejemplo. Esta referencia podría ser discutible en la medida en la que la parte central de la pupila debería corresponder al oscurecimiento central, y por lo tanto no tener información ninguna (de hecho debería estar completamente oscura en un caso ideal). Sin embargo el efecto comentado de emborronamiento de la imagen de pupila, que se origina por el pequeño tamaño de las microlentes, conduce a que efectivamente exista una cierta información que es promedio de todas las adyacentes, y que por lo tanto puede usarse como referencia. Lógicamente, podría tomarse también como referencia la imagen de cualquier punto de la pupila, o incluso un promedio de ellas.

Al igual que se hizo para el caso de las pruebas en el laboratorio, el resultado se puede visualizar en la siguiente figura, donde se muestran los gradientes correspondientes a la imagen plenóptica anterior:

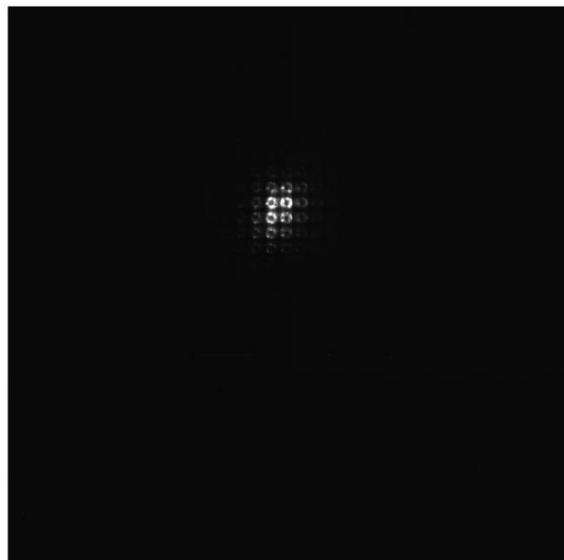


*Figura 5.15 Gradientes obtenidos mediante análisis de los desplazamientos de cada una de las imágenes recompuestas respecto a la imagen central, que se usa como referencia.*

En ella se han representado los puntos de pupila hasta el 74% de la misma, con una escala para los gradientes en la que una longitud equivalente a la distancia entre muestras corresponde a un desplazamiento de 0.3 píxeles.

### **5.3.3 Objetos puntuales.**

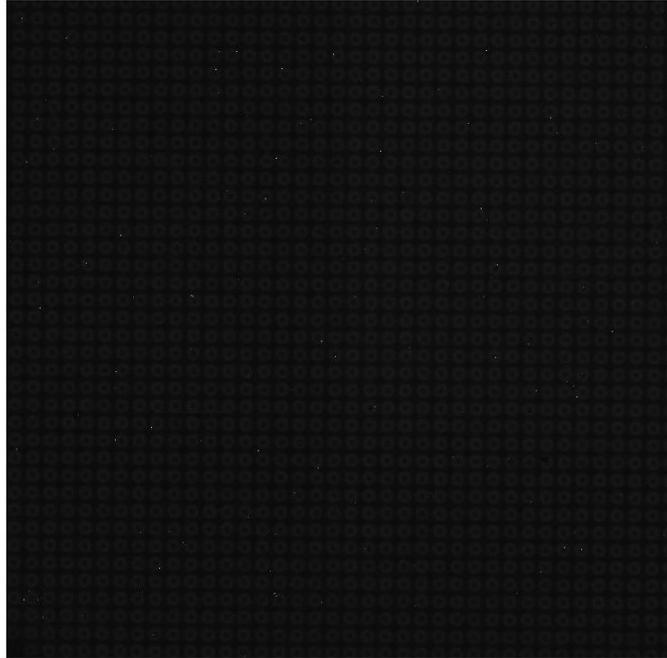
En el caso de objetos puntuales, tales como estrellas, el procesado es semejante al utilizado para objetos extensos. En este caso la imagen plenóptica de partida sería por ejemplo la mostrada en la Figura 5.16:



*Figura 5.16 Imagen plenóptica de partida para un objeto puntual.*

Una primera corrección extremadamente conveniente, que en el caso de los objetos extensos no es tan necesaria, consiste en compensar el efecto de los píxeles calientes de la cámara, los cuales son muchos al no tratarse de una cámara científica. Para ello tomamos una imagen de

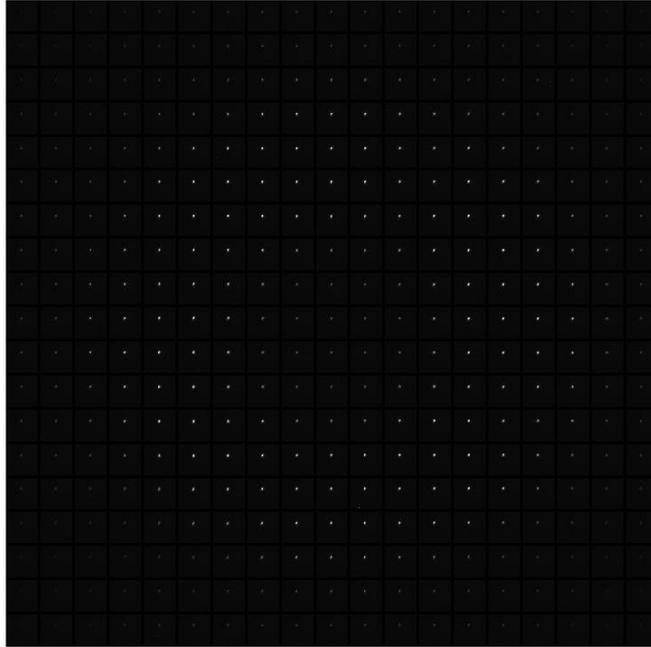
oscuridad (Figura 5.17), con tiempo de exposición elevado, y sacamos una lista de los píxeles que tienen un nivel muy superior al modal.



*Figura 5.17 Imagen de oscuridad y muy larga exposición, utilizada para identificar la lista de los píxeles calientes o con respuesta anormalmente elevada.*

Una vez extraída la lista de píxeles problemáticos, se pueden tratar de múltiples formas, tales como sustituirlos por combinaciones lineales de los adyacentes, sacarlos simplemente de los cálculos, o ecualizar la imagen con los valores obtenidos. Se ha optado por la primera de las opciones de cara a la corrección de píxeles calientes.

Seguidamente utilizamos la misma calibración que en el caso de objetos extensos, y obtenemos la imagen reconstruida con el conjunto de las imágenes correspondientes a las diferentes zonas de la pupila, con el resultado que se indica en la Figura 5.18:



*Figura 5.18 Conjunto de imágenes reconstituidas de un objeto puntual, asociadas a una matriz de 19x19 muestras en pupila.*

En este caso el cálculo de las pendientes en ambos ejes se realiza también a partir de los desplazamientos, pero los determinamos utilizando el centro de gravedad de la imagen en lugar de la correlación. Al objeto de suprimir el mayor número posible de contribuciones engañosas al cálculo, se utiliza un umbral previo a la determinación del centro de gravedad, para suprimir el ruido de fondo de la cámara así como los niveles de oscuridad y polarización (“Bias”), calculado como el valor medio de los píxeles del marco de la subimagen más tres veces la desviación típica de dicho conjunto. El resultado de esta estimación se puede visualizar en la Figura 5.19, en la que se muestra como línea horizontal de color rojo el nivel de umbral utilizado para binarizar la imagen. También se ha aumentado la escala vertical adecuadamente para conseguir una visualización adecuada:

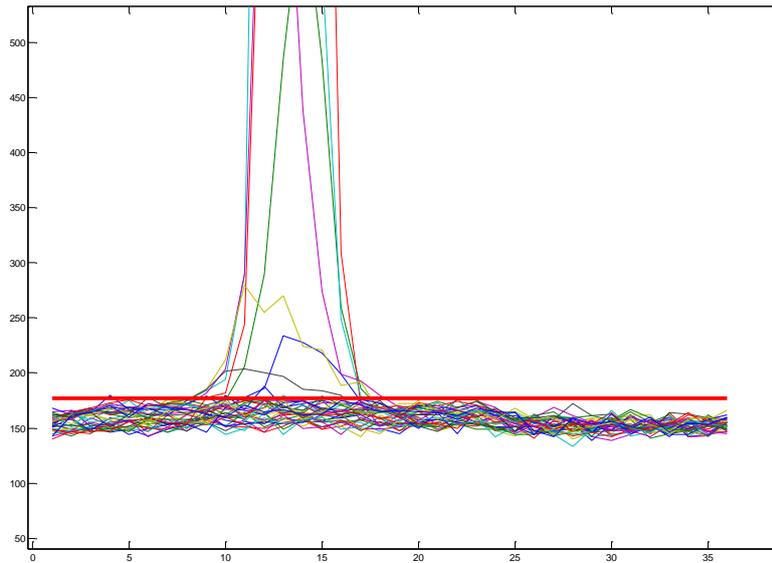


Figura 5.19 Proyección lateral y umbral utilizado para suprimir los niveles de oscuridad y polarización ("Bias"), de cara a la correcta ubicación del centro de gravedad.

Una vez calculados todos los desplazamientos, usando una vez más el central como referencia, obtenemos el mapa de gradientes en pupila:

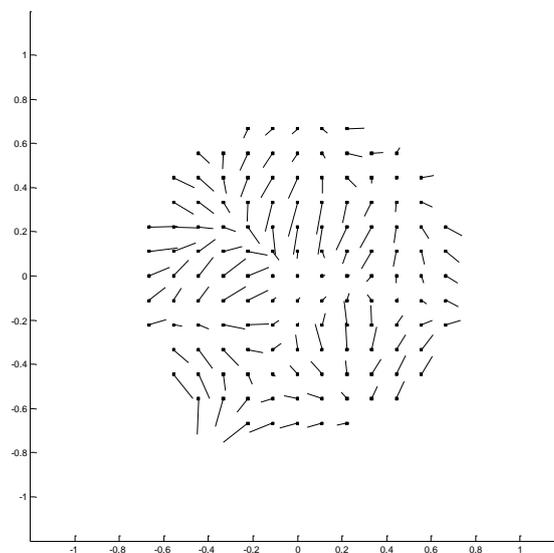


Figura 5.20 Gradientes medidos a partir de los desplazamientos de cada uno de los centros de gravedad con respecto a la posición central, usada como referencia.

Se adjunta el siguiente enlace a una película obtenida con la reunión de un conjunto de 1000 imágenes plenópticas cuyos gradientes fueron extraídos individualmente, al objeto de visualizar la evolución del frente de onda debido a la turbulencia. (<http://youtu.be/z19B5CIR0sw>) También se adjunta en la Figura 5.21 el código QR para acceder opcionalmente a dicho vídeo mediante un Smartphone.



Figura 5.21 Código QR para acceder a la película de los gradientes recuperados de una sesión de observación de Vega.

### 5.3.4 Recuperación de la fase a partir de los gradientes.

Existen muchos métodos en la literatura para la recuperación del frente de onda en fase a partir de los gradientes del mismo. En este caso se ha optado por utilizar una expansión en polinomios de exponenciales complejas (Freischlad & Koliopoulos, 1986)

$$\phi(u, v) = \sum_{p,q=0}^{N-1} a_{pq} Z_{pq}(u, v) = \sum_{p,q=0}^{N-1} a_{pq} \frac{1}{N} e^{\frac{2\pi i}{N}(pu+qv)} = FFT^{-1}(a_{pq})$$

Los gradientes pueden escribirse como:

$$\vec{S}(u, v) = \vec{\nabla}\phi(u, v) = \frac{\partial\phi}{\partial u}\vec{i} + \frac{\partial\phi}{\partial v}\vec{j} = \sum_{pq} a_{pq} \vec{\nabla}Z_{pq}$$

Y calcularse mediante ajuste por mínimos cuadrados mediante la función:

$$F = \sum_{u,v=1}^N \left[ \vec{S}(u, v) - \sum_{p,q} a_{pq} \left( \frac{\partial Z_{pq}}{\partial u} \vec{i} + \frac{\partial Z_{pq}}{\partial v} \vec{j} \right) \right]^2$$

Donde el array  $\vec{S}$  son los datos experimentales hallados. En ese caso, los coeficientes  $a_{pq}$  del desarrollo en exponenciales complejas, de lo que sería un reconstructor modal de Fourier, pueden calcularse como:

$$a_{pq} = \frac{i \cdot p \cdot FFT[S^x(u, v)] + i \cdot q \cdot FFT[S^y(u, v)]}{p^2 + q^2}$$

Y, finalmente, los valores de fase pueden recuperarse de los coeficientes del desarrollo mediante anti-transformada de Fourier:

$$\phi(u, v) = FFT^{-1}(a_{pq})$$

Todo ello permite que un sencillo filtro, compuesto por tres transformadas de Fourier, sea suficiente para recuperar la fase a partir de los gradientes medidos. La situación real es un poco más complicada, porque la existencia de un oscurecimiento central introduce irregularidades en las frecuencias espaciales altas, lo que se resuelve mediante un cierto número, normalmente pequeño, de iteraciones de Gerchberg-Saxton (Gerchberg & Saxton, 1972).

La figura siguiente muestra un ejemplo de resultado de la recuperación, obtenido para el caso de objeto puntual antes mencionado:

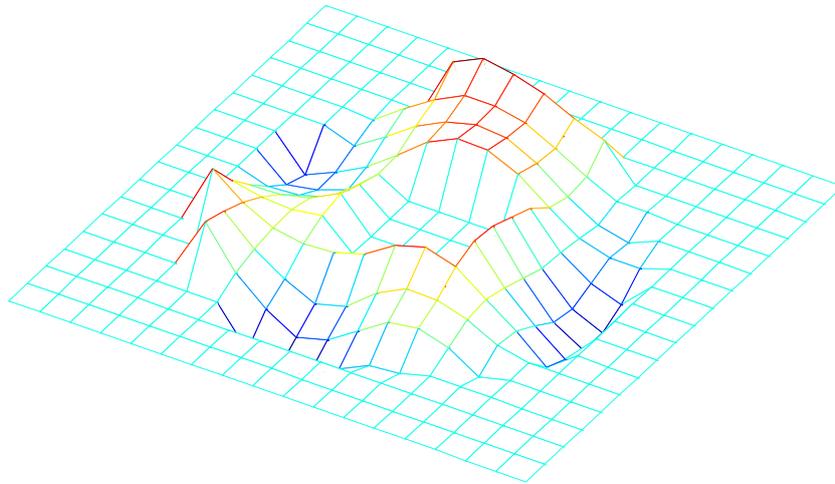


Figura 5.22 Representación gráfica tridimensional del frente de onda medido, tras la recuperación realizada mediante expansión en polinomios de exponenciales complejas.

