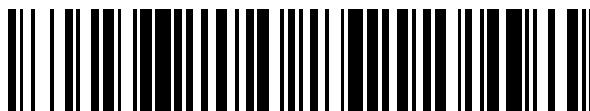


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 656 066**

51 Int. Cl.:

<b>G01M 11/00</b>	(2006.01)
<b>F24J 2/18</b>	(2006.01)
<b>F24J 2/16</b>	(2006.01)
<b>F24J 2/12</b>	(2006.01)
<b>H04N 5/225</b>	(2006.01)
<b>H04N 5/232</b>	(2006.01)
<b>F24J 2/38</b>	(2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **24.03.2015 PCT/EP2015/056248**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **01.10.2015 WO15144699**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.03.2015 E 15741795 (7)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.11.2017 EP 3123137**

54 Título: **Instalación concentradora de radiación cósmica equipada con un sistema de control de superficie óptica reflectante**

30 Prioridad:

**27.03.2014 FR 1452622**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**23.02.2018**

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (100.0%)  
3, rue Michel-Ange  
75016 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**HENAULT, FRANÇOIS y  
CALIOT, CYRIL**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 656 066 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Instalación concentradora de radiación cósmica equipada con un sistema de control de superficie óptica reflectante

5 El campo de la invención es el del control de las superficies óptimas reflectoras de una instalación concentradora de radiación cósmica, usado, por ejemplo, en una instalación concentradora de energía solar destinada a la producción de electricidad heliotérmica.

10 La conversión de la energía solar concentrada en electricidad doméstica o industrial es una de las vías más prometedoras para la producción de las energías renovables del siglo XXI. Las futuras centrales helioeléctricas estarán compuestas típicamente por un receptor 1 de calor instalado en la cúspide de una torre de varios cientos de metros de altura y por cientos o por miles de heliostatos colocados al nivel de la tierra que incluyen cada uno una superficie reflectora 2 de rayos incidentes 3 y que aseguran el seguimiento del sol y la concentración de su radiación según una dirección fija, hacia el receptor 1, como se muestra en la figura 1a; los heliostatos son orientables, el receptor es fijo. Pueden citarse otros tipos de concentrador de radiación cósmica, tales como un concentrador individual dirigido hacia la fuente de radiación mostrado en la figura 1b, pero que concentra la radiación hacia un receptor 1 según una dirección que varía con la orientación del concentrador (conjunto superficie reflectora concentradora 2-receptor 1: orientable), un horno solar de doble reflexión que incluye un campo de heliostatos planos orientables que incluyen cada uno una superficie plana 2b reflectora de rayos incidentes 3 y una superficie concentradora fija 2a que concentra la radiación hacia un receptor 1 fijo mostrado en la figura 1c, como el de Odeillo en Francia cuyas dimensiones se indican en la figura.

20 De entre los numerosos desafíos tecnológicos que quedan por encontrar figuran los del tiempo y de los esfuerzos consagrados al ajuste y al control de los heliostatos o más generalmente de las superficies ópticas reflectoras antes de la puesta en servicio operativa de la instalación y de su seguimiento regular en operación.

Cada superficie concentradora reflectora designada también espejo está segmentada generalmente en varias facetas o segmentos, pero no necesariamente. Es parabólica, incluso esférica o plana como se indica en los ejemplos anteriores.

25 Los principales defectos optomecánicos característicos de una superficie reflectora 2 (o 2a) concentradora de radiación cósmica, segmentada en facetas reflectantes 21 se representan en la figura 2; en esta figura se pueden ver dos facetas  $O_i$  y  $O_j$ . Los defectos optomecánicos se reparten sustancialmente en tres categorías:

- Los errores de superficie locales  $\delta l$  que representan el desvío con respecto a la forma parabólica o esférica ideal de la faceta reflectora. Pueden tener numerosos orígenes: calidad de fabricación, deformaciones por solicitaciones mecánicas, efectos del entorno... Son generalmente muy variables de una faceta a la otra.
- Los errores de orientación  $\delta r$  de las facetas entre sí; los defectos de posicionamiento según los ejes X, Y y Z tienen una influencia insignificante sobre el factor de concentración.
- Y finalmente, el error de apuntamiento global  $\delta p$  del heliostato o del concentrador, que se materializa en la adición de un plano medio inclinado con respecto al conjunto de las facetas.

35 En el caso de una superficie concentradora no segmentada en facetas, los errores de orientación  $\delta r$  de las facetas entre sí no tienen razón de ser; los defectos optomecánicos provienen, entonces, de los errores de superficie locales  $\delta l$  y del error de apuntamiento global  $\delta p$ .

40 Habiéndose identificado los defectos optomecánicos, el ajuste consiste en corregir la forma de los espejos 2 típicamente por medio de actuadores mecánicos situados en la parte trasera y que permiten según los casos modificar su orientación (asiento), su curvatura media o unos defectos de orden superior. Ahora bien, la experiencia adquirida sobre las instalaciones solares existentes (por ejemplo, en Francia la central THEMIS en Targassonne o el horno solar de 1.000 kW de Odeillo) deja presagiar que estas operaciones de medición de los errores y de ajuste podrían requerir varios meses o incluso años aplicando las técnicas actuales para una instalación de escala industrial de 10 megavatios o más. Además, estas operaciones precisan a veces ocupar el punto focal de la instalación que reduce, de este modo, el tiempo de funcionamiento de la caldera.

Estos defectos optomecánicos se miden ya sea efectuando unas mediciones en laboratorio, pero entonces la forma final de las facetas en funcionamiento no se conoce de manera precisa, ya sea efectuando unas mediciones sobre el terreno.

50 La mayor parte de las técnicas actuales, tales como la optimización del flujo recogido por un detector situado en el punto focal de la instalación o la observación a distancia de una diana en el plano focal alteran el funcionamiento de la instalación solar: estos métodos implican, en efecto, obstruir el acceso de los rayos solares a la caldera (= el receptor de calor). Se basan en una medición de iluminaciones en el plano diana del receptor (densidades de flujo), de las que se obtienen unas informaciones globales sobre la calidad de las superficies reflectantes, pero no permiten determinar, en concreto, los errores de superficie locales  $\delta l$ .

55 Otra solución consiste en usar una técnica de deflectometría (observación de una rejilla o de una red de franjas a través de las superficies reflectoras), pero esta no funciona para unas instalaciones tales como las descritas en

relación con las figuras 1b y 1c y se aplica a una configuración muy diferente de la del uso final, por ejemplo, en laboratorio o para un par de puntos no conjugados. Además, necesita un tratamiento de imágenes complejo, incluso imposible.

5 También se conoce el método de retrovisión que consiste en colocar un detector en el medio del plano diana a partir del cual se observan directamente las imágenes de la fuente de radiación o repartos de luminancia sobre la superficie reflectante, como se describe en la publicación de F. Hénault y C. Royère: "Concentration du rayonnement solaire: analyse et évaluation des réponses impulsionnelles et des défauts de réglage de facettes réfléchissantes", J. Optics 1989, vol. 20, n.º 5, p. 225-240. Pero este método no permite efectuar una medición cuantitativa de los errores de superficie locales  $\delta l$  y solo proporciona una medición vaga de los errores de orientación  $\delta r$  de las facetas entre sí.

Los documentos US 2013/202215 y US 5.982.481 describen unos sistemas y procedimientos de alineación de las facetas individuales de un concentrador, que usan una pluralidad de fuentes de radiación artificiales.

El documento US 7.667.833 describe un procedimiento de alineación de un concentrador solar cilindro-parabólico con receptor lineal, basado en el método TOP ("Theoretical Overlay Photographic").

15 En consecuencia, existe a día de hoy una necesidad de una instalación cuyas superficies reflectoras puedan controlarse sin alterar el funcionamiento de la instalación y esto en un tiempo reducido.

