

*De la Memoria de la DEA:
"SENSOR DE CURVATURA EN TELESCOPIOS
CON ESPEJOS SEGMENTADOS"
de J.M. Rodríguez-González
Dic.-2001.
Instituto de Astrofísica de Canarias
Universidad de La Laguna*

Capítulo 5

Espejos segmentados

5.1 Introducción

La construcción de grandes espejos para telescopios por la técnica de segmentación aporta indudables ventajas que hacen que se perfila como la solución idónea para desarrollar los proyectos de los mayores telescopios actuales y del futuro inmediato.

En la tabla 2 se muestran algunos proyectos importantes de telescopios que se han llevado a cabo recientemente (o están en fase de construcción), indicando la técnica adoptada para la construcción de su espejo primario. Puede

Proyecto	Abertura	Situación	Espejo	Operativo
Keck 1	9.8 m	Hawaii	Segmentado	1993
Keck 2	9.8 m	Hawaii	Segmentado	1996
Hobby Eberly	9,1 m	Texas	Segmentado	1999
VLT	4 × 8 m	Chile	Delgado	1999
SUBARU	8,2 m	Hawaii	Delgado	1999
Gemini N	8,1 m	Hawaii	Delgado	2000
Gemini S	8,1 m	Chile	Delgado	2002?
GTC	10,4 m	La Palma	Segmentado	2003?
SALT	9,1 m	República Sudafricana	Segmentado	2004?
LBT	2 × 8.4 m	Arizona	Ligero	2004?

Tabla 2: Proyectos de grandes telescopios actuales o en estado de construcción.

apreciarse que en todos aquellos telescopios con aberturas mayores que nueve metros se ha elegido la técnica de la segmentación, y es bastante probable que siga siendo así en los telescopios más grandes.

A continuación se describen algunos de estos proyectos, operativos o en estado de construcción. Posteriormente se dedicará una sección a los proyectos en fase de diseño de la siguiente generación de telescopios, que se desea construir con espejos primarios que tendrán un diámetro entre 25 y 100 metros.

5.2 Telescopios segmentados de la clase 8-10 metros

Los cuatro telescopios más grandes de la actualidad, operativos o en estado de construcción, disponen de espejos primarios segmentados. A continuación se resumen las características más importantes de cada uno.

Telescopios Keck El primero de los telescopios Keck entró en funcionamiento en 1993. Es el primer gran telescopio que utilizó la técnica de segmentación. Su espejo consta de 36 segmentos hexagonales. La masa de cada segmento es de tan solo 400 Kg, de manera que la masa total del espejo primario es de 14,4 toneladas

métricas.

La experiencia adquirida con el diseño de los primeros prototipos segmentados muestra que para obtener una buena calidad de imagen se debe utilizar una superficie no esférica en el primario. Esto significa que cada segmento debe ser pulido con la forma adecuada a su posición en el espejo. En el momento de la fabricación de los espejos del Keck, los procedimientos automatizados de pulido de superficies no estaban lo suficientemente avanzados como para permitir este tipo de pulido con una inversión razonable. La técnica que se ideó consiste en utilizar un blanco circular, que es sometido a un conjunto de fuerzas y torques aplicados en su borde de modo que, después de pulirlo como una superficie esférica, al liberarlo de la presión aplicada se relaje a la forma no esférica deseada (Lubliner & Nelson 1980). Esta técnica sólo es aplicable si la deformación introducida en el proceso de pulido no supera el límite de elasticidad o de ruptura del material.

El control activo de la posición de los segmentos resulta imprescindible para obtener una buena calidad de las imágenes. Para esto se utiliza un preciso sistema de sensores en los bordes de los segmentos y de actuadores que, con una frecuencia de dos veces por segundo, corrigen la orientación y posición de los segmentos.

Con el segundo telescopio Keck se pretende construir un interferómetro óptico en el que operen los dos grandes telescopios y varios auxiliares de dos metros de diámetro.

Telescopio Hobby-Eberly El telescopio Hobby-Eberly (HET) fue construido como un proyecto conjunto de varias instituciones universitarias norteamericanas y alemanas. Está situado en el observatorio McDonald (Texas). Posee un diseño bastante interesante.