### 5.3.5 Medida cuantitativa de la fase frente de onda

Vamos a resumir en este apartado un razonamiento simple y extremadamente visual que permita relacionar de forma cuantitativa la fase del frente onda en pupila con las medidas realizadas por la Cámara Plenóptica, utilizando el procesado descrito.

La Figura 5.23 muestra gráficamente cuál sería el proceso de construcción de la imagen correspondiente a un punto cualquiera de la apertura P.

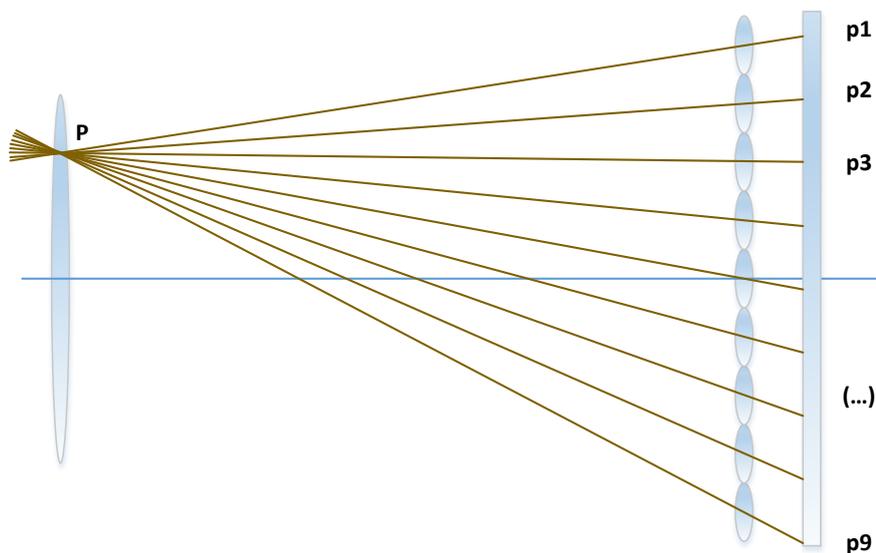


Figura 5.23 Trazado de rayos indicativo de la formación de imagen correspondiente al punto de pupila identificado como P, a través del conjunto de microlentes.

Se han representado únicamente nueve microlentes en una única dimensión, habiendo trazado el rayo principal que pasa por el centro de cada una de las microlentes y por el punto P, que será

el que determine el píxel del detector en el que se genera la imagen del punto de la apertura en cuestión. Tendremos entonces el conjunto  $(p_1...p_9)$  de píxeles que formarán la imagen (unidimensional en la figura) del objeto visto a través de la zona de la apertura  $P$ .

Podemos suponer un caso simple en el que una estrella ilumina únicamente tres de esos píxeles, generando una imagen reconstruida de la forma indicada en la Figura 5.24:

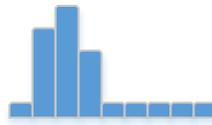


Figura 5.24 Resultado conceptual reconstrucción de la imagen correspondiente al punto  $P$ , limitada a una dimensión.

Supongamos ahora que la pendiente de la fase asociada al punto  $P$  produjera en la imagen un desplazamiento de UN píxel en la imagen reconstruida, éste tendría que ser el resultado de un desplazamiento de UNA microlente completa en la Cámara Plenótica (Figura 5.25):

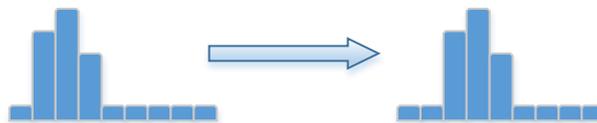


Figura 5.25 Imagen original (izq.) y desplazada un pixel (der.) a consecuencia de la pendiente del frente de onda asociada al punto  $P$ .

Es decir, que la luz que acababa llegando a la microlente  $p_2$  ahora está en la  $p_3$ , y así sucesivamente con las demás. Esta situación la podemos representar sobre el esquema anterior de la formación de la imagen plenótica de la forma descrita en la Figura 5.26:

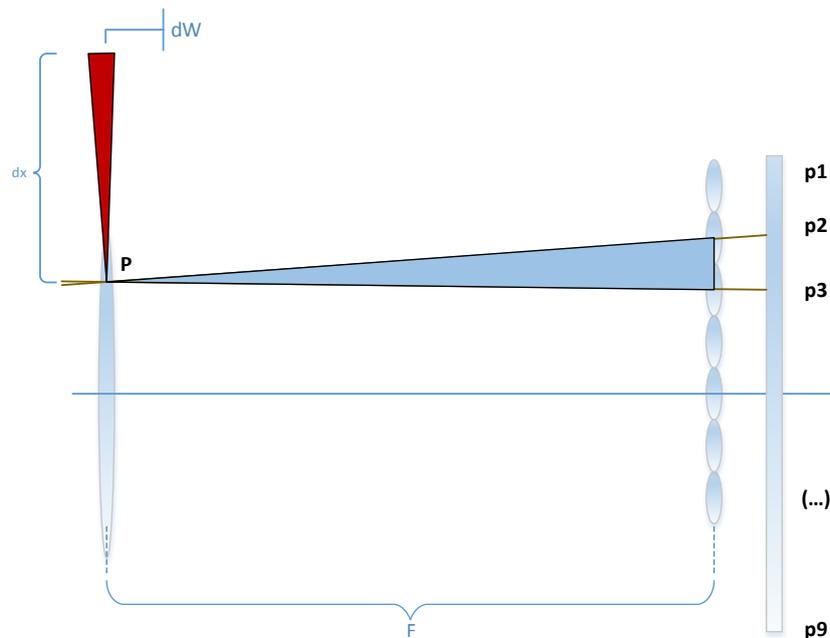


Figura 5.26 Esquema conceptual descriptivo de un desplazamiento de valor 1 pixel en la imagen reconstituida, generado por una pendiente determinada del frente de onda en el punto  $P$ .

En la que se esquematiza cómo el rayo principal que antes atravesaba el centro de la microlente 2, por efecto de la pendiente del frente de onda en el punto P de la pupila, ahora pasa por el centro de la microlente 3. En esta situación, que representa un desplazamiento de un píxel exacto en la imagen recompuesta, planteando que los triángulos azul y rojo son semejantes, podremos obtener una expresión directa para la pendiente en el punto P:

$$\frac{dW}{dx} = d/F$$

Donde “d” es el diámetro de la microlente y F la focal del sistema de imagen, medidos ambos en metros, por ejemplo. Por extensión, para el caso de que se obtengan otros desplazamientos, mientras los midamos en unidades de píxel en la imagen recompuesta, tendremos:

$$\frac{dW}{ds} = \Delta p \cdot d/F$$

Donde  $\Delta p$  es el mencionado desplazamiento entre la imagen de referencia y la correspondiente al punto de la pupila en cuestión, y  $s$  es la coordenada del plano pupila que corresponda (horizontal o vertical).

Para el caso concreto del montaje que se utilizó en las pruebas de telescopio, que incluía el sistema de reimaginación para adaptación de las focales descrito anteriormente, con lentes de focales  $f_1$  y  $f_2$ , la expresión de la pendiente será:

$$\frac{dW}{ds} = \Delta p \frac{f_1}{F} \frac{d}{f_2}$$

Así pues, en nuestro caso de microlentes de 400 micras, focal de telescopio de 38.95 metros, y pareja de lentes remaginadoras de 150 y 300 mm, tenemos que un desplazamiento de 1 píxel en la imagen recompuesta corresponde a una pendiente de 5,13 microrradiares, equivalente a 1,06 segundos de arco, que es también el ángulo que una microlente subtende en el cielo.

## 5.4 Verificación de la respuesta a la variación del foco del telescopio.

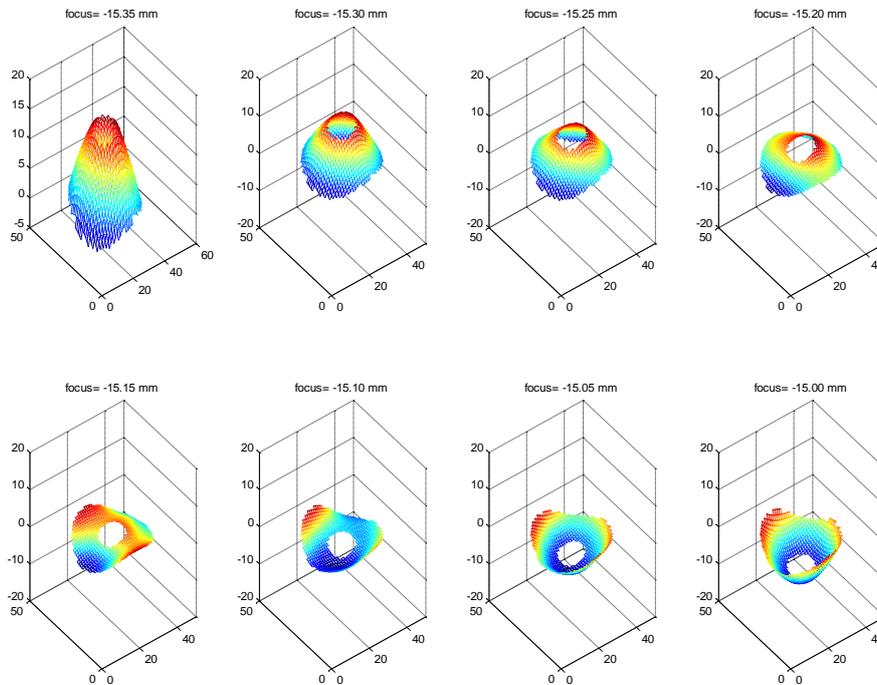
Una verificación inicial relativamente simple pero muy ilustrativa se ha realizado mediante la actuación del foco del telescopio, en las diversas observaciones realizadas, cuyo procedimiento y resultados se describen a continuación.

Como la mayoría de telescopios, la OGS posee un mecanismo controlado remotamente que permite desplazar con precisión la posición física del espejo secundario en el conjunto del sistema óptico, en un rango de algunos milímetros, lo que permite obtener manualmente un enfoque óptimo en el instrumento que se pretenda utilizar. Este mecanismo se ha utilizado en este caso para provocar diversos niveles de aberración esférica, los cuales se han medido con nuestra cámara plenóptica como sensor de frente de onda.

Sobre una estrella brillante, concretamente Arturo, se tomaron ocho cubos de 1000 imágenes cada uno, con un tiempo de integración de 11,8 ms, haciendo un recorrido de foco desde -15.00

mm hasta -15.35 mm, según era indicado por el propio sistema de control del telescopio.

Una vez adquiridos, cada uno de los cubos fueron procesados para obtener el frente de onda de cada una de las imágenes, para calcular finalmente el frente de onda promedio al objeto de suprimir el efecto de la turbulencia atmosférica. Los resultados se muestran en la Figura 5.27, ordenados según el valor de foco utilizado:



*Figura 5.27 Conjuntos de frentes de onda recuperados con la Cámara Plenóptica, una vez promediada la turbulencia atmosférica, para ocho posiciones del foco del telescopio en torno al foco óptico.*

Se aprecia claramente el efecto de la aberración esférica en uno y otro sentido respecto de una posición óptica intermedia de máxima planicidad, que estaría ubicada indudablemente entre las posiciones de foco -15,20 y -15,10 mm.

## 5.5 Estadísticas de la función de estructura.

El segundo método utilizado para verificar la viabilidad de la medida de fases de frente de onda con la Cámara Plenóptica, está basado en el análisis de las estadísticas esperables de la misma con arreglo a los modelos aceptados en la literatura. Concretamente se ha analizado el comportamiento de la función de estructura, que debe tener un comportamiento exponencial bastante particular, el cual fue hallado con gran aproximación una vez contabilizado el efecto de emborronamiento consecuencia de la utilización de microlentes.

### 5.5.1 La función de estructura de la fase del frente de onda con turbulencia atmosférica.

El efecto de la turbulencia atmosférica en la propagación de la luz se modela frecuentemente en la literatura siguiendo el paradigma propuesto por Kolmogorov en 1941 (conocido como K41)

(Kolmogorov, 1941) y ampliado por Von Kármán (Kármán, 1948) con la introducción de unas escalas interna y externa que perfeccionan el modelo en frecuencias espaciales altas y bajas respectivamente. Estos modelos trabajan con las funciones de estructura de segundo orden de los parámetros de interés, en nuestro caso de la fase  $\phi(\vec{r})$ , definida como:

$$D_{\phi}(\vec{\rho}) = \langle |\phi(\vec{r} + \vec{\rho}) - \phi(\vec{r})|^2 \rangle$$

Es decir, como un promedio general (“Ensemble average”) de todas las realizaciones, tanto espaciales como temporales, de las diferencias de fase al cuadrado en función de la distancia entre las muestras  $\vec{\rho}$ .

Puede demostrarse (Hardy J. W., 1998) que dentro del rango inercial de la turbulencia, en el cual el medio de propagación se puede considerar “no compresible”, que corresponde al intervalo comprendido entre la escala interna y la escala externa, la función de estructura de la fase se comporta de la forma:

$$D_{\phi}(\rho) = 6.88 \cdot (\rho/r_0)^{5/3}$$

Siendo  $r_0$  el conocido parámetro de Fried, de dimensiones de longitud, generalmente centímetros, que permite reunir en un único parámetro un gran número de características de la turbulencia atmosférica, y que corresponde esencialmente con el diámetro de un área circular en la que el valor RMS de la fase del frente de onda es igual a 1 radián.

La peculiaridad de esta expresión, que explotaremos en la presente verificación, consiste en que una representación de la función de estructura de la fase (respecto a la distancia), en una gráfica doblemente logarítmica, deberá tener necesariamente la pendiente 5/3, es decir 1.666, independientemente del valor de  $r_0$ , es decir, independientemente de cómo haya sido la turbulencia concreta en el momento de la observación. Buscaremos por lo tanto esa pendiente como comprobación de que las medidas que estamos haciendo son correctas.