El principio de la invención consiste en observar, a partir de varios puntos de observación situados en la superficie diana de una instalación concentradora de radiación cósmica en funcionamiento, los repartos de luminancia visibles en la superficie de las superficies reflectoras y en deducir de ello unas informaciones cuantitativas sobre sus errores de superficie local, de apuntamiento y eventualmente de orientación.

Más precisamente, la invención tiene como objeto una instalación concentradora de radiación cósmica que proviene de un objeto celeste, equipada

- con una superficie óptica concentradora adecuada para reflejar la radiación cósmica incidente hacia una superficie diana O'X'Y' y susceptible de presentar unos errores locales de superficie y de apuntamiento y de orientación
- con un sistema de control de la superficie óptica reflectora.

Está principalmente caracterizada porque el sistema de control comprende:

- unos medios de adquisición de imágenes de la superficie óptica según diferentes puntos de vista  $M'_{mn}$  ( $x'_{mn}$ ,  $y'_{mn}$ ) situados en la superficie diana, variando m de 1 a M, variando n de 1 a N, de manera que se obtenga M x N imágenes de la superficie óptica iluminada por la radiación cósmica, con M puntos de vista según X' y N puntos de vista según Y', con  $M > 1$ ,  $N > 1$ ,  $M.N \geq 30$ ,
- y una unidad de tratamiento de las M.N imágenes adquiridas adaptada para
  - calcular las pendientes  $\delta\Delta(P)/\delta x$  y  $\delta\Delta(P)/\delta y$  para cada punto P(x, y) de la superficie óptica reflectora según:

$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} = g_x \varepsilon_0 \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{sign}(x'_{mn}) L(M'_{mn}, P)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L(M'_{mn}, P)}$$

$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial y} = g_y \varepsilon_0 \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{sign}(y'_{mn}) L(M'_{mn}, P)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L(M'_{mn}, P)}$$

35 siendo  $L(M'_{mn}, P)$  la luminancia en un punto de la imagen correspondiente al punto P(x, y) de la superficie óptica reflectora observada según el punto de vista  $M'_{mn}$ ,  $\varepsilon_0$  el radio angular aparente del objeto celeste,  $g_x$  y  $g_y$  unos coeficientes predeterminados y

40 ◦ determinar a partir de estas pendientes  $\delta\Delta(P)/\delta x$  y  $\delta\Delta(P)/\delta y$ , un error local de superficie  $\Delta P(x, y)$  en el punto P(x, y) de la superficie óptica reflectora.

Las principales ventajas de la invención son las siguientes:

- Permite medir los errores de ajuste, de apuntamiento y de superficie local de las superficies reflectoras *in situ* y efectuar unos controles regulares, sin alterar el funcionamiento de la instalación, tal como el proceso de

- producción de energía helioeléctrica.
- Permite controlar y ajustar el conjunto de las superficies reflectoras de la instalación en un tiempo lo más corte posible.
- Solo necesita un número limitado de puntos de observación  $M'_{mn}$ .

5 Los medios de adquisición de imágenes según diferentes puntos de vista pueden incluir varios dispositivos de adquisición de imágenes respectivamente situados en diferentes posiciones fijas o móviles en la superficie diana.

La superficie diana puede ser plana y, entonces, se designa plano diana.

10 Según una característica de la invención, la superficie óptica reflectora a controlar es orientable. En ese caso, los medios de adquisición de imágenes según diferentes puntos de vista incluyen al menos un dispositivo de adquisición de imagen situado en la superficie diana y unos medios de modificación de la orientación de la superficie óptica reflectora a controlar.

La superficie óptica reflectora está típicamente segmentada en facetas y la unidad de tratamiento está adaptada para determinar, además, unos errores de orientación de las facetas entre sí y un error de ajuste de cada faceta.

La superficie óptica reflectora está montada, por ejemplo, en un heliostato.

15 La superficie óptica reflectora es parabólica, incluso esférica o incluso plana.

La instalación concentradora de radiación cósmica puede incluir varias superficies ópticas reflectoras.

La radiación es, por ejemplo, solar o lunar.

20 La invención también tiene como objeto una central con torre o un concentrador individual o un horno solar de doble reflexión o un telescopio de Cherenkov que incluye una instalación concentradora de radiación cósmica tal como se describe.

Otras características y ventajas de la invención se mostrarán con la lectura de la descripción detallada que sigue, hecha a título de ejemplo no limitativo y con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

25 las figuras 1 ya descritas representan esquemáticamente diferentes tipos de instalación concentradora de radiación solar, una central con torre iluminada por un campo de heliostatos focalizadores (fig 1a), un concentrador individual dirigido hacia el sol (fig 1b), un horno solar de doble reflexión con un campo de heliostatos planos y un concentrador fijo (fig 1c),

la figura 2 ya descrita ilustra los principales errores característicos de una instalación concentradora de radiación cósmica con superficie reflectora segmentada en facetas,

30 las figuras 3 representan esquemáticamente las referencias de coordenadas y anotaciones científicas empleadas, en el caso de una vista de conjunto que incluye la fuente de radiación, la superficie concentradora y el plano diana (fig 3a) y al nivel de la instalación concentradora con la superficie concentradora, el plano diana en el que están situados diferentes puntos de vista de la superficie concentradora (cuatro en el ejemplo de la figura) y el plano de las imágenes de la superficie concentradora obtenidas a partir de estos puntos de vista (fig 3b),

35 las figuras 4 representan esquemáticamente diferentes ejemplos de realización de la invención en el caso de una superficie reflectora segmentada (8 segmentos o facetas en la figura) con una cámara móvil en el plano diana (fig 4a), una cámara fija barrida por la superficie reflectora orientable (fig 4b), varias cámaras fijas barridas por la superficie reflectora orientable (fig 4c), varias cámaras móviles barridas por la superficie reflectora orientable (fig 4d),

40 las figuras 5 ilustran la interpretación física del cálculo de los defectos optomecánicos según la invención a partir de un sol teórico gaussiano (fig 5a) y de un sol uniforme visto en la práctica (fig 5b),

la figura 6 es un organigrama que muestra las etapas de un ejemplo de tratamiento de los datos adquiridos a partir de diferentes puntos de vista según la invención,

45 las figuras 7 ilustran los resultados obtenidos para una instalación según la invención tal como se describe en la figura 1b con superficie reflectora segmentada orientable asociada a una cámara y representada esquemáticamente (fig 7a), con una secuencia de imágenes (fig 7b) obtenidas por la cámara, los errores reales, medidos y los errores de medición correspondientes presentados en falsos colores (fig 7c) y en tres dimensiones (fig 7d),

50 las figuras 8 ilustran los resultados obtenidos para una instalación según la invención tal como se describe en la figura 1a, con superficie reflectora segmentada orientable asociada a una cámara y representada esquemáticamente en las figuras 4, con una secuencia de imágenes (fig 8a) obtenidas por la cámara, los errores reales, medidos y los errores de medición correspondientes presentados en falsos colores (fig 8b) y en tres dimensiones (fig 8c).

De una figura a la otra, los mismos elementos se localizan por las mismas referencias.

55 En la continuación de la descripción, se tomará principalmente como ejemplo de instalación, una instalación concentradora de energía solar. Pero la invención se aplica igualmente a una instalación concentradora de energía

lunar, así como a las redes de telescopios Cherenkov usados para la astrofísica de las altas energías, cuyas especificaciones están cercanas a las exigidas para un concentrador solar. También se toma como ejemplo de superficie diana, un plano diana.