- El telescopio no se puede mover en elevación. Solamente se puede girar en azimut.
- Se utiliza el *foco primario* para espectroscopia y toma de imágenes.
- El espejo primario es un hexágono de 11 metros de distancia máxima, aunque la abertura está limitada a un diámetro de 9,1 metros. Consta de 91 segmentos hexagonales tallados con forma esférica. Los segmentos son por tanto intercambiables entre sí. Su espesor es de 5 cm.
- Durante las observaciones, tanto el espejo primario como la estructura del telescopio permanecen inmóviles. El seguimiento se efectúa en la superficie focal, que tiene forma de esfera.
- El telescopio dispone de una torre anexa para el alineamiento de los segmentos. Éstos se alinean de modo que todos formen su imagen en la misma posición, pero no se hace que las imágenes de cada segmento se superpongan en fase.
- La calidad de imagen que orientó el diseño es de 0.6 segundos de arco.

El coste de este telescopio es mucho menor que el de un telescopio convencional de este tamaño. La razón es que se ha orientado a la consecución de unos objetivos científicos bien definidos con la mayor rentabilidad posible. Los campos en los cuales resulta más competitivo son la elaboración de “surveys” y espectroscopia.

Gran Telescopio de Canarias El concepto que orienta la construcción del GTC es bastante similar al de los telescopios Keck: un telescopio con un espejo de diez metros de diámetro y altas prestaciones. El telescopio se encuentra actualmente en estado de construcción, teniendo prevista su puesta en funcionamiento para finales de 2002.

La técnica de pulido de los espejos del GTC difiere de la utilizada en el Keck. En primer lugar, los segmentos son cortados en su forma hexagonal antes del pulido, para así evitar introducir tensiones en el material. Actualmente las herramientas de pulido disponen de programas asistidos por computador que permiten dar cualquier forma al material del blanco. Para el GTC se utilizarán estas nuevas herramientas, que evitan los defectos residuales en las zonas de aplicación de las fuerzas de los segmentos de los Keck. Para obtener una mejor forma de la superficie los blancos serán sometidos al final a un bombardeo por iones.

La óptica activa del espejo primario del GTC permitirá no solo controlar la posición y orientación de los segmentos, sino que se podrá corregir la figura de cada segmento con seis grados de libertad.

5.3 Proyectos de telescopios extremadamente grandes (ELT's)

Ya se ha propuesto, y está en fase de diseño conceptual, la construcción de varios telescopios cuyo tamaño supera a los de la presente generación por un factor entre 3 y 10. Algunos de los más destacados son los siguientes:

ELT del observatorio McDonald (Texas). La idea de este proyecto es construir un telescopio para espectroscopia de un espejo de 29 metros utilizando un diseño escalado del telescopio Hobby-Eberly, que se encuentra en el mismo observatorio (el nombre genérico que se suele dar a la nueva generación de telescopios, ELT Extremely Large Telescopes, se ha tomado de este proyecto).

Al igual que en el HET, se pretende dar una forma esférica a la superficie del espejo primario. La menor calidad de imagen resultante se balancea por la reducción de costes y la posibilidad de intercambiar los segmentos entre sí, que facilita las tareas de limpieza de los mismos. Hay que tener en cuenta que en este proyecto se plantea el uso de 169 segmentos hexagonales, por los que estas consideraciones pueden llegar a ser bastante más importantes que en los telescopios actualmente en operación.

CELT (California Extremely Large Telescope). Es un proyecto de un telescopio de 25 metros (Nelson 2000), propuesto por el equipo de los Keck. Su apuesta es armonizar el crecimiento del tamaño del telescopio con el ritmo que éste ha tenido durante las últimas décadas y con el desarrollo de las nuevas tecnologías asociadas a estos proyectos: óptica adaptativa multiconjugada, tomografía atmosférica con estrellas artificiales, etc.

Se pretende aplicar el clásico diseño Ritchey-Chretien, con lo que el primario tiene forma no esférica. Se pretende utilizar un espejo segmentado, cuyos segmentos se podrían pulir con la misma técnica de aplicación de tensiones que se utilizó en los Keck (para poder utilizar una máquina pulidora esférica). Además se pretende economizar el proceso de pulido utilizando blancos grandes de los que se puedan recortar varios segmentos, cuyo tamaño (aproximadamente 1 metro) será más pequeño que el de los segmentos del telescopio Keck. Con 756 de estos segmentos se puede conseguir una abertura con una forma que se aproxime mucho a un anillo.