### 5.5.2 Modelado del efecto del emborronamiento.

Se ha podido constatar que el efecto descrito de emborronamiento en la medida de las fases debido al pequeño tamaño de las microlentes tiene una consecuencia apreciable en el comportamiento de la función de estructura, especialmente a distancias cortas, como por otra parte cabía esperar.

Se presentan seguidamente el procedimiento y los resultados de simular el efecto del emborronamiento en fases con estadística de Kolmogorov. Se ha modelado dicho efecto mediante la convolución del mapa de fases original con la PSF (Point Spread Function, función de respuesta puntual) correspondiente a una microlente, que al tener formato cuadrado tendrá la expresión:

$$h(x, y) \propto \left[ \text{sinc} \left( \frac{wx}{\lambda f} \right) \right]^2 \cdot \left[ \text{sinc} \left( \frac{wy}{\lambda f} \right) \right]^2$$

Donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas espaciales,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $f$  es la distancia focal,  $w$  es el ancho de las microlentes, y se ha denominado “sinc” a la función  $\text{sen}(x)/x$ , como es

habitual.

Esta PSF tendrá un ancho a altura mitad (FWHM) de:

$$FWHM = 0.886 \frac{\lambda f}{w}$$

Como conjunto de referencia de fases con estadística de Kolmogorov se utilizó el conjunto disponible en el simulador IACAT, desarrollado por el IAC mediante subcontratación al objeto de disponer de un sistema óptico capaz de simular una variedad de telescopios y atmósferas para la verificación de sistemas de óptica adaptativa. Se trata de un conjunto de placas de fase cuyos parámetros  $r_0$  varían desde 0.38 mm hasta 3.24 mm, muestreados a 0,0008 pulgadas (0,02032 mm).

Este conjunto de ejemplos de fases fueron convolucionados con una variedad de PSFs de microlentes cuyo ancho a altura mitad se fue variando desde 0 muestras, lo que correspondería a una Delta de Dirac hasta un máximo de 10 muestras, al objeto de simular el efecto de una variedad de tamaños de microlentes. En la medida en la que los cubos de imágenes adquiridos en las observaciones contienen aproximadamente 1000 imágenes cada uno, de –por ejemplo- 47x47 muestras, se simuló la generación de dichos cubos mediante la selección aleatoria de subimágenes de esa dimensión a partir de las fases resultantes de la convolución, de forma que pudieran utilizarse exactamente los mismos programas de cálculo de la función de estructura de fase.

En el cálculo de la función de estructura se utilizó una máscara anular para simular la apertura habitual del telescopio, que posee un oscurecimiento central ya comentado, y también para descartar las muestras cercanas al extremo que estarán contaminadas por las microlentes adyacentes. Con las muestras restantes se realizó el cálculo de todas las distancias posibles entre muestras, y se promediaron todas las diferencias de fase correspondientes a cada distancia para obtener la función de estructura de cada frente de onda. Finalmente, se promediaron todos los frentes de onda correspondientes a cada cubo de imágenes para así obtener adecuadamente un promedio general en tiempo y en espacio.

La Figura 5.28 muestra cuál es el efecto de la presencia de las microlentes en la pendiente de la función de estructura de la fase, simulado según se ha indicado y representado para distancias entre 1 y 40 muestras, para el caso de una fase con parámetro  $r_0=0,38$  mm.

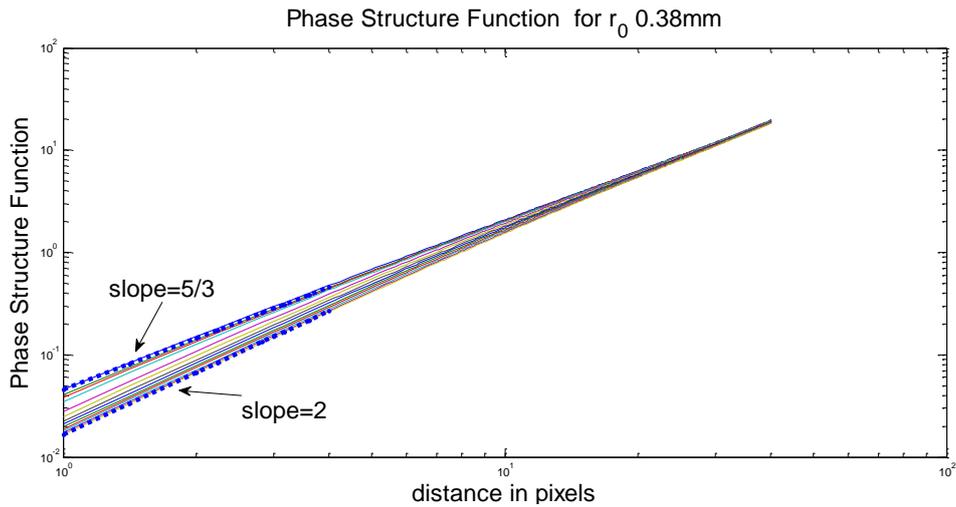


Figura 5.28 Simulación del efecto en la función de estructura de la fase para diversos tamaños de microlente. La pendiente cambia desde 5/3 a 2 según disminuye el tamaño de la misma.

Puede observarse que, tal y como cabe esperar, no hay efecto significativo a grandes distancias, debido a que el emborronamiento queda limitado al tamaño del kernel de convolución (PSF). Sin embargo a distancias cortas la pendiente evoluciona desde el valor 1.666 (5/3) esperable según el modelo de Kolmogorov hasta el valor 2, al que se aproxima asintóticamente cuando aumenta el ancho del kernel, es decir, según disminuye el tamaño de las microlentes.

Para estudiar con mayor detalle el efecto a distancias cortas, se utilizó una técnica diferente y mucho más eficiente que permite contabilizar todas y cada una de las 17 primeras distancias, lo que se consigue construyendo  $\phi(\vec{r} + \vec{\rho})$  mediante un desplazamiento de cinco muestras a ambos lados de la posición de referencia y en ambos ejes cartesianos, dejando por lo tanto un marco de 5 muestras como margen en donde no se realiza el cálculo. Con estas suposiciones se calcula la expresión:

$$D_{\phi}(\vec{\rho}) = \langle |\phi(\vec{r} + \vec{\rho})|^2 \rangle + \langle |\phi(\vec{r})|^2 \rangle - \langle 2\phi(\vec{r} + \vec{\rho})\phi(\vec{r}) \rangle$$

Para cada una de los desplazamientos aludidos y se reúnen los resultados agrupándolos por distancias. Esto permite obtener con elevada precisión el cálculo de la pendiente en el origen, que se representa en la figura siguiente:

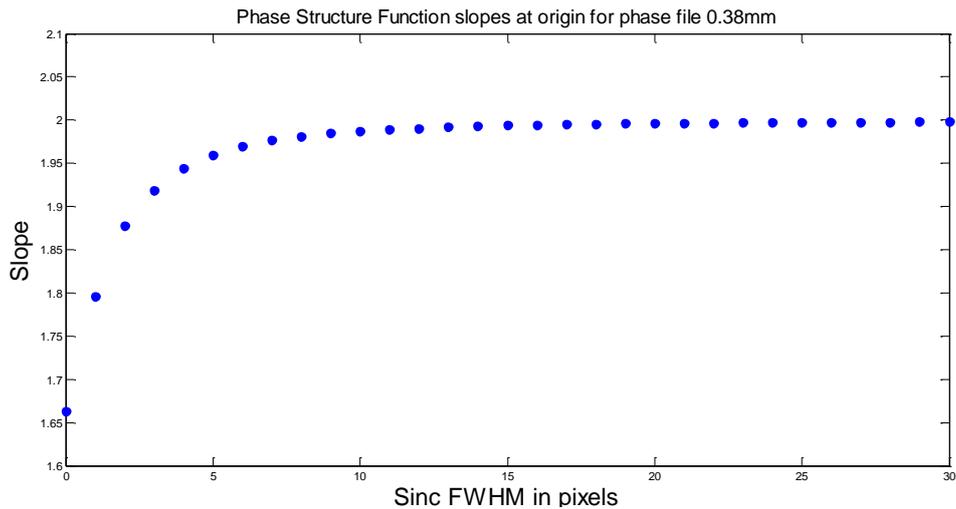


Figura 5.29 Valores de la pendiente de la función de estructura para distancias muy cortas, en función del ancho a altura mitad del kernel de convolución con el que se ha simulado el emborronamiento causado por las microlentes.

Donde puede apreciarse claramente la evolución de la pendiente en el origen desde el valor 5/3 hasta el valor 2, según se incrementa el ancho del kernel de convolución que es la PSF de las microlentes.

### 5.5.3 Comparación con los datos obtenidos en telescopio

Para verificar el comportamiento de la función estructura de la fase del frente de onda, medido en telescopio con la Cámara Plenóptica, se ha procedido de la siguiente forma: sobre las medidas realizadas en diferentes configuraciones de foco, cinco cubos de mil imágenes cada uno, se calcularon los frentes de onda individuales y sobre ellos la función de estructura de la fase. Se restó en cada caso el frente de onda promedio para limitar el análisis a la fase debida a la turbulencia atmosférica, y no a la generada por la desviación de foco.

Se presenta en la Figura 5.29 el resultado de calcular las funciones de estructura para cada uno de los cubos, donde también se ha indicado en trazo azul lo que sería una función de estructura con pendiente 5/3, que es la que tendría una turbulencia de Kolmogorov sin filtrado espacial alguno.

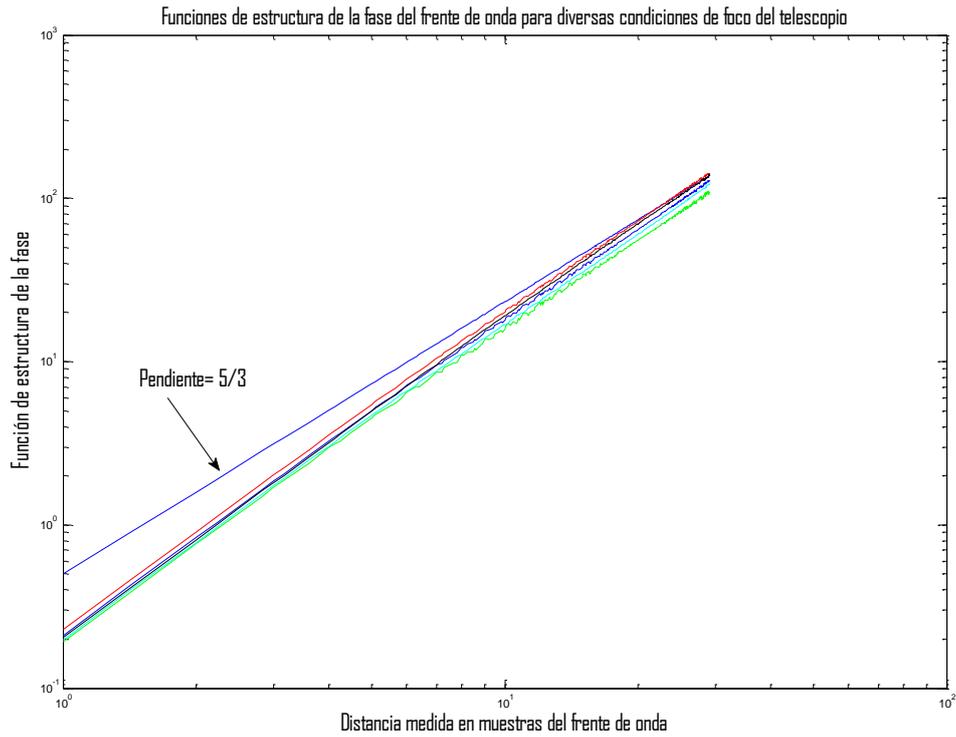


Figura 5.30 Funciones de estructura de la fase en diversas condiciones de foco, tras descontar el efecto del mismo y considerar únicamente la turbulencia atmosférica. Se muestra la pendiente 5/3 de referencia.

Una vez calculadas las funciones de estructura, se realizó un ajuste cuadrático sobre las primeras veinte distancias, las más cortas -que corresponden desde 1 hasta 6 muestras-, para extraer la pendiente en el origen en cada uno de los casos. Finalmente las pendientes fueron promediadas obteniendo un resultado medio de pendiente de valor 1.933, tal y como se muestra en la Figura 5.31:

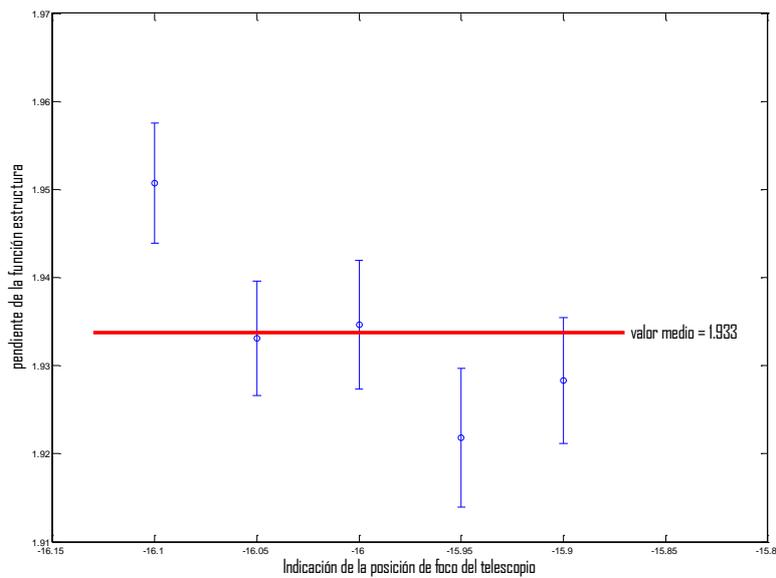


Figura 5.31 Valor medio y desviación de la pendiente de la función de estructura de la fase, para distancias pequeñas, en las diversas posiciones de foco del telescopio.