5 Los principales sistemas de coordenadas y anotaciones empleados en la continuación se indican en las figuras 3. Se usan sustancialmente tres referencias:

- La referencia  $O\alpha\beta\gamma$  de las coordenadas angulares en el cielo, donde el eje  $O\gamma$  está dirigido según el vector  $\vec{S}$  hacia el centro del sol (o hacia cualquier otro objeto celeste enfocado), y donde las direcciones cercanas están designadas por sus coordenadas angulares  $(\alpha, \beta)$ . En la práctica  $\alpha$  y  $\beta$  se consideran como unas cantidades del primer orden con respecto a 1.
- 10 - La referencia  $OXYZ$  que está asociada a la superficie concentradora móvil o fija, donde  $O$  es el centro de la superficie reflectora, el eje  $OZ$  dirigido según el vector  $\vec{N}$  es normal a la superficie en  $O$  y  $OX$  y  $OY$  son unos ejes perpendiculares a  $OZ$ . Los puntos  $P$  de la superficie reflectora están definidos por sus coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$ .
- 15 - La referencia  $O'X'Y'Z'$  que está asociada a un plano diana  $O'X'Y'$  (donde está colocado el receptor). El punto  $O'$  está definido como la intersección del rayo solar reflejado sobre la superficie reflectora en  $O$  y dirigido según el vector  $\vec{R}$ , con el plano diana; siendo  $F$  la distancia focal de la superficie concentradora, se tiene  $OO'=F$ . El eje  $O'Z'$  es normal al plano diana y no es necesariamente paralelo al vector  $\vec{R}$  (caso de los heliostatos de una central con torre, en concreto). Asimismo, los ejes  $OZ$  y  $O'Z'$  no son generalmente coincidentes, salvo en el caso de concentradores directamente apuntados hacia el sol, del que se representa un ejemplo en la figura 5. Los puntos  $M'$  del plano diana están definidos por sus coordenadas cartesianas  $(x', y')$ .

Se señalará que los vectores  $\vec{S}$ ,  $\vec{N}$  y  $\vec{R}$  están relacionados entre sí por la primera ley de Descartes para la reflexión.

Como se puede ver esto en la figura 3b, algunos puntos  $M'$  están anotados  $M'_{mn}$ , donde los índices  $m$  y  $n$  designan un número limitado de "puntos de vista" diferentes situados en el plano diana, con  $1 \leq m \leq M$  según el eje  $O'X'$  y  $1 \leq n \leq N$  según el eje  $O'Y'$ . Las coordenadas del punto  $M'_{mn}$  en el plano diana están anotadas  $(x'_{mn}, y'_{mn})$ . En el ejemplo de la figura 3b, se tienen cuatro puntos de observación:  $M = N = 2$ .

El principio general de la invención consiste en observar a partir de diferentes puntos de vista  $M'_{mn}$ , los repartos de luminancia  $L(M'_{mn}, P)$  reflejados por el conjunto de los puntos  $P$  de la superficie reflectora que se desean controlar, después ajustar regularmente. En estos puntos de observación  $M'_{mn}$  están colocados unos dispositivos de observación tales como unas cámaras CCD de tipo comercial eventualmente equipadas con zum, incluso de sencillas cámaras web, que enfocan las superficies reflectoras a controlar, designando  $M'_{mn}$  la posición del dispositivo de observación en el plano diana. Estos puntos de observación están situados, por supuesto, en el interior de la mancha de la imagen del sol (más generalmente del objeto celeste) en el plano diana; de entre estos puntos de observación, se puede encontrar el punto de concentración de la superficie concentradora, pero no necesariamente. Por extensión, también se designa por  $M'_{mn}$  el dispositivo de observación correspondiente. En lo que sigue, se toma como ejemplo de dispositivo de observación, una cámara.

Son posibles varias estrategias de observación, que difieren sustancialmente por el número y el tipo de movimientos aplicados a las superficies reflectoras y/o a las propias cámaras: cámara móvil en el plano diana, cámara fija barrida por la superficie reflectante móvil, sistema compuestos por varias cámaras fijas, estrategia de observación "mixta".

❖ Cámara móvil en el plano diana.

40 Según un primer modo de realización de la invención mostrado en la figura 4a, unas imágenes que representan las distribuciones 5 de luminancia  $L(M'_{mn}, P)$  para el conjunto de los puntos  $P$ , se acumulan desplazando una sola cámara (medios de adquisición de imágenes 4 = una sola cámara) sobre diferentes puntos de observación  $M'_{mn}$  situados en el plano diana, por medio de mecanismos asociados a esta cámara que permiten barrer todos los puntos de vista  $M'_{mn}$ . Sin embargo, esta solución presenta unos inconvenientes en cuanto a complejidad mecánica y de tiempo necesario para desplazar la cámara en el plano  $O'X'Y'$ , durante el cual la orientación del heliostato y, por lo tanto, de la superficie reflectora 2 habrá podido modificarse, con el fin de perseguir el recorrido del Sol. Además, en el caso de un concentrador parabólico móvil o fijo, como para un telescopio Cherenkov, altera el funcionamiento del receptor.

❖ Cámara fija barrida por el sistema concentrador de energía.

50 En la figura 4b se ilustra una alternativa a la solución anterior que solo implica una sola cámara. Consiste en aprovechar el hecho de que para unos pequeños cambios de orientación del heliostato y, por lo tanto, de la superficie reflectora 2 en su movimiento de seguimiento del sol, las distribuciones 5 de luminancia observadas son idénticas a las que se obtendrían desplazando la cámara hasta un punto de observación ficticio  $M'_{mn}$  situado en el plano diana. De ello resulta una ventaja decisiva con respecto a la solución anterior, ya que los heliostatos planos o focalizadores son, por construcción, capaces de seguir el recorrido del sol en el cielo con una relación de refresco del orden de algunos Hz, que permite, de este modo, efectuar una secuencia completa de adquisición de las imágenes  $L(M'_{mn}, P)$  5 mucho más rápidamente.

Es posible, igualmente, aprovechar la movilidad de los heliostatos (y, por lo tanto, de las superficies reflectoras 2) controlados en bucle abierto para dirigirlos hacia un plano diana O'X'Y' independiente del receptor. En el caso de una central de torre, el plano diana puede estar situado, en efecto, a algunos metros por debajo del volumen focal de la instalación, que permite que los heliostatos a controlar o a ajustar se dirijan ahí individualmente por turnos sin alterar el funcionamiento del receptor de calor. Asimismo, en el caso de un heliostato plano que ilumine el concentrador fijo de un horno solar de doble reflexión, los puntos dianas pueden estar situados en unas direcciones diferentes de la del eje del concentrador y localizados a unas distancias lo suficientemente alejadas en el paisaje. La estrategia es aplicable, igualmente, a los concentradores solares fijos o dirigidos hacia el sol, por poco que los puntos de observación  $M'_{mn}$  estén situados en el volumen focal, pero fuera del receptor que está situado, él mismo, en el centro de este volumen focal. Esta restricción no se aplica a los telescopios colectores de la radiación Cherenkov, ya que el centro del plano imagen se deja ahí tradicionalmente libre para instalar sus sistemas de calibración. Señalemos, finalmente, que, en todos los casos, es posible sacar provecho del movimiento natural del objeto observado (típicamente sol o luna llena), con el fin de ahorrar una de las dos rotaciones necesarias para su seguimiento en el cielo. Además, esta opción permite automatizar la secuencia de las tomas de vistas sincronizándolas (por un medio electrónico o informático) con los movimientos de los heliostatos: de este modo, se puede acortar sustancialmente el tiempo de adquisición de las imágenes.