XLT. Un proyecto sueco de un telescopio de 50 metros. Los primeros estudios se encaminaron hacia la utilización de un primario esférico, pero actualmente se está tendiendo hacia la posibilidad de hacerlo no esférico. Se pretende que tanto el primario como el secundario sean cóncavos y tallados con forma elíptica. Se está estudiando la posibilidad de construir un espejo primario monolítico in-situ, para lo cual el coste parece que podría ser incluso inferior al de un espejo segmentado. No obstante, por el riesgo asociado a esta solución tan novedosa, parece más probable la opción de la segmentación. En este caso se utilizarían 585 segmentos de un tamaño de 2 metros entre lados opuestos.

OWL (Overwhelmingly Large). Es el proyecto más ambicioso de los presentados hasta ahora, propuesto por ESO. Se trata de un telescopio con un espejo primario de 100 metros de diámetro, con el que se pretende además lograr una resolución próxima al límite de difracción en un campo amplio (30 segundos de arco en visible y 2 minutos de arco en infrarrojo). Ésto exige un desarrollo simultáneo de las técnicas de óptica adaptativa y multiconjugación.

La configuración óptica de este telescopio todavía está en fase de diseño preliminar. Se plantea una posibilidad de utilizar seis espejos: un primario esférico segmentado de 100 metros de diámetro, un secundario plano también segmentado de 33,5 metros de diámetro (elevado a una altura de 95 metros respecto del primario), dos espejos activos de 8,2 metros de diámetro, un espejo pasivo de 4,3 metros y por último un espejo plano de 2,5 metros para la corrección de tip-tilt. Se podría reducir el número de superficies con un diseño no esférico en los espejos primario y secundario.

En este proyecto se acentúa el problema derivado de la segmentación y la necesidad de controlar adecuadamente la posición de los segmentos, ya que se presenta en dos superficies, el primario y el secundario, en las que se recurre a esta solución. Para el primario se pretende utilizar aproximadamente 1600 segmentos con una dimensión de dos metros entre lados opuestos.

5.4 Problemas asociados a la segmentación

La segmentación de los grandes espejos primarios contribuye a solucionar varios de los problemas derivados de trabajar con elementos ópticos tan grandes. Así se consigue disminuir la masa del espejo pudiendo darle también una rigidez suficiente que disminuya la necesidad de hacer un control activo de su forma. Se facilitan los procesos de manipulación y transporte, y se alivian las consecuencias que podría tener un error durante el manejo de una superficie monolítica tan delicada. No obstante surgen algunos nuevos problemas que no tienen contrapartida en el caso de utilizar un espejo monolítico.

- Hay que controlar la orientación de cada segmento de modo que todos formen la imagen en el mismo punto del plano focal. Cuando los segmentos se encuentran inclinados respecto a la superficie que deben seguir, se produce un error de *cabeceo*. Es bastante extendido el uso de la terminología anglosajona en la que se utiliza el término *tip-tilt* para denotar el cabeceo con respecto a los dos ejes X, Y (siendo el eje óptico del telescopio el eje Z).
- No sólo esto, sino que los segmentos deben alinearse de manera que el camino óptico hasta la imagen por cada uno de ellos sea el mismo. Si hubiera segmentos retrasados o adelantados se produce un error de *pistón*. Aunque todos los segmentos estuvieran perfectamente orientados, si no se controla la posición relativa de ellos la resolución que se podría obtener con el telescopio sería la correspondiente al tamaño de cada segmento, y no al de la apertura total (Mast, Nelson, & Welch 1982).
- En un telescopio segmentado es inevitable que exista una cierta separación entre segmentos. Esto es necesario para evitar que los bordes de los espejos se fracturen. A esta separación se la denomina *intersticio*, y también tiene un efecto en la imagen, al ser motivo de difracción igual que, por ejemplo, la araña que soporta el espejo secundario.
- Si se utilizan segmentos hexagonales, que es el caso más habitual, la forma de la abertura no es anular. La consecuencia es que en un telescopio con montura alti-azimutal se produce un efecto de rotación de la pupila en el campo de observación al efectuar el seguimiento.