Por otro lado, si calculamos el ancho a altura mitad esperado para el caso particular que nos ocupa, considerando la longitud de onda promedio de 550 nm, y las microlentes de 400 micras y 25 mm de focal, el ancho a altura mitad del kernel de convolución sería de 30,46 micras. Esta cantidad debe convertirse a muestras de fase en pupila en el montaje utilizado, sabiendo que se tomaron 47 muestras a lo largo y ancho de la pupila, y que –según los datos de la calibración– ésta se extendía en 54,098 píxeles de 7,4 micras cada uno. Con todo ello, el ancho a altura mitad medido en muestras de pupila sería de:

$$FWHM = \frac{30.56 \cdot 47}{54.098 \cdot 7.4} = 3.58$$

Con esta cifra de ancho a altura mitad podemos acudir a la figura antes obtenida (Figura 5.29) que relaciona la pendiente esperable de la función de estructura con el ancho de la PSF de las microlentes, obteniendo un acuerdo inmejorable entre las cifras observadas y las esperadas (Figura 5.32):

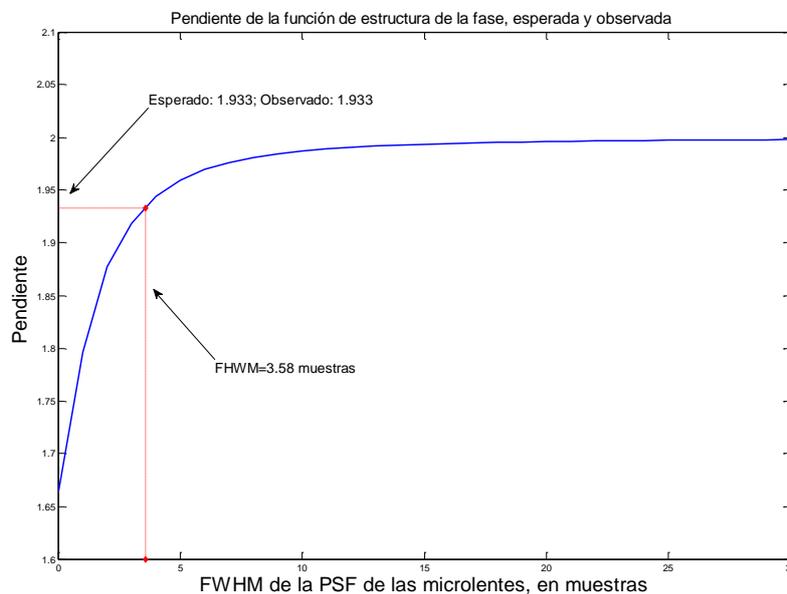


Figura 5.32 Cálculo gráfico de la pendiente esperada para el caso de un ancho a altura mitad del kernel de convolución de 3,58 muestras, mostrando total coincidencia con el observado.

Con lo que queda comprobado que la medida de fases con la Cámara Plenóptica arroja una función de estructura con una pendiente exactamente igual a la esperable en una turbulencia de Kolmogorov, una vez corregido el efecto de emborronamiento debido a la pequeña dimensión de las microlentes, lo que contribuye a demostrar la viabilidad de la medida de fases de frente de onda con este sensor.

## 5.6 Comparación sincronizada con sensor de Shack-Hartmann.

Al objeto de suprimir cualquier género de duda que pudiera quedar sobre la viabilidad de realizar sensado de frentes de onda con la Cámara Plenóptica, se realizó un montaje simultáneo que permitiera comparar los resultados con el método más conocido y utilizado en la literatura

para el sensado de frentes de onda: el sensor Shack-Hartmann. A tal efecto, se modificó levemente el montaje óptico utilizado añadiendo una segunda cámara y un segundo array de microlentes, pero esta vez colocando éste en la posición en la que la lente colimadora hace una imagen de la pupila del telescopio:

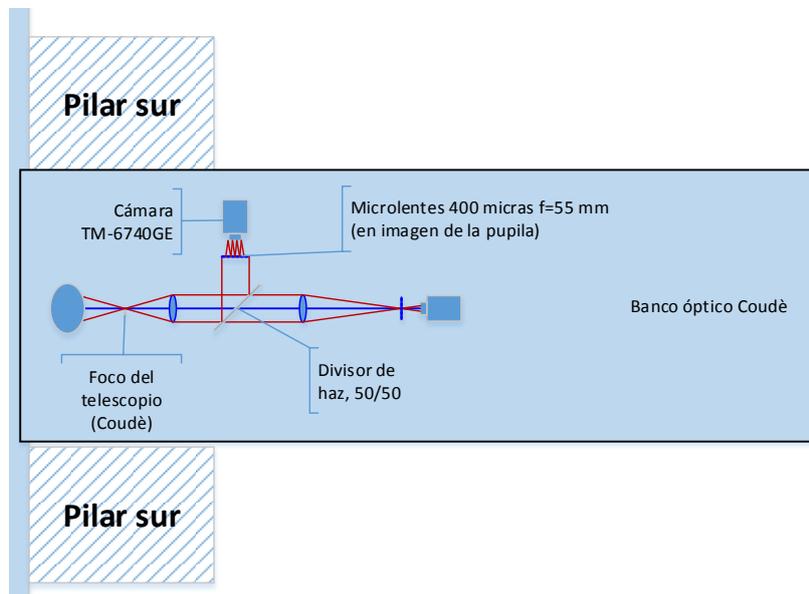
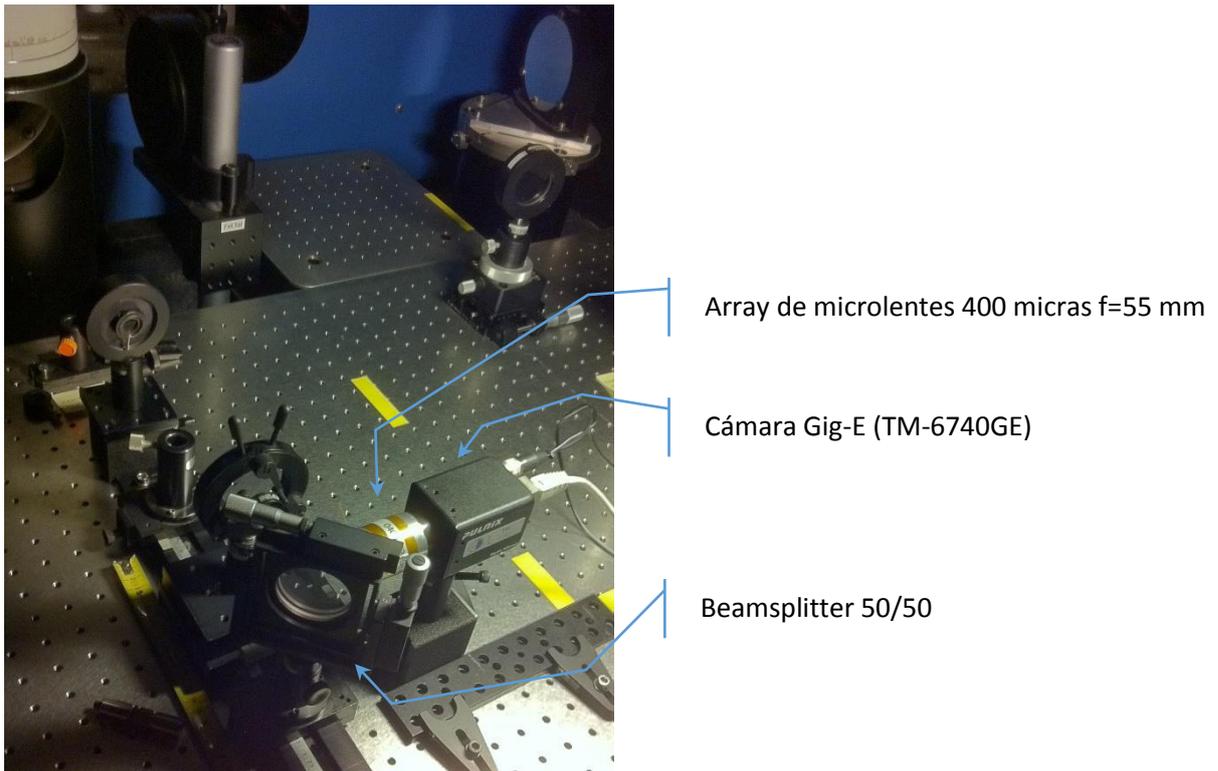


Figura 5.33 Diagrama del montaje óptico utilizado para comparación simultánea de la Cámara Plenóptica con un sensor Shack-Hartmann.

La Figura 5.33 muestra la utilización de un divisor de haz (50%/50%) que reparte la luz incidente entre ambas ramas del montaje óptico, la ubicación del segundo array de microlentes del que se disponía, con 55mm de focal y 400 micras de pitch, el cual se montó acoplado directamente a la cámara mediante un barrilete con rosca "C".

Se adjunta también seguidamente una imagen (Figura 5.34) que muestra el detalle del montaje del sensor de Shack-Hartmann utilizado, en la que se han señalado los componentes del mismo:



*Figura 5.34 Detalle del montaje del sensor Shack-Hartmann simultáneo a la Cámara Plenóptica, con la ayuda de un divisor de haz.*

### 5.6.1 Descripción del montaje electrónico.

Desde el punto de vista electrónico también fue necesario realizar un montaje específicamente diseñado, que permitiera garantizar que ambas cámaras observaran simultáneamente y con exactamente el mismo tiempo de integración, de forma que recibieran esencialmente la misma información.

Este montaje se describe conceptualmente en la Figura 5.35, donde se representan las dos cámaras con sus alimentadores, cuyas salidas giga-ethernet son conducidas hasta un switch al que también se conectan los ordenadores portátiles que se utilizaron para la adquisición de datos, la cual se realizó individualmente para cada cámara al objeto de poder disponer de suficiente capacidad de almacenamiento en disco. Durante las adquisiciones se cuidó de desconectar el acceso global a internet del conjunto, de forma que se maximizara el ancho de banda disponible.

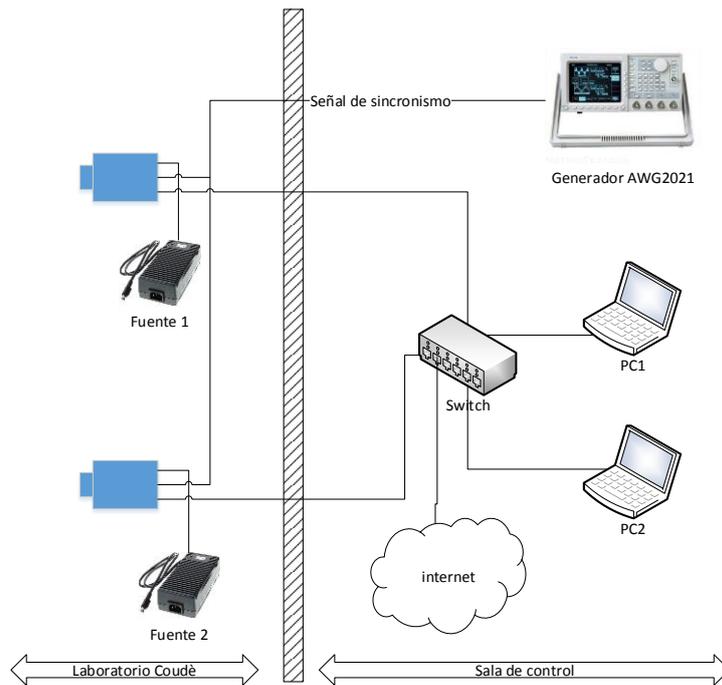


Figura 5.35 Montaje electrónico utilizado para garantizar el funcionamiento simultáneo de los dos sensores, tanto el de nuestra cámara plenóptica como el del sensor S-H.

Mención especial merece la generación de la señal de sincronismo, la cual se obtuvo a partir de un generador de formas de onda arbitrarias fabricado por Tektronix, modelo AWG2021. La señal se configuró con los niveles y la temporización adecuada para la obtención de los tiempos de integración y lectura deseados en cada caso, en incluso se controló el número absoluto de pulsos a generar al objeto de controlar con precisión el número de imágenes generado y almacenado.

Ambas cámaras fueron programadas para aceptar la misma señal de sincronismo y para que respondieran de forma idéntica a lo indicado en la misma, a pesar de que no se trataba de cámaras idénticas, habiéndose comprobado específicamente el hecho de que fueran capaces de adquirir y almacenar imágenes exactamente iguales, por ejemplo, haciendo que ambas registraran el mismo reloj de precisión en un teléfono móvil, tal y como aparece en la siguiente Figura 5.36, resultado de una verificación informal:

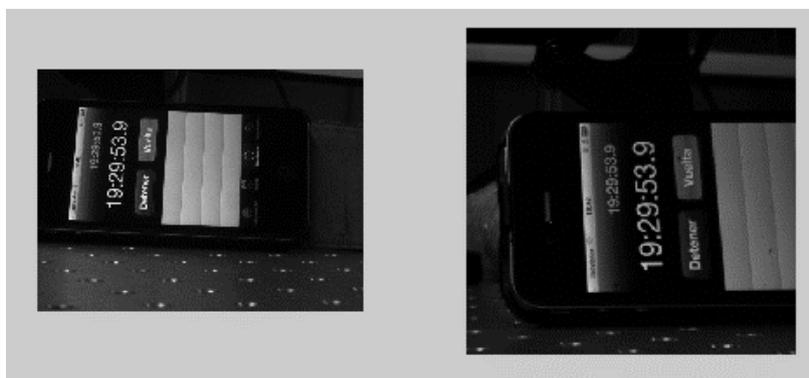


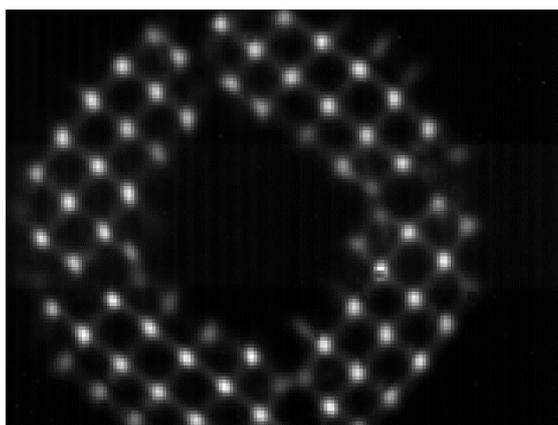
Figura 5.36 Verificación informal del funcionamiento simultáneo de ambas cámaras. Se comprobó que ambas capturaban siempre la misma hora del cronómetro.

Esta figura recoge la última de las imágenes de una secuencia en la que se ha comprobado visualmente que lo indicado por el reloj del teléfono móvil coincide en todos los casos entre las imágenes de ambas cámaras.