Esta estrategia de observación está bien adaptada a un concentrador solar fijo de un horno solar y a los concentradores directamente servocontrolados sobre el sol. En estos dos casos (como en el de los telescopios Cherenkov), es preferible efectuar el control de las superficies reflectoras de noche, por ejemplo, sobre la luna llena, sin alterar el funcionamiento diurno de estos sistemas. Los telescopios Cherenkov demasiado sensibles a las luces parásitas, no pueden efectuar observaciones científicas durante las noches de luna llena: de este modo, el control podrá efectuarse durante la noche, con un sistema de observación simplificado y sin alterar el funcionamiento normal del telescopio.

En el caso del concentrador fijo de un horno solar, el barrido angular se realiza en la práctica por medio de los heliostatos planos que iluminan el concentrador (esto supone que sus ajustes se hayan optimizado, ellos mismos, previamente).

#### ❖ Sistema compuesto por varias cámaras fijas

En la figura 4c se ilustra una alternativa radical a los dos casos anteriores; consiste en disponer en el plano diana O'X'Y' tantas cámaras fijas como puntos de vista  $M'_{mn}$  necesarios (medios de adquisición de imágenes  $4 = M.N$  cámaras fijas), que permite, de este modo, adquirir los diferentes repartos de luminancia  $L(M'_{mn}, P)$  5 simultáneamente. Esta estrategia de observación presenta las siguientes ventajas e inconvenientes.

#### Ventajas:

- La simultaneidad de las adquisiciones de imágenes 5 permite congelar los movimientos del sol o de la luna en el cielo y, de este modo, mejorar la precisión de medición global.
- Permite, igualmente, evitar unos tratamientos digitales pesados destinados a corregir las imágenes  $L(M'_{mn}, P)$  5 en función de su instante de adquisición si el tiempo de medición necesario para las estrategias descritas anteriormente es demasiado largo (típicamente superior a 5 minutos).

#### Inconvenientes:

- El inconveniente mayor es indiscutiblemente el coste total del material necesario, que resulta del aumento significativo del número de cámaras necesarias.
- Además, para obtener las adquisiciones simultáneas, se hace necesario asegurar la sincronización temporal de las adquisiciones efectuadas por las diferentes cámaras, que complica, de este modo, el control informático del sistema de mediciones.
- Finalmente, los ejes de enfoque de las cámaras deben estar ajustados en orientación, con el fin de converger hacia las superficies reflectoras controladas, que implica eventualmente una complejidad mecánica suplementaria.

Al igual que la anterior, esta estrategia es conveniente particularmente bien para los heliostatos de las centrales con torre de reflexión sencilla. Parece más difícil de implementarse sobre los concentradores solares directamente apuntados sobre el sol o los hornos solares de doble reflexión (respectivamente mostrados en las figuras 1b y 1c), debido al número necesario de cámaras dispuestas en la cercanía del volumen focal.

#### ❖ Estrategia de observación "mixta"

Con el fin de beneficiarse de las ventajas ofrecidas por los dos modos de realización anteriores (uso de un número limitado de cámaras sin sacrificar la rapidez de la secuencia completa de adquisición), parece natural combinar las dos estrategias, así como se ilustra, por ejemplo, en la figura 4d: en este caso, se dispone una línea de cámaras fijas según el eje horizontal O'X' en unos puntos de observación que se anotarán  $M'_{m1}$ . (medios de adquisición de imágenes  $4 = 4$  cámaras en línea). Los puntos de vista suplementarios  $M'_{mn}$  (con  $n \neq 1$ ) se obtienen por medio del movimiento de rotación en altitud de los heliostatos. Alternativamente, las cámaras pueden alinearse verticalmente y

barrerarse por unos movimientos de rotación en azimut. De manera más general, se puede combinar un reparto discreto de las cámaras de observación en el plano diana O'X'Y' con una secuencia de barrido de los heliostatos optimizada en altitud y en azimut.

5 La estrategia de observación mixta parece perfectamente aplicable a los heliostatos focalizadores de una central con torre o de la superficie concentradora de un horno solar y a los heliostatos planos de un horno solar de doble reflexión. En el caso de un horno solar, se forman unas imágenes de la superficie concentradora para controlar los defectos de esta superficie concentradora y se forman unas imágenes de los heliostatos planos, de manera que se controlen sus defectos.

10 Señalemos para terminar que la limitación de no alterar el funcionamiento de la instalación solar puede respetarse gracias a dos estrategias diferentes:

- 15
- 1)- Uso de un plano diana distinto del del receptor y
  - 2)- Mediciones efectuadas de noche apuntando a la Luna Llena. En efecto, la luna llena es, igualmente, una excelente fuente observable para el ajuste y los controles de heliostatos planos o focalizadores pilotados en bucle abierto: la observación de la luna llena, cuyo diámetro aparente está cercano al del sol, permite, en efecto, realizar todas las operaciones de caracterización de los defectos optomecánicos durante la noche, que permite, de este modo, efectuar la optimización de los espejos y de los heliostatos todavía más rápidamente.

Las fuentes observadas pueden ser indiferentemente el sol durante el día o la luna llena durante la noche.

Sea el que sea el modo de realización de la invención, presenta las siguientes ventajas:

- 20
- un número limitado de cámaras CCD de tipo comercial, incluso de sencillas cámaras web.
  - Medición de las superficies reflectoras *in situ* usando de la mejor manera sus capacidades naturales de seguimiento de los movimientos del sol o de la luna.

La continuación del proceso de control y de ajuste de las superficies reflectoras consiste principalmente en un tratamiento digital innovador de los datos adquiridos, que es objeto de la siguiente sección.

25 El principio general de la explotación de las imágenes puede aplicarse intuitivamente a partir de las figuras 3b y 5. Supongamos en un primer momento que la superficie aparente del sol se presenta como un disco de perfil Gaussiano caracterizado por la ley de luminancia angular  $L(\alpha, \beta)$ :

$$L(\alpha, \beta) = L_0 \exp\left[-(\alpha^2 + \beta^2)/2\varepsilon_0^2\right], \quad (1)$$

30 donde  $\varepsilon_0$  es el radio angular aparente del sol (mostrado también en las figuras 1) y  $L_0$  la luminancia en su centro. Consideremos ahora un dispositivo de observación  $M'_{mn}$  cuya posición está referenciada por las coordenadas  $(x'_{mn}, y'_{mn})$  en el plano diana O'X'Y' y a partir del cual se enfocan simultáneamente todos los puntos P de la superficie reflectora. Si los defectos optomecánicos del espejo en el punto P de coordenadas  $(x, y)$ , que incluye los errores de superficie local, de orientación y de apuntamiento, se representan por la función  $\Delta(P) = \Delta(x, y)$ , entonces, los rayos procedentes del sol reflejados en el punto P y recogidos por el dispositivo de observación  $M'_{mn}$  tienen como coordenadas angulares en la referencia  $O\alpha\beta\gamma$  de la figura 3a:

$$\alpha \approx -\frac{x'_{mn}}{F} + 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial x}$$

$$\beta \approx -\frac{y'_{mn}}{F} + 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y} \quad (2)$$

35

40 donde F es la distancia focal de la superficie reflectora concentradora y donde el par  $(\alpha, \beta)$  y los ángulos de incidencia sobre el espejo pueden considerarse como pequeños en el marco de una aproximación del primer orden (Esto se verifica siempre para los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ ; cuando esto no se verifica para los ángulos de incidencia sobre los heliostatos de una central con torre, esta restricción no altera en nada las prestaciones). A partir de las relaciones (1-2), se puede determinar entonces la expresión de las luminancias solares  $L(M'_{mn}, P)$  observadas de los puntos  $M'_{mn}$  y deducir de ello las relaciones que las relacionan con las derivadas parciales de los defectos optomecánicos del espejo  $\Delta(P)$ .  $L(M'_{mn}, P)$  es la luminancia en un punto de la imagen correspondiente al punto P(x, y) de la superficie óptica observada según el punto de vista  $M'_{mn}$ .