Los dos primeros tipos de error se muestran en la figura 11. Es posible corregirlos mediante un sistema activo, en el que un conjunto de *actuadores* se encarga de restablecer la posición de los espejos cuando se produzca alguna variación. Estos actuadores deben estar guiados por un sistema de medida que permita conocer en cada momento cuál es la posición de cada segmento y así conocer la corrección que hay que aplicar. Habitualmente se utilizan sensores de desplazamiento en los bordes de los segmentos para guiar al sistema de óptica activa.

5.5 Puesta en fase de los segmentos

El control preciso de la posición de los segmentos juega un papel determinante para abordar la empresa de utilizar un telescopio con una apertura segmentada. Al tratar cada segmento como un sólido rígido, hay seis grados de

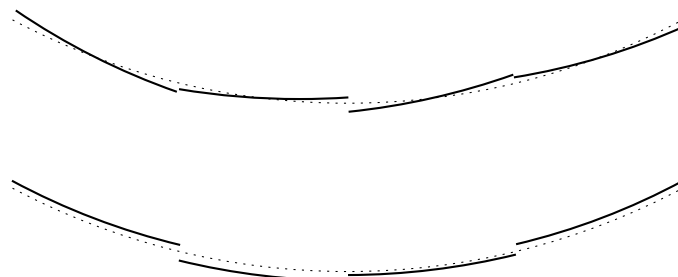


Figura 11: Errores de alineamiento de *cabeceo* (arriba) y *pistón* (abajo). La superficie de puntos marca la posición en la que deberían estar los segmentos.

libertad con los que se determina su posición completamente. Tres de ellos no son críticos para la calidad de las imágenes: las translaciones y rotación en el mismo plano del segmento (Mast, Nelson, & Welch 1982). Estos tres posibles desalineamientos no se suelen controlar por medio de un sistema activo, sino en las revisiones periódicas del telescopio. En cambio los otros tres grados de libertad, los cabeceos (tip-tilt) de los segmentos y su distancia al foco (pistón), tienen una gran influencia en la calidad de las imágenes y deben ser compensados activamente.

La calidad final de un telescopio se puede caracterizar, si las aberraciones son pequeñas, por la distorsión que sufre el frente de ondas. Esta distorsión se puede medir comparando el frente de ondas después de la última superficie óptica con una esfera de referencia centrada en el punto de focalización (para un objeto puntual). Según el criterio de Maréchal se tendrá una concentración de la energía, en el pico de la señal, del 80% de la que se tendría con un instrumento perfecto (limitado únicamente por difracción), si la desviación cuadrática media del frente de ondas respecto a la esfera de referencia no supera el valor $\lambda/\sqrt{180}$. En estas condiciones se considera a efectos prácticos que el sistema óptico tiene una corrección perfecta.

Con esta aproximación se pueden establecer criterios de tolerancia para las aberraciones permisibles en cada superficie óptica. Hay que tener en cuenta que estos criterios se aplican al efecto total de todas las superficies que componen el sistema, por lo que han de ser más estrictos para cada superficie si el telescopio tiene un mayor número de elementos en el camino hasta el detector.

En el telescopio Keck, los criterios de tolerancia impuestos para observaciones normales son de un desfase máximo de 100 nm (RMS) para los segmentos del primario (Chanan et al. 1998). En el caso de observaciones con un sistema de óptica adaptativa o con técnicas de alta resolución basadas en exposiciones cortas, los criterios de tolerancia se hacen más estrictos. La experiencia en la operación de este telescopio demuestra que la puesta en fase de los segmentos no es de ninguna manera una tarea trivial. El problema se agudizará en la siguiente generación de telescopios con muchos más parámetros que controlar.

El método más sencillo para mantener la posición relativa de los segmentos durante los movimientos de apuntado y seguimiento del telescopio es utilizar algún tipo de sensor en los bordes entre segmentos (óptico o mecánico). Esto no significa que no haya que recurrir a algún otro método, generalmente de carácter óptico, para la puesta en fase del espejo. Los sensores de borde precisan de una calibración inicial y posiblemente de una corrección periódica por derivas en su medida. Para este alineamiento inicial se han propuesto varios procedimientos, basados en diferentes principios de funcionamiento.