## 5.6.2 Procesado

El procesado de las imágenes plenópticas siguió exactamente las mismas pautas ya presentadas anteriormente en la presente Tesis. Sin embargo, se describe seguidamente el procesado realizado sobre el sensor de Shack-Hartmann, así como el método comparativo utilizado para comparar ambos sensores.

Se decidió realizar la comparación basándonos en las pendientes de la fase en pupila calculadas por ambos sensores, ya que el método de reconstrucción de las fases utilizado ha sido el mismo en ambos casos. De esta forma, sobre la imagen acumulada de las mil imágenes en una posición de foco, se eligieron manualmente las posiciones de las microlentes del sensor de Shack-Hartmann a considerar, descartando aquellas que presentaban escasez de relación señal/ruido debido a la presencia de la araña de soporte del secundario, por ejemplo. La Figura 5.37 muestra un ejemplo de la mencionada imagen acumulada:

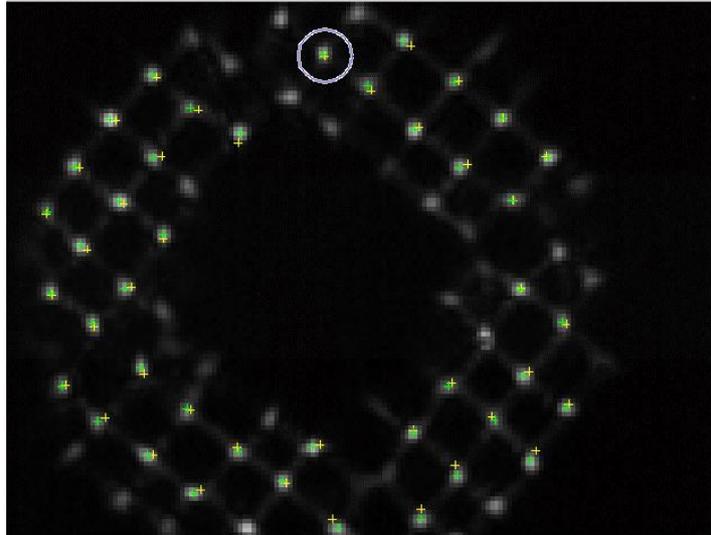


*Figura 5.37 Imagen acumulada del sensor de S-H utilizada para la selección de las microlentes cuyas pendientes comparar.*

Esas posiciones, elegidas para un total de 44 microlentes, son consideradas como “de referencia” debido a que, al ser el resultado de la acumulación a lo largo de un gran periodo de tiempo, podemos considerar que se habrá promediado el efecto de la turbulencia atmosférica. Para determinarlas se calcula el centro de gravedad de cada zona circular elegida, descartando los valores inferiores a un umbral fijado en esta ocasión como el valor medio de todas las muestras de la zona circular, criterio que es especialmente adecuado cuando no hay información válida en los bordes de la zona, o son difíciles de identificar debido a la forma circular de la misma.

Una vez determinadas las posiciones de referencia, todas las imágenes del cubo del Shack-Hartmann son procesadas individualmente para obtener los desplazamientos con respecto a ellas, los cuales identificaremos directamente con las pendientes en cada una de las posiciones de pupila muestreadas.

Así por ejemplo, la Figura 5.38 presenta un ejemplo del resultado de procesar una imagen.



*Figura 5.38 Resultado del procesado de una imagen ejemplo del sensor S-H. Se muestra la zona utilizada para el cálculo del centro de gravedad, las posiciones del mismo (azul) y las de referencia (amarillo).*

En ella que se han representado mediante cruces de color amarillo las posiciones de referencia, y con cruces de color verde los centros de gravedad calculados específicamente para la presente imagen, que conducen a las pendientes locales en cada caso. También se ha representado el tamaño de la zona circular utilizada en los cálculos.

### **5.6.3 Comparación y conclusiones**

De cara a realizar la comparación de los resultados arrojados por ambos sensores, nos encontramos con la dificultad natural de hacer corresponder las medidas realizadas en uno y otro, ya que la construcción de los mismos ha sido independiente y no es viable en general disponer de un registro preciso entre las muestras de uno y de otro, es decir, las posiciones de pupila calculadas en uno y otro sensor no son exactamente las mismas, ni los factores de escala tampoco.

Se ha optado entonces por un método de comparación basado en la correlación cruzada, que se describe seguidamente, y que consiste en comparar una secuencia determinada del S-H con el conjunto de las secuencias procedentes de nuestra cámara plenóptica, seleccionando aquella que mayor correlación cruzada presenta. La Figura 5.39 muestra el caso en el que la primera de las secuencias del Shack-Hartmann se compara con el conjunto de las secuencias procedentes de la cámara plenóptica.

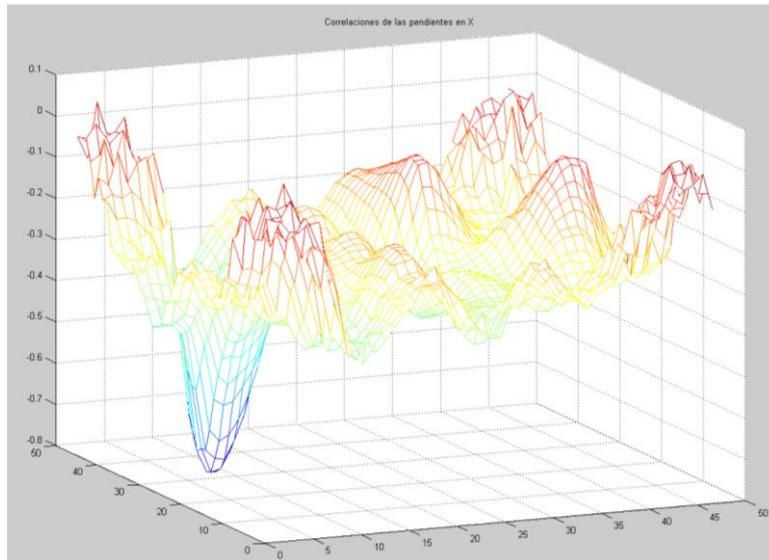


Figura 5.39 Representación gráfica de los valores de los coeficientes de correlación entre una de las muestras del sensor S-H con todas las de nuestra cámara plenóptica. Se observa un pico claramente definido en el punto de la pupila común.

Para el caso de las secuencias en el eje horizontal puede verse que existe una zona claramente identificada donde la correlación es máxima, aunque negativa por el efecto del divisor de haz. Consideraremos esa posición como la correspondiente entre ambos sensores, y el valor de la correlación alcanzada como verificación de la equivalencia de ambas medidas.

Este proceso puede extenderse de forma sistemática a todas las secuencias del sensor Shack-Hartmann, de la forma siguiente:

- I. En primer lugar se extraen las secuencias de pendientes horizontal y vertical de cada una de las muestras del sensor de Shack-Hartmann. Por otra parte se calculan las secuencias de pendientes de fase en pupila a partir de las imágenes plenópticas, utilizando para ello una rejilla de tamaño 49x49, por ejemplo, obteniendo así  $49 \times 49 = 2401$  secuencias.
- II. Calculamos entonces la correlación cruzada de cada una de las secuencias del sensor Shack-Hartmann con todas las obtenidas a partir de la cámara plenóptica, anotando entonces cuál es la correlación máxima y eligiendo ésta como la posición equivalente de una respecto de la otra.

Sobre los datos obtenidos, confirmamos que las posiciones equivalentes obtenidas son iguales para las secuencias horizontal y vertical, y que las correlaciones son elevadas (Tabla 5-1 y Tabla 5-2). Finalmente, dibujamos gráficamente las posiciones equivalentes obtenidas en la pupila, para comprobar que son la misma, tanto en el caso del sensor S-H como en el caso de nuestra cámara plenóptica (Figura 5.40).

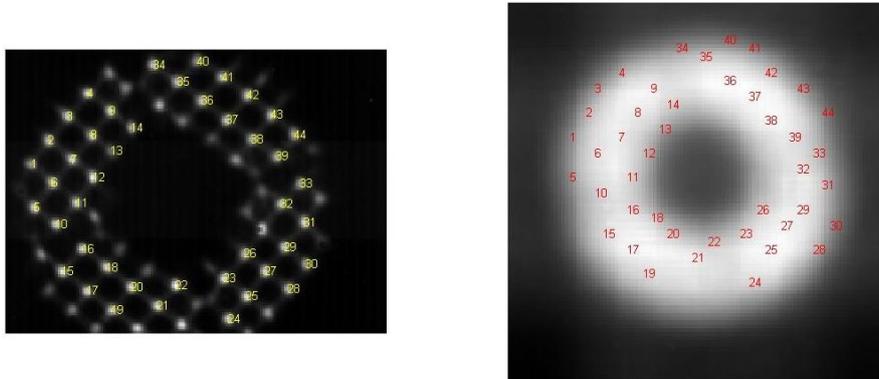
Número	$X_{S-H}$ (pixels)	$Y_{S-H}$ (pixels)	$X_{Plen\acute{o}ptica}$ (muestras)	$Y_{Plen\acute{o}ptica}$ (muestras)	Coef. Correlaci3n
1	11.37	48.95	8	30	-0.84
2	18.77	38.99	10	33	-0.88
3	26.54	28.64	11	36	-0.87
4	35.16	19.14	14	38	-0.85
5	12.63	67.22	8	25	-0.90
6	20.25	56.79	11	28	-0.85
7	28.40	46.87	14	30	-0.84
8	36.71	36.76	16	33	-0.83
9	44.56	26.44	18	36	-0.81
10	21.72	74.24	11	23	-0.83
11	30.22	65.21	15	25	-0.83
12	37.18	54.46	17	28	-0.88
13	44.94	43.44	19	31	-0.73
14	53.42	33.44	20	34	-0.70
15	24.30	94.29	12	18	-0.81
16	32.80	84.81	15	21	-0.78
17	34.76	102.55	15	16	-0.79
18	42.91	92.50	18	20	-0.81
19	45.26	110.55	17	13	-0.75
20	53.43	100.86	20	18	-0.81
21	64.26	108.86	23	15	-0.76
22	72.02	100.17	25	17	-0.73
23	92.32	97.24	29	18	-0.73
24	94.13	114.36	30	12	-0.78
25	101.55	104.76	32	16	-0.77
26	100.93	86.84	31	21	-0.70
27	109.52	94.20	34	19	-0.80
28	119.08	101.49	38	16	-0.83
29	117.75	84.04	36	21	-0.79
30	126.57	91.28	40	19	-0.82
31	125.93	73.50	39	24	-0.86
32	116.34	65.70	36	26	-0.80
33	124.38	57.31	38	28	-0.83
34	62.59	7.07	21	41	-0.85
35	72.68	14.18	24	40	-0.80
36	82.94	22.14	27	37	-0.82
37	93.43	30.31	30	35	-0.75
38	104.02	38.43	32	32	-0.78
39	114.38	45.70	35	30	-0.76
40	81.01	5.38	27	42	-0.77
41	91.70	12.16	30	41	-0.79
42	102.08	19.82	32	38	-0.80
43	112.10	28.16	36	36	-0.77
44	121.78	36.46	39	33	-0.80

Tabla 5-1 Valores del coeficiente de correlaci3n m3ximo encontrado, en la comparaci3n entre los gradientes en eje X de cada una de las muestras seleccionadas del sensor SH, y su equivalente m3s pr3xima en la c3mara plen3ptica.

Número	$X_{S-H}$ (pixels)	$Y_{S-H}$ (pixels)	$X_{Plen\acute{o}ptica}$ (muestras)	$Y_{Plen\acute{o}ptica}$ (muestras)	Coef. Correlación
1	11.37	48.95	8	30	0.85
2	18.77	38.99	10	33	0.88
3	26.54	28.64	11	36	0.89
4	35.16	19.14	15	39	0.87
5	12.63	67.22	9	25	0.89
6	20.25	56.79	11	28	0.90
7	28.40	46.87	14	30	0.90
8	36.71	36.76	16	33	0.89
9	44.56	26.44	17	36	0.84
10	21.72	74.24	12	23	0.86
11	30.22	65.21	15	25	0.88
12	37.18	54.46	17	28	0.86
13	44.94	43.44	18	31	0.81
14	53.42	33.44	20	33	0.84
15	24.30	94.29	11	18	0.89
16	32.80	84.81	15	21	0.88
17	34.76	102.55	15	16	0.87
18	42.91	92.50	18	19	0.89
19	45.26	110.55	18	14	0.85
20	53.43	100.86	20	17	0.88
21	64.26	108.86	23	15	0.87
22	72.02	100.17	25	18	0.91
23	92.32	97.24	29	18	0.88
24	94.13	114.36	31	12	0.91
25	101.55	104.76	32	15	0.90
26	100.93	86.84	31	21	0.89
27	109.52	94.20	34	18	0.93
28	119.08	101.49	38	15	0.91
29	117.75	84.04	37	21	0.88
30	126.57	91.28	39	18	0.90
31	125.93	73.50	39	23	0.90
32	116.34	65.70	36	26	0.88
33	124.38	57.31	39	28	0.84
34	62.59	7.07	22	42	0.89
35	72.68	14.18	24	39	0.88
36	82.94	22.14	27	36	0.87
37	93.43	30.31	30	34	0.85
38	104.02	38.43	32	32	0.86
39	114.38	45.70	34	30	0.87
40	81.01	5.38	26	42	0.88
41	91.70	12.16	30	40	0.88
42	102.08	19.82	33	38	0.85
43	112.10	28.16	36	35	0.87
44	121.78	36.46	38	33	0.90

Tabla 5-2 Valores del coeficiente de correlación máximo encontrado, en la comparación entre los gradientes en eje Y de cada una de las muestras seleccionadas del sensor S-H, y su equivalente más próxima en la cámara plenóptica.

Puede comprobarse que la posición de correlación máxima coincide prácticamente en todos los casos, con una máxima diferencia de una unidad, a pesar de calcularse independientemente para el eje horizontal y el vertical, y que además corresponde esencialmente al mismo punto de la pupila, como muestra la Figura 5.40:



*Figura 5.40 Figura comparativa de los sensores de S-H y plenóptico. Para cada una de las microlentes numeradas en el S-H se ha calculado la muestra de pupila de la cámara plenóptica cuya correlación es máxima, y se indica sobrepuesta sobre la imagen integrada de pupila. La coincidencia es total.*

En esta figura, que consideramos el remate final de las comprobaciones, se han identificado en el sensor de Shack-Hartmann las posiciones de las microlentes analizadas, con un número escrito en color amarillo, mientras que en la imagen acumulada de la pupila obtenida con el sensor plenóptico se ha representado en rojo la posición de la muestra de pupila cuya correlación es máxima. Se ve claramente que se trata de la misma zona de la pupila, salvando factores de escala y rotaciones relativas, de donde cabe deducir que ambos sensores están midiendo esencialmente los mismos gradientes en las mismas zonas de la pupila.