45 En el caso particular de cuatro puntos de vista  $M'_{11}, M'_{12}, M'_{21}$  y  $M'_{22}$  situados en las esquinas de un rectángulo en el plano diana de longitud  $2\delta x'$  según el eje X' y  $2\delta y'$  según el eje Y' como se indica en la figura 3b, las coordenadas de los cuatro puntos de vista  $M'_{11}, M'_{12}, M'_{21}$  y  $M'_{22}$  en el plano O'X'Y' se escriben, por lo tanto, respectivamente  $(-\delta x', -\delta y')$ ,  $(-\delta x', \delta y')$ ,  $(\delta x', -\delta y')$  y  $(\delta x', \delta y')$ . Trasladando estas coordenadas a las relaciones (2), después insertando estas

últimas en la ley de luminancia solar (1), se obtiene un sistema de cuatro ecuaciones con dos incógnitas  $\delta\Delta(P)/\delta x$  y  $\delta\Delta(P)/\delta y$ :

$$L(M'_{11}, P) = L_0 \exp \left[ -\frac{1}{2\varepsilon_0^2} \left[ \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} + \frac{\delta x'}{F} \right)^2 + \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} + \frac{\delta y'}{F} \right)^2 \right] \right],$$

$$L(M'_{12}, P) = L_0 \exp \left[ -\frac{1}{2\varepsilon_0^2} \left[ \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} - \frac{\delta x'}{F} \right)^2 + \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} + \frac{\delta y'}{F} \right)^2 \right] \right],$$

$$L(M'_{21}, P) = L_0 \exp \left[ -\frac{1}{2\varepsilon_0^2} \left[ \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} + \frac{\delta x'}{F} \right)^2 + \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} - \frac{\delta y'}{F} \right)^2 \right] \right],$$

$$L(M'_{22}, P) = L_0 \exp \left[ -\frac{1}{2\varepsilon_0^2} \left[ \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} - \frac{\delta x'}{F} \right)^2 + \left( 2 \frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} - \frac{\delta y'}{F} \right)^2 \right] \right].$$

Tomando los logaritmos neperianos a la izquierda y a la derecha del signo = en cada relación, se obtiene un sistema lineal de cuatro ecuaciones con dos incógnitas que se resuelven analíticamente en el sentido de los mínimos cuadrados. De este modo, se encuentran las relaciones (3):

$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} = -\frac{F \varepsilon_0^2}{4 \delta x'} \log \left[ \frac{L(M'_{22}, P) L(M'_{12}, P)}{L(M'_{21}, P) L(M'_{11}, P)} \right]$$

$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial y} = -\frac{F \varepsilon_0^2}{4 \delta y'} \log \left[ \frac{L(M'_{22}, P) L(M'_{21}, P)}{L(M'_{12}, P) L(M'_{11}, P)} \right], \quad (3)$$

Desde un punto de vista físico, el principio del método consiste en usar el perfil de luminancia del disco solar (hasta este momento se supone Gaussiano), descentrado con respecto a las direcciones de observación teóricas definidas por los puntos  $M'_{mn}$  por el efecto de los defectos optomecánicos  $\Delta(P)$ . Se pueden calcular entonces estos defectos a partir de las diferencias de luminancia medidas en los puntos  $M'_{mn}$  como se ilustra en la figura 5a. En esta figura se representan las mediciones efectuadas en dos puntos de observación  $M'_{11}$  y  $M'_{12}$  sobre un espejo bien alineado (= puntos negros) y las mediciones efectuadas sobre un espejo desalineado (= puntos blancos).

Pero, en realidad, la ley de luminancia solar solo es Gaussiana raramente, aunque esto se produzca por ciertas coberturas nubladas. En el caso de un perfil no gaussiano, pero monótono decreciente del centro hacia el borde, se obtienen las relaciones matemáticas más generales

$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} = g_x \varepsilon_0 \frac{L(M'_{22}, P) - L(M'_{21}, P) + L(M'_{12}, P) - L(M'_{11}, P)}{L(M'_{22}, P) + L(M'_{21}, P) + L(M'_{12}, P) + L(M'_{11}, P)}$$

$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial y} = g_y \varepsilon_0 \frac{L(M'_{22}, P) - L(M'_{12}, P) + L(M'_{21}, P) - L(M'_{11}, P)}{L(M'_{22}, P) + L(M'_{21}, P) + L(M'_{12}, P) + L(M'_{11}, P)}, \quad (4)$$

donde  $g_x$  y  $g_y$  son unos coeficientes de ganancia según los dos ejes X e Y. Los valores numéricos de estos coeficientes dependen, evidentemente, de los de los parámetros  $\varepsilon_0$ ,  $\delta x'$  y  $\delta y'$ , pero, igualmente, de la ley de luminancia del objeto observado en el momento de las mediciones. Este es el motivo por el que, en la práctica, se determinan los valores de  $g_x$  y  $g_y$  experimentalmente.

Finalmente, en el caso más corriente donde el perfil del sol es uniforme, como se ilustra en la figura 5b, las ecuaciones anteriores no dan unos resultados satisfactorios. En efecto, las pendientes del perfil del sol que están directamente relacionadas con las derivadas parciales de las pendientes de la superficie reflectora  $\delta\Delta(P)/\delta x$  y  $\delta\Delta(P)/\delta y$  son demasiado pronunciadas.



La solución según la invención se basa en un aumento del número de puntos de observación. Entonces, esto equivale a extender las relaciones (4) al caso de M x N puntos de observación diferentes de posición conocida (con MxN>4), repartidos en el plano diana; estos M x N puntos de observación están situados ventajosamente sobre una rejilla regular centrada sobre el punto O'. Entonces, estas nuevas relaciones se escriben:

$$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial x} = g_x \varepsilon_0 \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{sign}(x'_{mn}) L(M'_{mn}, P)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L(M'_{mn}, P)}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial y} = g_y \varepsilon_0 \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{sign}(y'_{mn}) L(M'_{mn}, P)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L(M'_{mn}, P)}$$

donde la función analítica sign(u) es igual a u/|u|. La interpretación física de estas últimas relaciones se ilustra en la figura 5b: gracias a la acumulación de los diferentes puntos de vista M'\_{mn}, permiten, en efecto, transformar el sol real, que se presenta con frecuencia como un disco de luminancia uniforme, en un "sol ficticio" con pendientes suavizadas. Esto último puede comprenderse como el producto de una convolución de la ley uniforme de luminancia solar con una distribución que representa las posiciones de los puntos de observación M'\_{mn} en el plano diana. La curva de luminancia del sol ficticio generada de este modo presenta entonces unas pendientes menos pronunciadas, compatibles con las ecuaciones (5).

La lógica de conjunto del tratamiento de datos se presenta en el organigrama de la figura 6. Puede descomponerse en seis etapas principales.

A) Reorganización de la secuencia de las imágenes adquiridas 5. Esta etapa es opcional y depende, de hecho, de las diferentes estrategias de observación que se han presentado. El caso más sencillo es, evidentemente, el de una sola y única cámara móvil en el plano focal, donde las coordenadas x'\_{mn} e y'\_{mn} se reenvían directamente por los mecanismos de desplazamiento de la cámara y donde las relaciones (5) pueden aplicarse tal cual. En todos los otros casos, es necesario reconstituir las coordenadas ficticias de los puntos de observación virtuales M'\_{mn} a partir de datos característicos de la secuencia de observación, tales como la dirección del sol (ella misma función de las fecha y hora de medición), la posición y el movimiento de los heliostatos y la ubicación de las cámaras en el plano diana.

B) Suma de las imágenes y de sus derivadas parciales. Esta etapa consiste en calcular las dobles sumas de los numeradores y denominador en las relaciones (5). En función del contorno geométrico de las superficies observadas, se puede restringir, igualmente, el campo de observación de los puntos M'\_{mn} a una zona circular de radio cercano a F. ε0.