Una opción es utilizar un procedimiento óptico utilizando una fuente de iluminación interna (LASER o lámpara). Así se tiene la ventaja de poder hacer que la radiación solo interactúe con el espejo primario que es el que se quiere alinear. El inconveniente que se presenta es que la fuente de iluminación debe en general situarse en una posición próxima al centro de curvatura del espejo, que puede ser un lugar difícilmente accesible y sujeto a vibraciones. En las alternativas en las que la fuente de iluminación es una estrella (natural o artificial) el telescopio trabaja en su configuración habitual. También en este caso surgen dificultades: el efecto de la turbulencia atmosférica que distorsiona el frente de ondas; la baja luminosidad de la fuente; y la pérdida de tiempo útil para la observación astronómica entre otros.

5.5.1 Métodos interferométricos

Hay varias alternativas, para conseguir la puesta en fase de los segmentos, basadas en el estudio de fenómenos interferenciales. Se puede hacer uso de iluminación externa (una estrella) o interna (por ejemplo un LASER). A continuación se citan algunos ejemplos.

Método de Kishner Kishner (1991) propone medir las distancias absolutas a puntos de referencia en segmento mediante interferometría (sample point interferometer). Sugiere utilizar retro-reflectores en algunas posiciones de referencia del espejo, y una fuente de iluminación interna proveniente de un LASER. Los retro-reflectores pueden consistir dos espejos en ángulo recto, para que la reflexión sea en la misma dirección que la incidencia pero en sentido contrario. Así se evita que la fuente tenga que estar en un lugar próximo al centro de curvatura del espejo, que puede ser un lugar de difícil acceso.

Un esquema de este método se muestra en la figura 12. Con este método se pueden medir tanto los errores de alineamiento de pistón como los cabeceos (tip-tilt) de cada segmento, así como sus aberraciones de órdenes bajos (utilizando reflectores en posiciones internas de los segmentos). Es preciso utilizar tantos retro-reflectores como puntos de la superficie del espejo se quiera muestrear. Al ser un método de medida de distancias absolutas, la influencia de las diferencias de camino óptico entre la fuente y el espejo debidas a la inhomogeneidad del aire

pueden jugar un papel importante. No son tan vulnerables a este problema los métodos basados en la medida de distancias relativas a puntos próximos en segmentos diferentes.

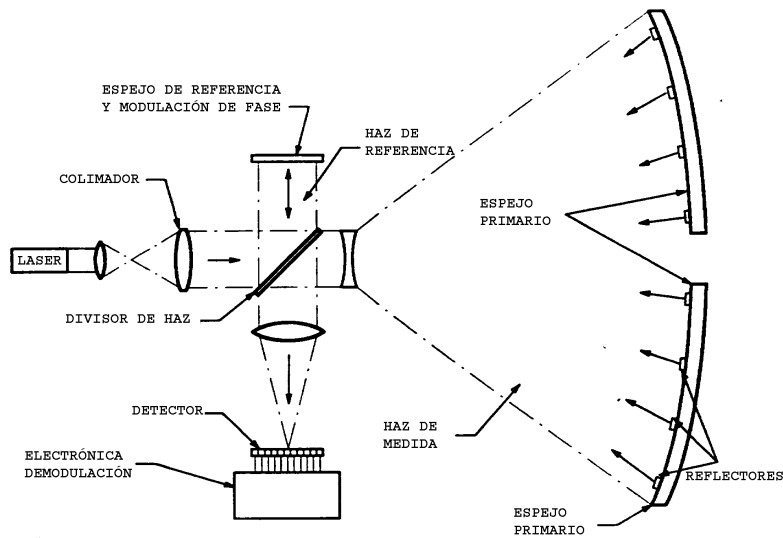


Figura 12: Método de Kishner. Esquema tomado de Kishner (1991).