# 6 Capítulo VI. Diseño conceptual de implementación FPGA

*“But the speed was power, and the speed was joy, and the speed was pure beauty.”*

Richard Bach, (*Jonathan Livingston Seagull*)

En la presente Tesis se han descrito hasta ahora los algoritmos necesarios para extraer la información de fase de frente de onda por medio de una cámara plenóptica. Todos ellos han sido codificados y verificados utilizando MATLAB, como herramienta de trabajo cómoda y eficaz, pero sin tener en cuenta para nada el tiempo de procesamiento requerido.

En este capítulo se presentará el diseño conceptual de un procesador basado en FPGA (Field Programmable Gate Array) capaz de realizar el conjunto de procesamiento requerido a las velocidades que demandan las aplicaciones de óptica adaptativa, así como el desarrollo piloto realizado para verificar la viabilidad global y algunas de las prestaciones.

## 6.1 Los procesadores basados en lógica reprogramable (FPGA)

La utilización sistemática de procesadores basados en lógica reprogramable fue propuesta y verificada por nuestro grupo en 2005 (Rodríguez-Ramos et al, 2005), constituyendo una alternativa pionera a nivel mundial, al objeto de aprovechar su inigualable capacidad de

procesado paralelo de cara a la Óptica Adaptativa.

La lógica reprogramable se diferencia de la lógica convencional en que admite una reprogramación sobre el terreno cuantas veces sea preciso, de forma que el silicio es capaz de adaptarse y admitir virtualmente cualquier procesado que el usuario quiera encargarle. Una de las posibilidades es, entonces, la convencional de generar un procesador capaz de interpretar un programa secuencial y proceder a su ejecución, pero también otra, que es la que explotamos en nuestro grupo, consiste en distribuir el procesado a lo largo y ancho del silicio de forma que se ejecute materialmente a la vez, consiguiendo así un paralelismo real en lugar de uno simulado mediante rápida conmutación entre hilos.

La lógica reprogramable está basada en la utilización discrecional de una miríada de unidades de procesado, denominadas CLB ("Configurable Logic Block"), las cuales implementan una tabla de verdad de cuatro, cinco o seis entradas y una o dos salidas. Se añaden además unidades específicas de memoria e incluso multiplicadores-acumuladores específicos (MACs) al objeto de proporcionar al diseñador -o mejor dicho, al programa de síntesis- herramientas eficaces para la realización del trabajo deseado.

La irrupción en el mercado de chips de lógica reprogramable de grandes dimensiones, junto con la existencia de herramientas de diseño (síntesis) y depuración de gran calidad y bajo coste, ha permitido cambiar el panorama del diseño electrónico del procesado en los últimos años, ofreciendo a la vez elevado nivel de integración y alta velocidad de procesado. Se le ofrece al diseñador electrónico la posibilidad de definir su diseño en lenguajes de alto nivel, VHDL o incluso en C, concentrándose en la estructura, el comportamiento y las prestaciones deseadas, dejándole al software de síntesis la ardua tarea de obtener la combinación de lógica que permita llevarla a cabo. Únicamente es entonces preciso proceder a la carga del fichero de definición en el dispositivo, en el momento del encendido, y ya estará en marcha la herramienta de cálculo en cuestión.

Otra de las prestaciones importantes es que se admite una definición jerárquica de los diferentes módulos, lo cual permite que no haya que empezar desde cero en cada caso, sino que se puedan reutilizar módulos desarrollados y verificados previamente, incluso por otros grupos, que se encarguen de tareas concretas y perfectamente definidas con interfaces documentadas. Estos módulos pueden combinarse con facilidad en el diseño y la síntesis para construir sistemas cada vez más complejos, con la única limitación de la cantidad de módulos disponibles y las matrices de interconexión existentes.

El concepto fundamental propuesto de cara a la obtención de la máxima capacidad de procesado paralelo, asociado a la utilización de lógica programable para la ejecución de procesados de altas prestaciones, consiste en que desaparece definitivamente el "procesador" al que estamos acostumbrados en nuestros ordenadores y teléfonos móviles, que por variedad de núcleos que pueda contener se trata de un hardware fijo, que es capaz de ejecutar un secuencia de instrucciones una tras otra a gran velocidad. En su lugar, el procesado requerido es diseñado específicamente para cada problema, y distribuido en el silicio de forma que son los datos los que, al atravesarlo, van recibiendo dicho procesado en unidades que están siempre activas y disponibles, y que funcionan simultáneamente en paralelo.

Justo es decir, sin embargo, que la asignatura que todavía a fecha de hoy tiene pendiente el procesado con FPGA es la poca naturalidad con la que encajan las operaciones en coma flotante, las cuales requieren gran número de CLBs para ser llevadas a cabo, y por lo tanto constituyen una seria desventaja frente a los procesadores convencionales o los procesadores gráficos GPU, que sin embargo son hasta tres órdenes de magnitud más lentos que las FPGAs.

## 6.2 Diseño conceptual del procesador FPGA para la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda

Tal y como se ha descrito anteriormente el procesado requerido, y buscando que todas las etapas posibles del mismo vayan siendo calculadas desde el momento en que los valores de los píxeles estén disponibles, de manera que el resultado final se obtenga poco después de que el último píxel de la imagen haya estado disponible, el esquema general del proceso en tiempo real tendría las siguientes etapas (Figura 6.1):

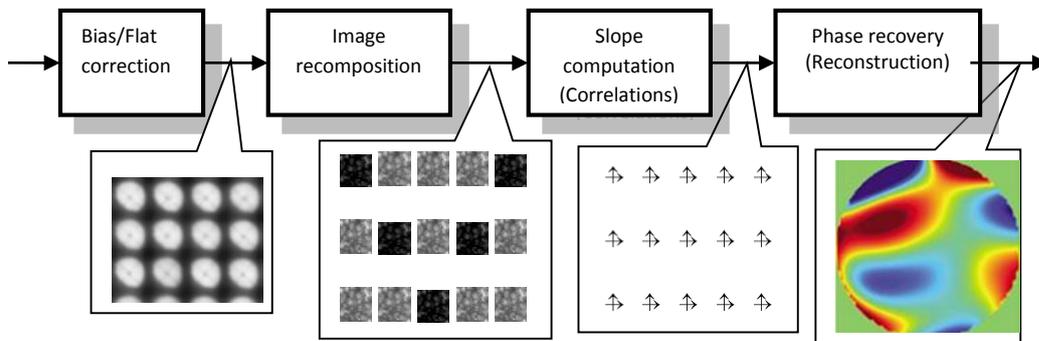


Figura 6.1 Etapas conceptuales de la reconstrucción en tiempo real de frentes de onda utilizando una cámara plenóptica.

Comenzaría, como es habitual, con una corrección de nivel cero (“Bias”) y de ganancia (“Flat”) que en general es constante al menos a lo largo de un periodo de observación. Seguiría por la recomposición de la imagen, para extraer las muestras de cada una de las imágenes de la pupila y formar con ellas las imágenes correspondientes a las diversas coordenadas de la misma. Cada una de estas imágenes reconstituidas deberá compararse con la referencia, elegida de la forma que convenga en cada caso, usando centroides o correlaciones, para obtener los gradientes en cada coordenada de la pupila. Finalmente, procederá dar el paso desde los gradientes hasta la propia fase mediante integración.

Se describen seguidamente cada uno de estos pasos por separado.

### 6.2.1 Compensación de “Bias” y “Flat”

Cada uno de los píxeles de la cámara en cuestión deberá ser objeto de una resta y una ecualización, de manera individual e independiente para cada uno de ellos, basado en el contenido de sendas memorias con la imagen de “Bias” y de “Flat” (Figura 6.2), las cuales se cargarán previamente en el dispositivo.

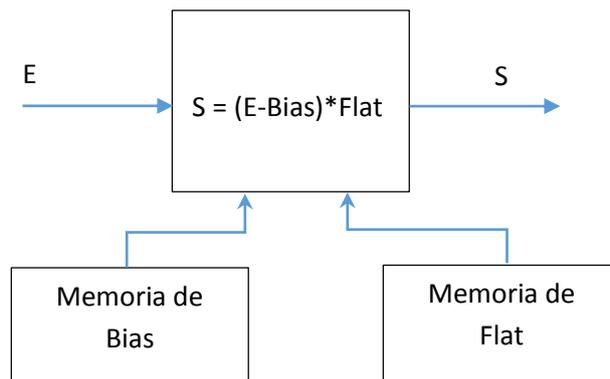


Figura 6.2 Esquema conceptual de las operaciones involucradas en la corrección de polarización (“Bias”) y la ecualización (“Flat”), junto a la información requerida.

La imagen de “Bias” tendrá en general la misma precisión que la propia que ofrece la cámara, al menos, mientras que la imagen de flat previsiblemente posea un número de bits de resolución incrementado en varias unidades, al objeto de poder alcanzar una precisión razonable, siempre limitada al uso de multiplicadores en coma fija para mantener el tamaño del módulo en unos niveles aceptables. Los números almacenados en la memoria de flat estarán en torno a la unidad para las cámaras más habituales, siendo positivos por naturaleza, de modo que por ejemplo reservaremos dos bits para representar a la parte entera y los catorce restantes para una cierta parte fraccionaria, en cuyo caso el valor máximo representable sería próximo a cuatro y el más próximo a la unidad, conocido como “épsilon” en la nomenclatura de operaciones de coma flotante, sería 1,0000610.

### 6.2.2 Obtención de las muestras de pupila con interpolación.

Se ha contemplado que la obtención de la muestra de pupila pueda realizarse con una interpolación de 3x3 píxeles, de forma que pueda soslayarse la más que probable situación en la que la muestra de pupila no coincide exactamente con un píxel del detector, sino que debe extraerse mediante interpolación entre los adyacentes. Este mecanismo resuelve también la posible falta de registro que exista entre el array de microlentes y las líneas de detectores, con arreglo a lo comentado en el capítulo de calibración, mientras el desalineado se mantenga inferior al kernel de 3x3 que se utilizará para extraer la muestra de pupila a partir de 9 píxeles del sensor.

Al estructura conceptual que aparece en la Figura 6.3 cuenta con que los coeficientes de la interpolación serán calculados “off-line” y almacenados previamente en el procesador de tiempo real. El trabajo a realizar viene expresado en la siguiente figura:

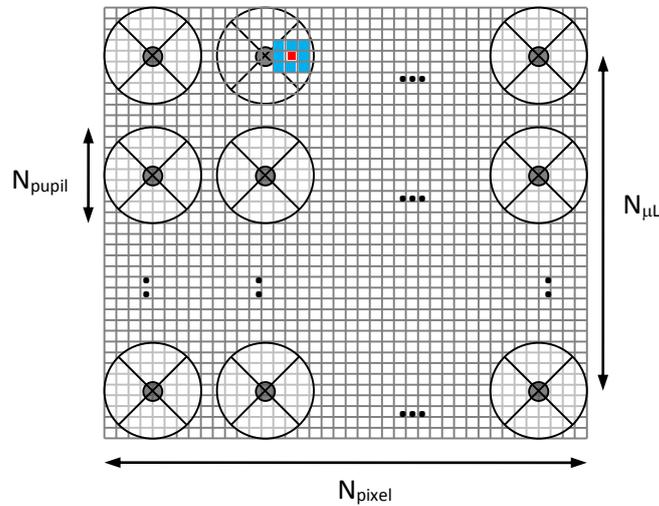


Figura 6.3 Esquema conceptual de las operaciones de interpolación requeridas, en un caso más general, para el cálculo de una muestra de pupila. Se dibujan en azul los píxeles involucrados en el cálculo de la muestra ubicada en el píxel de color rojo.

Se representan en azul los píxeles de la imagen plenóptica que deben intervenir para el cálculo de muestra de pupila correspondiente a la posición indicada en rojo, para la imagen de pupila de la primera fila y segunda columna. También se indican los parámetros más relevantes que intervienen, como son el número de píxeles del sensor  $(N_{\text{pixel}})^2$ , el número de microlentes  $(N_{\mu\text{L}})^2$  y el número de muestras de pupila  $(N_{\text{pupil}})^2$ , los cuales se relacionan aproximadamente por  $N_{\text{pupil}} \approx N_{\text{pixel}} / N_{\mu\text{L}}$ .

La estructura conceptual del módulo de recomposición aparece en la Figura 6.4, en la que se aprecia la realización simultánea del procesado de tres filas de píxeles, es decir, que en cada instante se están calculando, además de la fila actual, la anterior y la posterior. Se muestran también las dimensiones requeridas en función de los parámetros relevantes.

El píxel de entrada se aplica directamente a tres módulos multiplicadores-acumuladores (MAC) donde son combinados con el coeficiente que corresponda. Los resultados intermedios de las filas son acumulados a la espera de que hayan estado disponibles todos los píxeles requeridos para el cálculo de una muestra determinada, la cual será entregada en cuanto haya salido el noveno de los píxeles involucrados en el kernel de 3x3.