C) Normalización de las sumas calculadas durante la etapa anterior. En este caso, se trata de un proceso opcional: en función del número total de imágenes adquiridas a partir de los puntos M'\_{mn}, sus sumas ponderadas calculadas durante la etapa anterior pueden presentar un aspecto "granuloso", con unas roturas de pendientes que corresponden a los contornos de la imagen del disco solar que se desplaza en la superficie de los espejos. Entonces, es posible normalizar estas imágenes por medio de un filtro (Gaussiano u otro), con el fin de "suavizar" el perfil del sol ficticio de la figura 5b. Esta opción se muestra particularmente útil cuando el número total de los puntos M'\_{mn} es poco elevado (típicamente inferior a 10x10).

D) Cálculo de las pendientes δΔ(P)/δX y δΔ(P)/δY de la superficie reflectora. En este caso, se aplican directamente las relaciones analíticas definidas por las ecuaciones (5), con el fin de medir las derivadas parciales δΔ(P)/δX y δΔ(P)/δY de los defectos optomecánicos. Esto necesita que se identifiquen, experimentalmente, por ejemplo, los valores óptimos de los coeficientes de ganancia g\_x y g\_y que figuran en las relaciones (5).

E) Determinación de los defectos optomecánicos Δ(P) a partir de sus pendientes. Por supuesto, es posible determinar los defectos optomecánicos de los espejos Δ(P) a partir de sus derivadas parciales determinadas en la etapa anterior. Esto es, de hecho, un problema tradicional de óptica adaptativa que fue debatido - entre otros - por Southwell en la publicación: "Wave-front estimation from wave-front slope measurements", J. Opt. Soc. Am. Vol. 70, p. 998-1.006. En este caso, hemos usado la "reconstrucción zonal de tipo A" descrita en el artículo original.

F) y G) Cálculo de los errores de superficie δl, de los errores de orientación δr de las facetas entre sí o de los errores de apuntamiento globales δp del espejo. Estos cálculos pueden llevarse de dos maneras diferentes, así como se representa en el organigrama: en primer lugar, es posible (etapa G) estimar las pendientes de las diferentes facetas del espejo segmentado a partir de los defectos de superficie Δ(P) medidos durante la etapa

anterior, por ejemplo, por medio de una descomposición en polinomios de Zernike que permiten calcular los errores angulares y los defectos de focalización.

5 Es posible, igualmente, (etapa F) calcular directamente los errores de orientación  $\delta r$  promediando los valores de las derivadas parciales  $\delta\Delta(P)/\delta X$  y  $\delta\Delta(P)/\delta Y$  medidos en la superficie de las facetas individuales durante la etapa D. En todos los casos, los errores de apuntamiento  $\delta p$  de la superficie reflectora pueden estimarse como las medias aritméticas de los errores que afectan a cada faceta individual. La principal diferencia entre los dos procesos que se han probado ambos dos en las simulaciones digitales presentadas en la siguiente sección, reside sustancialmente en su tiempo de cálculo efectivo y en la naturaleza de las informaciones buscadas (errores de alineación, desfocalización, defectos de orden superior...).

10 El conjunto de las operaciones de medición de los errores de superficie local  $\delta l$ , de ajuste  $\delta r$  y de apuntamiento  $\delta p$  de las superficies reflectoras de los heliostatos puede automatizarse completamente.

Habiendo determinado los errores, estos se convierten en instrucciones de ajuste de las superficies reflectoras, que pueden ejecutarse manual o automáticamente si la superficie concentradora está equipada con actuadores controlados.

15 Con el fin de validar estos métodos de optimización de las superficies reflectoras, se han realizado varias simulaciones numéricas de las prestaciones de sistemas concentradores de energía solar. Se estudian dos tipos principales de concentradores: en primer lugar, un concentrador parabólico segmentado directamente servocontrolado sobre el sol, después, un heliostato focalizador situado en el campo de una central con torre helioeléctrica.

20 Caso de un concentrador parabólico:

Consideremos primero el caso de un concentrador parabólico directamente servocontrolado sobre el sol (Este caso es aplicable, igualmente, a los telescopios colectores de radiación Cherenkov) mostrado en la figura 7a (que corresponde al caso de la figura 1b para el cual el ángulo de incidencia de los rayos cósmicos entre los

25 vectores  $\vec{S}$  y  $\vec{N}$  es casi nulo: se tiene  $\vec{S} = \vec{N} = \vec{R}$  ) o iluminado por uno o varios heliostatos planos (caso de un horno solar, figura 1c). Son, en general, unos sistemas concentradores de muy gran apertura numérica, cuyos unos parámetros típicos se dan en la segunda columna de la tabla 1 de más abajo. En esta tabla se indican, igualmente, las características principales del dispositivo de medición (zona a barrer y número de puntos de medición en el plano diana), así como las de los defectos optomecánicos a medir. En las simulaciones numéricas, estos defectos se modelizan por unas tiradas aleatorias cuyos desvío-tipos se indican en las tres

30 últimas líneas de la tabla:

Se introducen los errores aleatorios  $\delta r$  de alineación de las facetas alrededor de los ejes X e Y del concentrador ("tip-tilt") para unas leyes normales de desvío-tipo 2 mrad.

35 Finalmente, se simulan los errores locales de superficie  $\delta l$  de las facetas por los desvíos sobre sus radios de curvatura R y sus coeficientes de asferización  $\epsilon$  indicados en la tabla (tomando para esta faceta parabólica, los valores teóricos del radio de curvatura y del coeficiente de asferización respectivamente iguales a  $R = 20$  m y  $\epsilon = -1$ ), que se eligen como medias de las leyes de error Gaussianas. Esto permite introducir unos errores de forma que van hasta el cuarto orden.

Se tiene  $\delta p=0$ .

Tabla 1:

PARÁMETROS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS	Concentrador parabólico	Heliostato focalizador
Dimensiones de la superficie reflectora concentradora	Diámetro 5 m	7 x 6 m <sup>2</sup>
Distancia focal de la superficie reflectora concentradora	10m	100 m
Apertura numérica de la superficie reflectora concentradora	F/2	F/11
Número de facetas	18	4 x 2
Dimensiones de las facetas	Diámetro 1 m	1,4 x 2,8 m <sup>2</sup>
Superficie barrida en el plano diana	0,1 x 0,1 m <sup>2</sup>	0,7 x 0,7 m <sup>2</sup>
Número de puntos de observación	24 x 24	24 x 24
Desvío-tipo de los errores $\delta r$ de orientación de las facetas	2 mrad	0,5 mrad
Desvío-tipo de los errores de radio de curvatura	0,5 m	-
Desvío-tipo de los errores sobre el coeficiente de asferización	0,5	-

Teniendo en cuenta el conjunto de los parámetros anteriores, la figura 7b reproduce una secuencia de adquisición de 32 imágenes L(M'mn, P) vistas del plano diana, extraídas de la secuencia completa de las 24 x 24 imágenes simuladas por un software de trazado de rayos. Aunque todos los cálculos numéricos se efectúen en este caso con una ley de luminancia solar uniforme, la figura 7b presenta las imágenes que se observarían enfocando la luna llena, con el fin de ayudar para la comprensión e, igualmente, por un motivo estético. En la figura, se indica por unas flechas una secuencia posible de barrido temporal.