Método de Horton Una posibilidad muy interesante es la que proponen Horton et al. (1990) de utilizar un interferómetro de cizalladura radial (radial shearing interferometer) como el que se muestra en la figura 13. En el foco

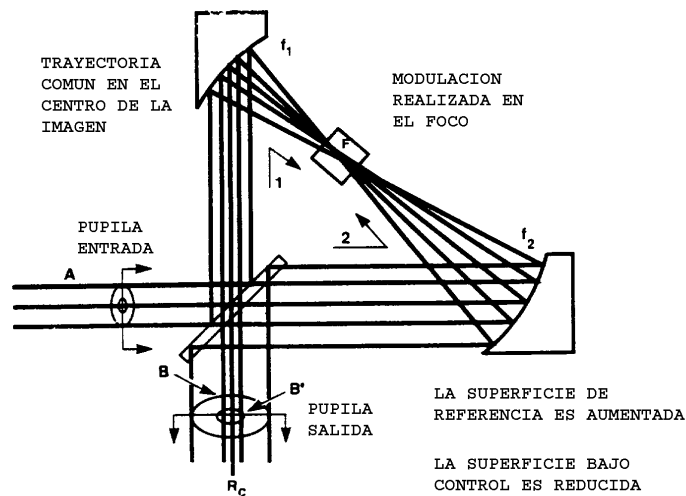


Figura 13: Interferómetro de cizalladura radial de Horton. Esquema tomado de Horton et al. (1990).

se introduce una lámina plano-paralela inclinada que introduce una inclinación relativa entre los dos haces colimados emergentes y al combinarse se observa un patrón de líneas rectas, que se observarán ligeramente desalineadas por efecto de los errores de pistón o cabeceo de los segmentos. Para poder automatizar el proceso de medida, se propone hacer rotar la lámina, lo que hace rotar también el patrón de líneas, y comparar la señal temporal de intensidad en dos puntos correspondientes a distintos segmentos. En el caso de tener turbulencia atmosférica, los autores reportan haber conseguido alinear con éxito un prototipo utilizando un procedimiento manual, pero se presentan problemas para hacer funcionar el algoritmo automático.

5.5.2 Medida del patrón de difracción en un plano lejano

En esta categoría se encuentran varios métodos que se fundamentan en el estudio de la imagen producida por una máscara de lentes situada en un plano conjugado a la pupila del telescopio.

Phasing Camera System (PCS) del Keck El sistema utilizado para el alineamiento de los segmentos de los telescopios Keck es el único actualmente operativo para la puesta en fase de un espejo segmentado de gran tamaño. El patrón de difracción lejano, en presencia de un salto de fase entre las dos mitades de una apertura tiene información acerca de la magnitud de este salto de fase. En la PCS del Keck se utiliza un sensor Shack-Hartmann para tomar muestras del salto de fase entre cada par de segmentos adyacentes. Para ello se utiliza una máscara en la que

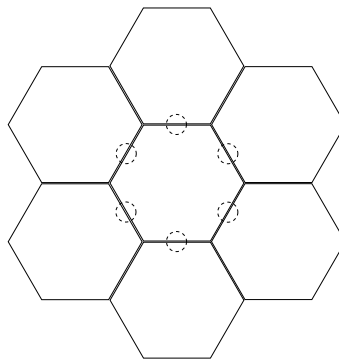


Figura 14: Máscara que define la posición de las lentes del sensor Shack-Hartmann para la puesta en fase de los segmentos del Keck.

las micro-lentes del sensor se sitúan en las fronteras entre segmentos (ver figura 14), en un plano que sea imagen reducida de la pupila. Las imágenes obtenidas se correlacionan con patrones obtenidos empíricamente o en una simulación, en los que es conocida la posición relativa de los segmentos.

El sistema de puesta en fase del Keck (PCS) opera en dos modalidades, con iluminación monocromática o policromática.

Con **iluminación monocromática** se consigue una mayor precisión en la medida a costa de limitar el rango dinámico. El rango de medida es limitado, puesto que dos situaciones en las que el desfase introducido difiera en un número entero de longitudes de onda son indistinguibles. Este problema se suele denominar *ambigüedad módulo 2π* de la determinación de la fase. La precisión alcanzada en la determinación de la posición de los segmentos por este método es de $6nm$ (Chanan, Troy, & Ohara 2000)

Con **radiación policromática** disminuye la coherencia espacial y, sobre todo, la distancia (medida como una longitud) con la que se encuentran desalineados los segmentos se traduce en diferentes diferencias de fase (medidas en radianes) para cada componente espectral de la radiación. De este modo se puede incrementar el rango dinámico hasta $\pm 30\mu m$, dependiendo de la configuración utilizada.