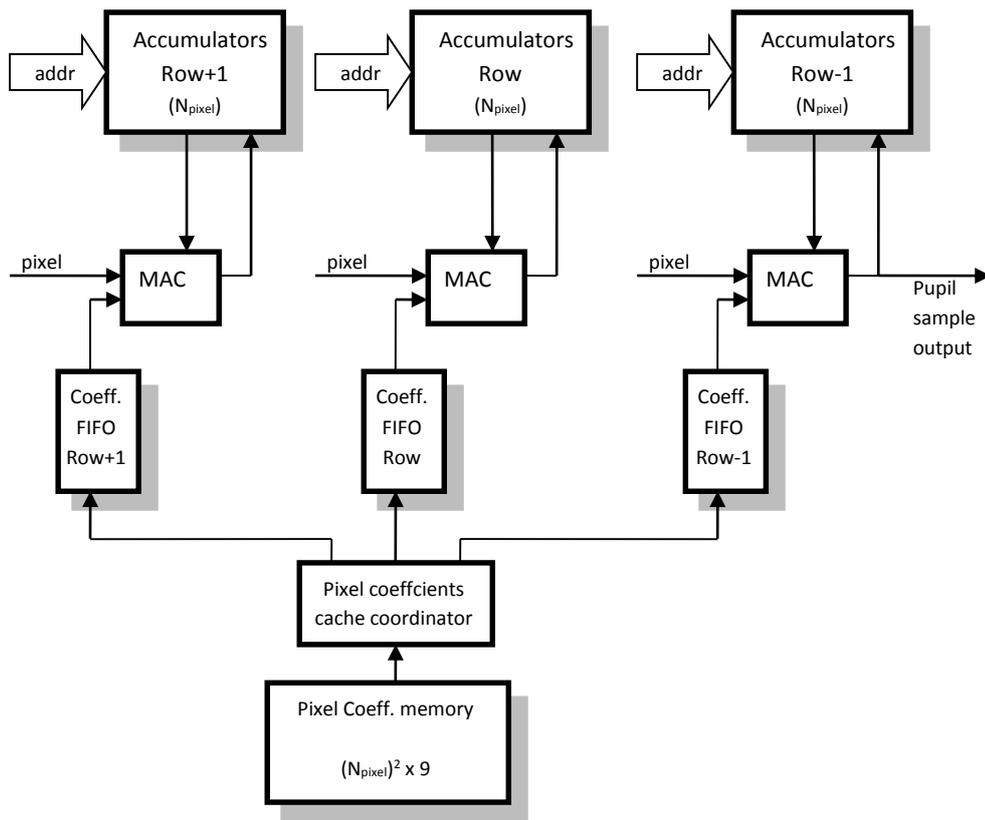


Figura 6.4 Esquema conceptual de la implementación en FPGA de las operaciones necesarias para obtener las muestras de pupila, incluyendo una posible interpolación de 3x3 píxeles.

La recomposición de la imagen, y por lo tanto la obtención de las imágenes correspondientes a los diversos puntos de la pupila, se realizará mediante la redirección de las muestras de pupila secuencialmente hasta cada uno de los correladores que aparecen descritos en el módulo de cálculo de gradientes, que se describe a continuación.

### 6.2.3 Cálculo de los gradientes mediante correlación.

Se ha diseñado un módulo de correlación capaz de calcular una matriz de 5x5 muestras de la correlación cruzada, en las proximidades del cero de desplazamientos. Con esta hipótesis se pueden determinar con exactitud desplazamientos de  $\pm 1.5$  píxeles y obtener estimaciones razonables hasta  $\pm 2.5$  píxeles, con disminución progresiva de la linealidad. De esta forma, cada muestra de pupila intervendrá únicamente en 25 ( $=5 \times 5$ ) correlaciones, por lo que será preciso disponer de una máquina capaz de realizar este cálculo a la velocidad de salida de los píxeles. Con tal objetivo, tanto las muestras de la imagen recompuesta como las de la de referencia se reordenarán de acuerdo al desplazamiento que se esté calculando, colocando las muestras en una memoria de dos líneas como indica la figura.

De forma asíncrona, el módulo multiplicador/acumulador (MAC) revisará si hay disponibles parejas de muestras de imagen y referencia, y procederá entonces a multiplicarlas y acumular el resultado, limpiando la posición correspondiente.

El conjunto del proceso se ha distribuido entre cinco procesadores replicados debido a que,

aunque la velocidad de salida de píxeles estará un orden de magnitud por debajo del reloj de la FPGA, entendemos que 25 operaciones de multiplicación/acumulación a la velocidad de píxel es un objetivo imposible de conseguir.

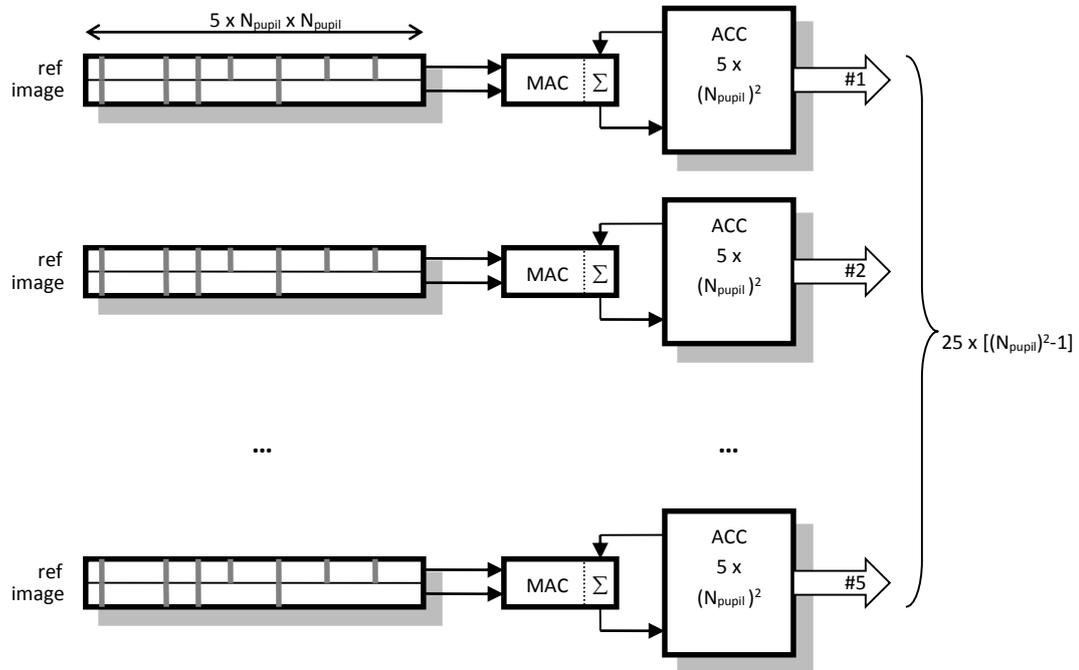


Figura 6.5 Esquema conceptual del módulo de estimación de gradientes mediante correlación, concebido como cinco procesadores replicados.

La salida de este módulo de cálculo de correlaciones será entonces 25 muestras de la correlación cruzada para cada conjunto de referencia e imagen, es decir,  $25 \times [(N_{pupil})^2 - 1]$  valores, en cada imagen plenóptica.

Una vez calculadas las 5x5 muestras de las correlaciones cruzadas, necesitaremos detectar la posición del pico y proceder entonces a un ajuste cuadrático para disponer de precisión subpíxel en la determinación del desplazamiento. Este trabajo será realizado por un módulo localizador de los picos que se colocará a continuación del módulo de correlación, el cual deberá esperar a que hayan salido todas las muestras de una correlación determinada.

Como la interpolación cuadrática implica una división, hará falta disponer un cierto número de calculadores en paralelo para poder cumplir los requerimientos de latencia baja. También utilizaremos memorias FIFO (First-In First-Out) para desacoplar las entradas y las salidas de los interpoladores cuadráticos, como se indica en la figura:

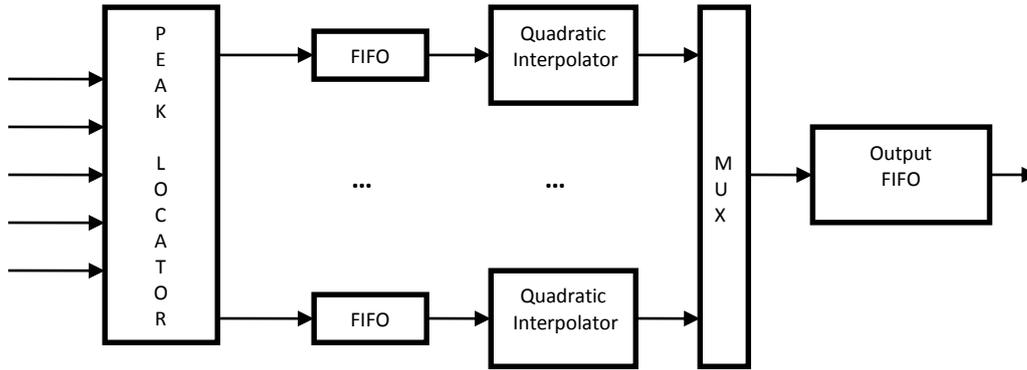


Figura 6.6 Esquema de concepto de un conjunto de interpoladores cuadráticos para la determinación de la posición del pico de la correlación con precisión sub-píxel.

### 6.2.4 Reconstrucción del frente de onda

La reconstrucción del frente de onda a partir de los gradientes utilizando FPGA ha sido desarrollada en el grupo (Marichal-Hernández, J.G. et al, 2005) tanto modalmente, descomponiendo en función de exponenciales complejas, como zonalmente, basada en la recuperación iterativa sobre la disposición de Hudgin (Díaz-García, 2010). Ésta última permite obtener los puntos de fase en lugares intermedios frente a aquéllos en los que se han medido los gradientes. Las iteraciones responden a la expresión:

$$\phi^{(M)} = \frac{1}{4} \left( \phi_1^{(M-1)} + \phi_2^{(M-1)} + \phi_3^{(M-1)} + \phi_4^{(M-1)} + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \Delta\phi_3 + \Delta\phi_4 \right)$$

Donde M es el índice de las iteraciones, las fases en los puntos adyacentes se representan por  $\phi_1.. \phi_4$  y los gradientes medidos son  $\Delta\phi_1.. \Delta\phi_4$ .

La arquitectura utilizada está orientada a facilitar al máximo el paralelismo. En cada iteración, para calcular una nueva matriz de fase, habrá tantos circuitos en paralelo como filas de subaperturas, de forma que todas las fases de una columna particular se calculan simultáneamente.

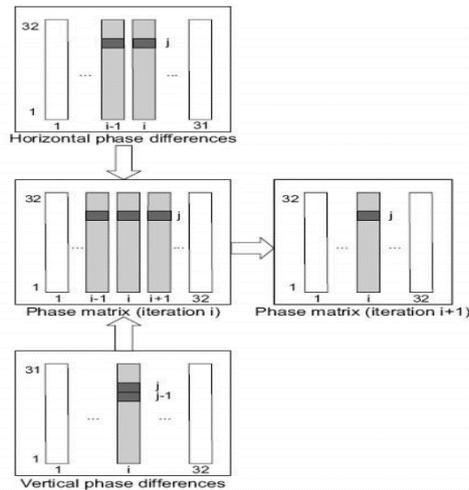


Figura 6.7 Esquema conceptual del algoritmo iterativo utilizado para la reconstrucción del frente de onda mediante FPGA. La nueva matriz de fases (der.) se calcula a partir la matriz de la iteración anterior (centro) combinada con las diferencias verticales (abajo) y las horizontales (arriba).

Los datos de entrada, gradientes en este caso, se almacenarán en memorias de doble puerto para permitir el acceso de cara al procesado sin interferir en el almacenamiento. Se indican en la Figura 6.7 como los bloques superior e inferior. La matriz recuperada de salida, bloque central, también se almacena en una memoria de doble puerto, que estará a cero al principio y se irá actualizando en cada iteración hasta completar el resultado deseado.

### 6.3 Estimación de ocupación de recursos de FPGA

Se presenta seguidamente (Tabla 6-1) una estimación de los parámetros más importantes de cara a la viabilidad de la implementación en FPGA del procesado requerido.

Para cada uno de los módulos se ha estimado el valor de latencia introducido (tiempo de retraso de repercusión extremadamente importante en el diseño y comportamiento de un sistema de control en lazo cerrado, como es el caso de la Óptica Adaptativa), la cantidad de memoria utilizada y la cantidad de recursos de la FPGA (que será lo que determine hasta qué punto puede encajarse dentro de un determinado chip).

No se ha considerado el coste del módulo de reconstrucción del frente de onda, ya que en general no es necesario proceder a dicha reconstrucción para llevar a cabo un control en óptica adaptativa, que es la aplicación en la que más sentido tiene desarrollar un procesado paralelo en FPGA. Dicho control suele plantearse (Conforti, 1983) en modos acordes con la estadística de la turbulencia atmosférica que se pretende compensar, como son los Zernikes o los específicamente calculados de Karhunen-loeve.

	Módulos				
	Bias y Flat	Recompos.	Correlación	Interpolac. cuadrática	Total
Latencia	$10t_{ck}$	$4t_{ck}$	$25t_{ck}$	$40t_{ck}$	$\approx 80 t_{ck}$ [ $\approx 800$ ns]
Memoria	$2(N_{\text{pixel}})^2$	$9(N_{\text{pixel}})^2$	$50(N_{\text{pupil}})^2$	-	$\approx 12(N_{\text{pixel}})^2$ [ $\approx 96$ MB]
Recursos FPGA	200	900	1500	5000	$\approx 8000$

*Tabla 6-1 Estimación de los parámetros más relevantes como resultado del proceso de diseño conceptual de la implementación en lógica reprogramable (FPGA) del procesado de la Cámara Plenóptica para tiempo real.*

Puede deducirse entonces que la cantidad de recursos requeridos encaja perfectamente en dispositivos existentes en el mercado, incluso con amplio margen, y que los niveles de latencia previstos, para relojes relativamente conservadores como  $t_{ck} = 100$  MHz, son perfectamente aceptables.

## 6.4 Desarrollo piloto.

Al objeto de verificar la viabilidad de los conceptos de diseño propuestos, se realizó un desarrollo piloto adaptando las necesidades a los componentes disponibles, el cual fue verificado en laboratorio. Se utilizó la cámara de interfaz Gig-E PULNIX TM-4200GE, anteriormente descrita, de 2048x2048 píxeles, con un array de 125  $\mu\text{m}$  de pitch y 10 mm de distancia focal, junto a una lente de cámara de 300 mm. El procesado FPGA se desarrolló utilizando una tarjeta ML401 del fabricante Xilinx, dotada de un dispositivo programable de la familia Virtex-4, concretamente SX-35.

El desarrollo piloto (Figura 6.8) contiene un módulo para aceptar la entrada Gig-E hasta la FPGA, así como también comandos desde un programa de interfaz de usuario que corría en un ordenador remoto auxiliar, entre los que estaban las coordenadas de los centros de las microlentes. También se incorporó un display nativo generado en tiempo real directamente desde la FPGA en un monitor VGA, en el cual se mostraban las imágenes procesadas. El desarrollo piloto únicamente contemplaba la realización del módulo de recomposición de imágenes, el cual además hubo de ser adaptado a la disponibilidad de lógica en la FPGA utilizada.