Los resultados obtenidos para el cálculo de las pendientes según los ejes X e Y y para determinar los defectos optomecánicos Δ(P), se presentan en la mitad superior de la tabla 2 de más abajo. En ella se cuantifican en cuanto a errores Pico-Valle (PTV) y a desvíos-tipo (RMS) que caracterizan a los defectos optomecánicos reales (primera columna), medidos estos, efectivamente, por el sistema (segunda columna), así como sus diferencias absolutas y relativas (tercera y cuarta columnas). En las figuras 7c y 7d se representan, igualmente, en falsos colores y en tres dimensiones unas vistas de estos diferentes mapas de defectos. Los resultados obtenidos para la medición de las pendientes parecen particularmente prometedores, puesto que los errores PTV y RMS son inferiores a un 15 y un 6 % respectivamente. Pero es razonable esperar que al final de una nueva secuencia de realineación, después de control del concentrador según el mismo proceso, estas cifras podrán mejorarse todavía de manera significativa. Se constata en los mapas de error de medición presentados en los paneles superiores derechos de las figuras 7c y 7d, que los errores locales de superficie δl y los errores de orientación δr han desaparecido.

También se ha observado que unos errores de posicionamiento axial sobre cada una de las facetas de la superficie reflectora ("pistones") no alteran el cálculo de las pendientes.

Tabla 2:

	REALES		MEDICIONES		ERRORES DE MEDICIÓN		ERRORES RELATIVOS (%)		
	PTV	RMS	PTV	RMS	PTV	RMS	PTV	RMS	
<b>Concentrador parabólico</b>	6,43	1,09	5,40	0,75	5,97	1,24	92,9	113,3	Δ(P)(mm)
	6,20	1,10	6,81	1,10	0,84	0,12	13,5	10,7	Pendientes según X (mrad)
	3,93	1,05	4,23	1,04	0,58	0,06	14,8	5,7	Pendientes según Y (mrad)
<b>Heliostato focalizador</b>	10,52	1,77	6,92	1,03	5,27	0,75	50,1	42,6	Δ(P)(mm)
	7,28	1,66	4,40	0,86	0,40	0,04	5,5	2,5	Pendientes según X (mrad)
	5,88	1,31	4,40	1,01	0,35	0,05	6,0	3,9	Pendientes según Y (mrad)

Para concluir, los errores de medición de los defectos optomecánicos Δ(P) de una superficie concentradora de energía solar de gran apertura numérica, tales como se han simulado en este caso, parecen muy satisfactorios y compatibles con las prestaciones buscadas sobre este tipo de instalación.

Caso de un heliostato focalizador:

Consideremos una superficie reflectora de un heliostato focalizador situado en el campo de una central con torre. Este caso es más general, pero también más complejo que el de los concentradores directa (o indirectamente en el caso de un horno solar iluminado por sus heliostatos planos) apuntados hacia el sol, ya que el heliostato debe asegurar entonces una doble función: por una parte, seguir el sol en su movimiento diurno en el cielo y, por otra parte, asegurar la concentración de los rayos sobre el receptor (la caldera) situado en la cúspide de la torre. La principal consecuencia es que los vectores  $\vec{S}$  y  $\vec{N}$  que referencian las direcciones del sol y de la normal con superficie reflectora del heliostato (véase la figura 3a) se llevan a cambiar constantemente de orientación: por lo tanto, ya no se tiene  $\vec{S} = \vec{N} = \vec{R}$ . La forma óptima de superficie reflectora del heliostato se define entonces empíricamente como una parábola de radio de curvatura igual a dos veces su distancia a la caldera. Pero este tipo de superficie reflectora presenta dos aberraciones geométricas intrínsecas, denominadas de coma y de astigmatismo, cuyas amplitudes aumentan fuertemente con las dimensiones del heliostato y el valor del ángulo de incidencia entre los vectores  $\vec{S}$  y  $\vec{N}$ . En consecuencia, las relaciones (2) se escriben a partir de ahora:

$$\alpha \approx -\frac{x'_{mn}}{F} + 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial x} + \frac{\partial \Delta_{\text{Coma}}(P)}{\partial x} + \frac{\partial \Delta_{\text{Astig}}(P)}{\partial x}$$

$$\beta \approx -\frac{y'_{mn}}{F} + 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y} + \frac{\partial \Delta_{\text{Coma}}(P)}{\partial y} + \frac{\partial \Delta_{\text{Astig}}(P)}{\partial y} \quad (6)$$

donde los parámetros suplementarios  $\Delta_{\text{Coma}}(P)$  y  $\Delta_{\text{Astig}}(P)$  designan las aberraciones "naturales" de coma y de astigmatismo del heliostato focalizador. Por lo tanto, es necesario eliminar estas aberraciones durante el tratamiento de datos. En la práctica, esto implica sustraerlas en las pendientes y defectos optomecánicos calculados durante las etapas D y E del proceso de tratamiento de datos descrito en relación con el organigrama de la figura 6. El cálculo de los errores de frente de onda  $\Delta_{\text{Coma}}(P) + \Delta_{\text{Astig}}(P)$  y sus pendientes de referencia, es decir, suponiendo la superficie reflectora del heliostato perfectamente esférica y exenta de errores de orientación  $\delta r$  y de superficie  $\delta l$ , puede efectuarse con la ayuda de los software de trazado de rayos ya usados para simular las imágenes  $L(M'_{mn}, P)$  de las figuras 7b y 8a. Los mapas de referencia dependen, evidentemente, de los parámetros generales de la configuración estudiada: posición del sol en el cielo, ubicación del heliostato en el campo de la central con torre, coordenadas de la diana, distancia focal de la superficie reflectora del heliostato, etc.

Los principales resultados obtenidos se presentan de la misma manera que para el ejemplo anterior. Los parámetros geométricos de la superficie reflectora del heliostato se dan en la tercera columna de la tabla 1. En este caso, se introducen solamente los errores de orientación de las facetas de la superficie reflectora del heliostato, de desvío tipo igual a 0,5 mrad. Con el fin de demostrar todo el potencial del método, nos hemos colocado en una configuración geométrica más bien desfavorable, donde los ángulos de incidencia solar sobre la superficie reflectora del heliostato son del orden de 25 grados, que generan, de este modo, unas fuertes aberraciones naturales de coma y de astigmatismo. En la figura 8a se representa una secuencia de imágenes  $L(M'_{mn}, P)$  observadas en la superficie del heliostato que enfoca a la luna llena.

Los errores de medición de los defectos optomecánicos  $\Delta(P)$  y de sus pendientes según los ejes X e Y en cuanto a errores Pico-Valle y RMS se presentan en la mitad inferior de la tabla 2. Las vistas en falsos colores y en tres dimensiones de los mapas de error calculados se reproducen en las figuras 8b y 8c. El aspecto general de estas figuras es semejante al de la sección anterior, con la excepción de sus primeras líneas que muestran las aberraciones naturales de coma y de astigmatismo de la superficie reflectora ideal del heliostato.

Finalmente, los errores  $\delta r$  de medición de los desajustes en altitud y en azimut de las ocho facetas de la superficie reflectora del heliostato focalizador efectuados al final de dos iteraciones de la secuencia de control y de ajuste, se indican en la tabla 3. El conjunto de estas cifras y de las representaciones gráficas permite sacar las siguientes conclusiones:

- Los errores de medición Pico-Valle y RMS de las pendientes de la superficie del heliostato focalizador son todavía mejores que los del concentrador parabólico, siendo respectivamente inferiores a un 6 y un 4 %. Esto se debe probablemente en parte a la escasa apertura numérica del heliostato (en este caso F/11).
- Además, los errores relativos sobre las desalineaciones angulares de las facetas de la superficie reflectora del heliostato son del orden de un 2 % Pico-Valle y un 1,5 % RMS, una excelente prestación que es posible mejorar probablemente durante iteraciones suplementarias. No obstante, esto no parece verdaderamente necesario, ya que unos residuos de alineación inferiores a 0,01 mrad son ampliamente insignificantes con respecto al diámetro angular aparente del sol (aproximadamente 10 mrad).