Otras alternativas Se han propuesto algunas alternativas basadas en el mismo principio.

Por ejemplo, Korhonen & Haarala (1988) proponen un procedimiento similar en el que en lugar de emplear una

sub-apertura por cada par de segmentos, se utilizan tres aperturas circulares dispuestas en los vértices de los tripletes de hexágonos (ver figura 15 a). La estructura bidimensional que se observa en la imagen permite obtener

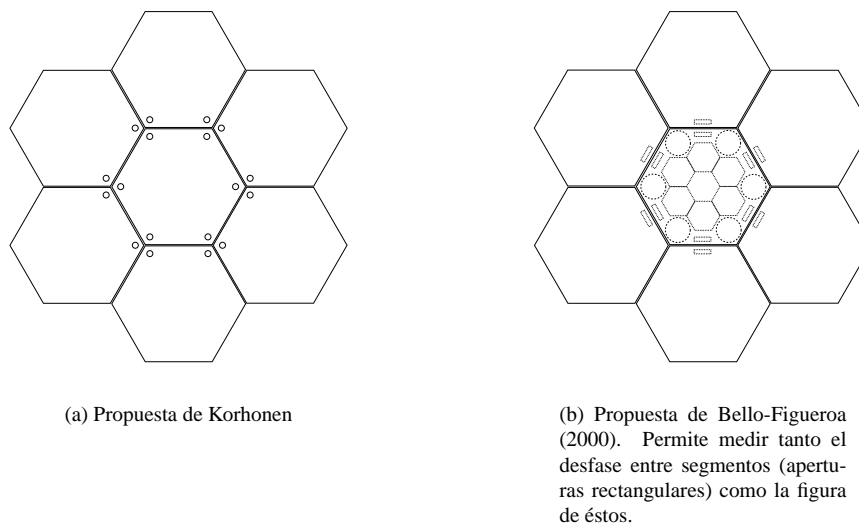


Figura 15: Máscaras alternativas para utilizar con el sensor Shack-Hartmann.

información de la posición relativa de los tres segmentos.

Para la cámara de adquisición y guiado del GTC se ha propuesto una geometría de lentes que permitirá medir tanto los errores de figura de los segmentos como el desfase relativo entre segmentos (Bello-Figueroa 2000). La medida del pistón relativo entre segmentos se efectúa de un modo análogo al de la PCS de los Keck, aunque en lugar de una apertura única entre segmentos se utilizará una doble apertura rectangular. De este modo se evita utilizar el borde de los segmentos. También se propone una modificación en el modo de extraer la información del pistón, midiendo la altura relativa de los dos primeros máximos del patrón de difracción resultante.

5.5.3 Medidas de intensidad en dos planos

Se han hecho varias investigaciones relacionadas con el sensor de curvatura o con la técnica de “phase diversity” como herramientas para la determinación de la posición en pistón de cada segmento.

Sensor de curvatura El primer trabajo en el que se investiga la aplicación del sensor de curvatura para la medida de errores de alineamiento de pistón en un espejo segmentado es el de Rodríguez-Ramos & Fuensalida (1997). Allí se plantea la utilización de la señal del sensor de curvatura para resolver directamente la fase en cada punto a partir de la medida de la laplaciana del frente de ondas. Los resultados preliminares obtenidos de este modo muestran la posible utilidad de esta técnica, aunque un estudio más detallado debe considerar el fenómeno de difracción que se produce debido a la existencia de las discontinuidades del frente de ondas. De este modo se podrá mejorar la interpretación de la señal del sensor de curvatura, que no puede ser calculada directamente a partir de la expresión (23), porque en su deducción no se consideró la existencia de discontinuidades en la fase del frente de ondas.