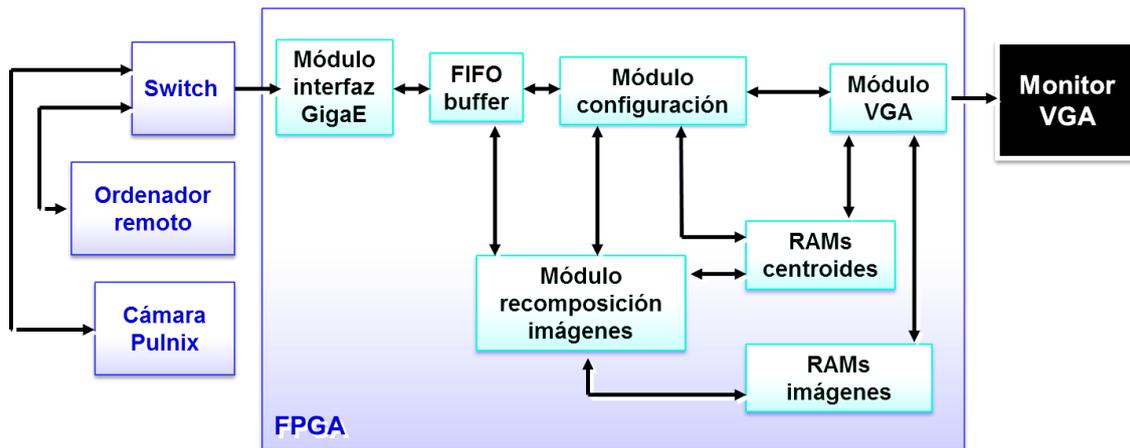


Figura 6.8 Diagrama de bloques del desarrollo piloto realizado. Se incluyen dentro del dispositivo reprogramable (FPGA) los módulos de recomposición, así como los de recepción Gig-E y generación de imagen VGA.

La Figura 6.9 contiene una captura del display de tiempo real que muestra en la parte superior izquierda la imagen plenóptica, reducida desde su tamaño original de 2048x2048 píxeles hasta 256x256. En la parte superior derecha puede verse un fragmento de la imagen plenóptica con toda la resolución, seleccionable por el usuario, que en este caso corresponde al centro de la misma. Los centros de las microlentes se indican también mediante puntos de color rojo.

Finalmente, se muestran también en la Figura 6.9, actualizándose en tiempo real, cinco imágenes recompuestas correspondientes a cinco posiciones de pupila diferentes, elegidas de forma que aparezca la posición central, mostrada naturalmente en el centro, y cuatro posiciones laterales elegidas aproximadamente hacia el 80% del radio de la pupila en cada dirección, que se muestran en la posición relativa en torno a la imagen recompuesta central.

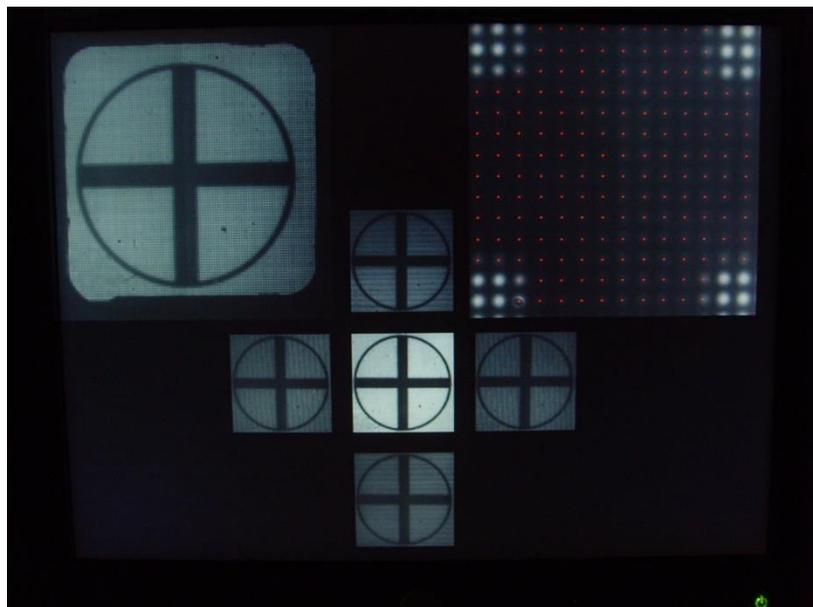


Figura 6.9 Display VGA generado directamente desde la FPGA. A la izquierda arriba se muestra una versión reducida de la imagen plenóptica, y a la derecha un detalle de la misma. Abajo en el centro se muestran cinco imágenes reconstituidas correspondientes a cinco puntos de la pupila.

# 7 Capítulo VII. Conclusiones y trabajos futuros

A lo largo de la presente Tesis se ha planteado y verificado, tanto en laboratorio como en telescopio, la viabilidad y eficacia de la utilización de la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda. Se trata por tanto de un sensor nuevo que combina prestaciones de otros sensores más convencionales y cuyas ventajas e inconvenientes se han analizado. Al objeto de realizar un recorrido explícito sobre las conclusiones alcanzadas, cabe señalar que:

- Se ha realizado la formulación de un sensor de frente de onda nuevo, inspirado en conceptos que provienen de la fotografía digital, pero de aplicación en los campos tradicionales en los que el sensado de frente de onda es necesario, tales como la Óptica Adaptativa.
- Varios ejemplos reales de cámaras plenópticas fueron construidos físicamente con todos sus detalles, resolviendo todos los problemas prácticos que ello conlleva, y desarrollando todos los programas para la calibración y operación, así como para el procesado de datos y extracción de conclusiones. Como consecuencia se dispone de todo un procedimiento para la calibración de cámaras plenópticas, adaptable al prototipo en cuestión y a las necesidades de velocidad y precisión del problema en estudio.
- En el telescopio “Optical Ground Station” del Observatorio del Teide (Tenerife), se tomaron y analizaron con éxito las primeras e históricas imágenes plenópticas astronómicas, permitiendo concluir que es viable realizar la medida del frente de onda en la práctica con una cámara plenóptica, tanto cuantitativa como cualitativamente.
- La Cámara Plenóptica puede utilizarse como sensor de frente de onda tanto para objetos puntuales como para objetos extensos, tales como la granulación solar o las estrellas láser, sin mayor modificación que la de los algoritmos aplicados. Este detalle puede suponer una importante ventaja en muchos casos prácticos, a pesar de que normalmente los sensores de frente de onda se diseñen específicamente para la aplicación en la que se pretendan utilizar.
- La Cámara Plenóptica aporta simplicidad en el sensado de frente de onda de objetos extensos, al no requerir una limitación explícita del campo, y proporciona flexibilidad a la hora de elegir el muestreo del frente de onda, permitiendo implementar una variedad de configuraciones sin modificar la estructura óptica ni mecánica, sino únicamente las operaciones que se realicen sobre las imágenes plenópticas. Es, por lo tanto, viable, y está en marcha en el grupo de investigación el desarrollo de un objetivo plenóptico, desmontable, que pueda aplicarse a las cámaras comerciales y así extender sus prestaciones hacia el sensado de frente de onda, la medida de profundidades, y todas las otras prestaciones en desarrollo para dicha configuración.
- Además, se ha demostrado que es viable la recuperación del frente de onda a partir de la imagen plenóptica con las prestaciones de velocidad y latencia que se demandan en

la Óptica Adaptativa de los grandes telescopios, las cuales alcanzan varios miles de correcciones por segundo.

- Se ha propuesto y desarrollado, como idea original pionera a nivel mundial, la utilización de lógica reprogramable (FPGA) en exclusiva, para la implementación masivamente en paralelo de sistemas de control de Óptica Adaptativa para telescopios gigantes.

## 7.1 Actividades de cara al futuro

En la presente Tesis se ha abordado esencialmente la medida del frente de onda en pupila, suponiendo deliberadamente que la turbulencia se concentra en una única capa allí ubicada. Esta aproximación está desafortunadamente lejos de la realidad, y resulta únicamente válida para campos muy pequeños en los que se puede suponer una coherencia espacial. Se mostraron en el capítulo II, no obstante, algunas pinceladas de lo que sería la continuación de los trabajos en la dirección de la caracterización tomográfica de la turbulencia, de especial interés en objetos extensos, lo que constituye sin duda la continuación lógica de los estudios y experiencias aquí descritos.

La posibilidad de usar las mismas imágenes plenópticas para, con algoritmos distintos a los de medida de fase, distinguir las alturas de las que provienen los fotones de las estrellas guías láser, permite usarlas como si de referencias puntuales se tratase, posibilidad que ya ha sido demostrada en el seno del grupo de investigación. Naturalmente, la aplicación de estas técnicas a la resolución de problemas concretos, tanto en telescopios solares como en el sensado de frente de onda con estrellas guía láser, es el siguiente paso que aparece en el horizonte.

## 8 Bibliografía

- Adelson, T. a. (1992). Single lens stereo with a plenoptic camera. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, 99-106.
- Babcock, H. W. (1953). The possibility of compensating astronomical seeing. *Publ Astron Soc Pac*, 65 : 229.
- Clare, R., & Lane, R. (2005). Wave-front sensing from subdivision of the focal plane with a lenslet array. *J. Opt. Soc. Am., A* 22, 117-125.
- Conforti, G. (1983). Zernike aberration coefficients from Seidel and higher-order power-series coefficients. *Optics Letters*.
- Díaz-García, J. e. (2010). mplementation of a waveform recovery algorithm on FPGAs using a zonal method (Hudgin). *1st AO4ELT conference - Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes*. Paris.
- Ebstein, S. (1996). Nearly-index-matched optics for aspherical, diffractive, and achromatic-phase diffractive elements. *Optics Letters*, 21 1454-1456.
- Freischlad, K., & Koliopoulos, C. (1986). Fourier description of digital phase-measuring interferometry. *J. Opt.Soc. Am.*, 3, 1852.
- García-Lorenzo, B. et al. (2008). EDiFiSE: equalized and diffraction-limited field spectrograph experiment. *Proceedings of SPIE*, 7014.
- Gasior, M., & González, J. (2004). Improving FFT Frequency Measurement Resolution by Parabolic and Gaussian Interpolation. *CERN*.
- Gerchberg, R., & Saxton, W. (1972). A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optic (Stuttgart)*, 237.
- Goodmann, J. W. (1996). *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill.
- Hardy, J. (1978). Active optics: A new technology for the control of light. *Proc IEEE*, 66:651.
- Hardy, J. F. (1974). Real-time correction of optical imaging systems. *OSA Meeting on Optical Propagation through Turbulence, Boulder,CO*.
- Hardy, J. W. (1998). *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*. Oxford University Press.
- Hartmann, J. (1904). "Objektuvuntersuchungen". *Z. Instrumentenk.*
- Ives, F. (1903). Parallax stereogram and process of making same. *Patent US 725567*.
- Kármán, T. v. (1948). Progress in the statistical theory of turbulence. *Proc. N.A.S.*, 530.
- Kolmogorov, A. N. (1941). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for

- very large Reynolds numbers. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences (in Russian)*, 30:299–303.
- Lippmann, G. (1908). La photographie intégrale. *Comptes-Rendus, Académie des Sciences*, 146, 446-551.
- Lippmann, M. G. (1908). Épreuves réversibles donnant la sensation du relief. *J. de Phys.*, 4,VII.
- Mackay, Craig et al. (2012). AOLI-- Adaptive Optics Lucky Imager: Diffraction Limited Imaging in the Visible on Large Ground-Based Telescopes. *Proceedings of SPIE*.
- Marichal-Hernández et al. (2012). Fast approximate 4-D/3-D discrete radon transform for lightfield refocusing. *Journal of Electronic Imaging*.
- Marichal-Hernández, J.G. et al. (2005). Atmospheric wavefront phase recovery by use of specialized hardware: graphical processing units and field programmable gate arrays. *Applied Optics*, Vol 44, 7587–7594.
- Marichal-Hernández, J. (2014). comunicación interna.
- Marichal-Hernández, J. G., Rodríguez-Ramos, J. M., & Rosa, F. (2007). Modal Fourier wavefront reconstruction using graphics processing units. *Journal of Electronic Imaging*, vol. 16, issue 2, p. 023005,.
- Ng, R. (2005). “Fourier Slice Photography”. *Stanford University*.
- Ng, R. (2005). “Light field photography with a hand-held plenoptic camera”. *Tech. Rep. CSTR 2005-02 Stanford Computer Science*.
- Ragazzoni, R. (1996). Pupil Plane wavefront sensing with an oscillating prism. *Journal of Modern Optics*, vol43, no 2, 289-293.
- Roddier, F. et al. (1988). Curvature sensing: A new wavefront sensing method. *Proceedings of SPIE 976*, 203.
- Rodríguez-Ramos et al. (2005). FPGA adaptive optics test bench. *Proc. SPIE*.
- Rodríguez-Ramos, J. (1997). *Detección de frente de onda: Aplicación a técnicas de alta resolución espacial y alineamiento de superficies ópticas segmentadas*. Universidad de La Laguna.
- Rodríguez-Ramos, J. M. (2006). *International Patente nº ES200800126 ES200600210*.
- Shack, R., & Platt, B. (1971). Production and use of a lenticular Hartmann screen. *J Opt Soc Am*, 61 656.
- Stroebel, L., Compton, J., Current, I., & Zakia, R. (1986). *Photographic Materials and Processes*. Focal Press.
- Tallon, M., & Foy, R. (1990). Adaptive telescope with laser probe-Isoplanatism and cone effect. *Astronomy & Astrophysics*, 235 (549-557).

- Tatarskii, V. (1961). *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. New York: McGraw-Hill.
- Trujillo-Sevilla, J. (2011). Algoritmos de calibración de cámara plenóptica.
- Trujillo-Sevilla, J.M. et al. (2014). Tomographic wavefront retrieval by combined use of geometric and plenoptic sensors. *Proceedings of SPIE 9141*.
- Tyson, R. K. (2011). *Principles of Adaptive Optics*. CRC Press.
- van Dam, M. A. (2002). Wave-front sensing from defocused images by use of wave-front slopes. *Applied optics* 41.26 , 5497-5502.