En un segundo trabajo, los mismos autores (Rodríguez-Ramos & Fuensalida 2000) investigan la utilización de la señal de curvatura integrada en el interior de los recintos hexagonales dados por la proyección del borde de cada segmento sobre los planos de observación. Para determinar la posición de cada segmento se compara la medida las señales integradas en cada hexágono con el resultado de una simulación, en la que por medio de un algoritmo iterativo se modifica la posición de los segmentos hasta que se obtengan los mismos resultados que en la medida. Es importante notar que el algoritmo iterativo se aplica a la simulación, no a la posición de los segmentos en el espejo, por lo que al final se obtiene una medida de la posición de cada segmento sin haberla modificado.

La distorsión atmosférica influye mucho en las medidas del sensor de curvatura. También se estudia la posibilidad de resolver este problema midiendo simultáneamente la señal de curvatura y las fases del frente de ondas en la pupila con un sensor Shack-Hartmann, de modo que en el algoritmo iterativo se pueda tener en cuenta la contribución

de la atmósfera.

Phase Discontinuity Sensing (PDS) Un método muy similar al anterior es el propuesto y probado en el telescopio Keck por Chanan, Troy, & Sirko (1999). En este caso la interpretación de la señal del sensor de curvatura se realiza correlacionando las medidas con plantillas obtenidas previamente en una simulación. Los autores del método, en lugar de obtener una medida directa de la posición de los segmentos, realizan varias iteraciones (entre cinco y diez) en las que se modifica la posición de los segmentos hasta llegar a una configuración final alineada. Para reducir el efecto de la turbulencia atmosférica, se utiliza una longitud de onda de $3.3\mu m$, en la que el parámetro de Fried r_0 tiene un mayor tamaño. Se consiguen resultados bastante buenos y consistentes con las medidas realizadas con el otro sistema utilizado en el Keck (Phasing Camera System descrito anteriormente).

El algoritmo se ha estudiado mediante simulaciones, en las que se consigue una precisión de 5 nm en condiciones atmosféricas normales (parámetro de Fried $r_0 = 20cm$ en el visible), suponiendo que la forma de los espejos es perfecta. También se han realizado varias pruebas experimentales. Una de ellas consiste en partir de una configuración alineada, modificar la posición de uno o varios segmentos y volver a aplicar el algoritmo para alinearlos. Caracterizando la diferencia entre las dos situaciones por la longitud de los actuadores de los segmentos, se obtienen errores menores de $40nm$ en pruebas sucesivas.

Phase diversity sensing A pesar del nombre similar al acuñado por los autores del método anterior, las dos técnicas difieren bastante. En este caso se trata de determinar las posiciones de los segmentos por la técnica de “phase diversity” descrita en el capítulo 3. Ésta consiste en estudiar dos imágenes, una obtenida con el detector en el foco del telescopio, y otra en la que se introduce una aberración conocida: una determinada distancia de desenfoque (aunque se podría utilizar cualquier otra pero esta es la más sencilla de conseguir). Después de resolver un sistema de ecuaciones no lineales se puede determinar el valor de los coeficientes del desarrollo de la fase del frente de ondas.

En un experimento llevado a cabo en el telescopio Keck para demostrar la viabilidad de esta técnica por Lofdahl et al. (1998) se obtiene un mal resultado, que justifican los autores por las malas condiciones atmosféricas en el momento del experimento. No obstante, se muestran optimistas respecto a la posibilidad de realizar la medida en mejores condiciones atmosféricas o con un sistema de óptica adaptativa en funcionamiento.

Otras alternativas Cuevas et al. (2000) propone una variante del método con sensor de curvatura. En su trabajo se generaliza la ecuación de Roddier (23), con la que se calcula la señal del sensor de curvatura, incluyendo los términos asociados a las aberraciones de pistón y cabeceo (tip-tilt) de cada segmento. La generalización de la ecuación se efectúa dando a las discontinuidades del frente de ondas un tratamiento similar a la teoría de funciones distribución y planteando una ecuación *ad-hoc* cuya validez se comprueba mediante simulaciones informáticas y un experimento de laboratorio. La deducción de Roddier de la ecuación del sensor de curvatura, válida en el límite de la óptica geométrica, no tiene en consideración los efectos de difracción que se pueden originar en un espejo primario segmentado.