Tabla 3:

ERRORES DE ALINEACIÓN $\delta r$ (mrad)		ERRORES DE MEDICIÓN (mrad)		ERRORES RELATIVOS (%)	
Azimut	Altitud	Azimut	Altitud	Azimut	Altitud
0,31	0,42	0,00	-0,01	0,20	2,37
-0,216	-0,233	0,002	0,002	1,0	1,0
0,233	0,225	-0,012	-0,002	5,4	0,7
-0,199	0,313	0,009	-0,010	4,6	3,3
0,153	0,204	-0,002	-0,002	1,5	0,8
0,020	-0,046	0,000	0,001	1,5	1,9
-0,135	0,266	0,005	-0,014	3,8	5,2
	<b>Errores RMS</b>	<b>0,006</b>	<b>0,006</b>	<b>2,0</b>	<b>1,5</b>

Las simulaciones numéricas presentadas en este caso muestran que las precisiones de medición alcanzadas son ampliamente compatibles con las prestaciones esperadas de estos diferentes tipos de sistemas concentradores de energía solar.

Con respecto a las técnicas ya existentes, la solución según la invención que es extremadamente adaptable, presenta la ventaja sustancial de poder implementarse sobre una instalación en funcionamiento, sin alterar la producción helioeléctrica en el caso de una instalación solar.

Además, permite acortar considerablemente el tiempo de puesta en servicio de la instalación y es aplicable a los principales tipos de sistemas concentradores puntuales de energía solar existentes (centrales con torre, concentradores directamente apuntados hacia el sol, hornos solares de doble reflexión...). Esto permite, por ejemplo,

referenciar los heliostatos en transcurso de descolgamiento, con el fin de volverlos a llevar a posición de reposo, por ejemplo, para un motivo de seguridad aérea.

- 5 Permite controlar y ajustar el conjunto de las superficies reflectoras de la instalación en un tiempo lo más corto posible. Automatizando el proceso de ajuste, las intervenciones humanas se reducen a un sencillo reajuste periódico de las superficies reflectoras a partir de valores numéricos determinados con anterioridad. En el caso de una central con torre, un objetivo ambicioso, pero alcanzable, es poder ajustar un centenar de heliostatos al día. Este propio tiempo mínimo puede reducirse a un control y ajuste en tiempo real cuando los propios espejos están equipados con actuadores controlables a distancia a partir de la unidad de tratamiento a cargo del control.

REIVINDICACIONES

1. Instalación concentradora de radiación cósmica procedente de un objeto celeste de radio angular aparente no nulo, equipada

5 - con una superficie óptica concentradora (2) adecuada para reflejar la radiación cósmica incidente (3) hacia una superficie diana O'X'Y' para formar ahí una imagen de dicho objeto celeste y susceptible de presentar unos errores locales de superficie y de apuntamiento y de orientación,  
 - con un sistema de control de la superficie óptica reflectora, **caracterizada porque** el sistema de control comprende:

10 - unos medios (4) de adquisición de imágenes (5) de la superficie óptica según diferentes puntos de vista  $M'_{mn}$  ( $x'_{mn}$ ,  $y'_{mn}$ ) situados en el interior de la mancha de la imagen del objeto celeste en la superficie diana, variando m de 1 a M, variando n de 1 a N, de manera que se obtenga M x N imágenes de la superficie óptica iluminada por la radiación cósmica, con M puntos de vista según X' y N puntos de vista según Y', con  $M > 1$ ,  $N > 1$ ,  $M \cdot N \geq 30$ ,  
 -y una unidad de tratamiento de las M.N imágenes adquiridas adaptada para:

◦ calcular las pendientes  $\delta\Delta(P)/\delta x$  y  $\delta\Delta(P)/\delta y$  para cada punto P(x, y) de la superficie óptica reflectora según:

15 
$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial x} = g_x \varepsilon_0 \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{sign}(x'_{mn}) L(M'_{mn}, P)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L(M'_{mn}, P)}$$

$$\frac{\partial\Delta(P)}{\partial y} = g_y \varepsilon_0 \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{sign}(y'_{mn}) L(M'_{mn}, P)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N L(M'_{mn}, P)}$$

20 siendo  $L(M'_{mn}, P)$  la luminancia en un punto de la imagen correspondiente al punto P(x, y) de la superficie óptica reflectora (2) observada según el punto de vista  $M'_{mn}$ ,  $\varepsilon_0$  el radio angular aparente del objeto celeste,  $g_x$  y  $g_y$  unos coeficientes predeterminados y  
 ◦ determinar a partir de estas pendientes  $\delta\Delta(P)/\delta x$  y  $\delta\Delta(P)/\delta y$ , un error local de superficie  $\Delta P(x, y)$  en el punto P(x, y) de la superficie óptica reflectora (2).

2. Instalación concentradora de radiación cósmica según la reivindicación anterior, **caracterizada porque** los medios (4) de adquisición de imágenes según diferentes puntos de vista incluyen varios dispositivos de adquisición de imágenes respectivamente situados en diferentes posiciones fijas o móviles en la superficie diana.

25 3. Instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** la superficie óptica reflectora (2) a controlar es orientable.

30 4. Instalación concentradora de radiación cósmica según la reivindicación 1 tomada en combinación con la reivindicación 3, **caracterizada porque** los medios (4) de adquisición de imágenes según diferentes puntos de vista incluyen al menos un dispositivo de adquisición de imagen situado en la superficie diana y unos medios de modificación de la orientación de la superficie óptica reflectora a controlar.

5. Instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** la superficie óptica reflectora (2) está segmentada en facetas (21) y **porque** la unidad de tratamiento está adaptada para determinar, además, unos errores de orientación de las facetas entre sí y un error de ajuste de cada faceta.

35 6. Instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** la superficie óptica reflectora (2) está montada en un heliostato.

7. Instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** la superficie óptica reflectora (2) es parabólica.

40 8. Instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** incluye varias superficies ópticas reflectoras (2).

9. Instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** la radiación cósmica incidente (3) es solar o lunar.

10. Instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada**

**porque** la superficie diana es plana.

11. Central con torre o concentrador individual u horno solar de doble reflexión o telescopio de Cherenkov que incluyen una instalación concentradora de radiación cósmica según una de las reivindicaciones anteriores.

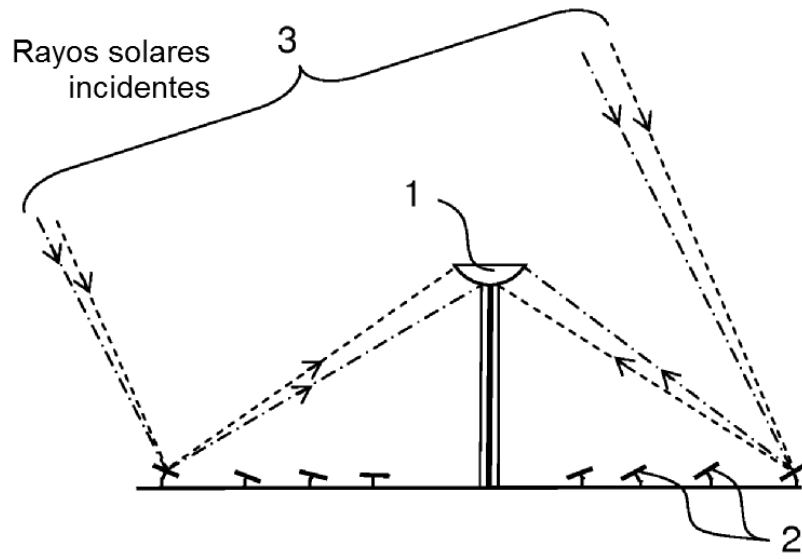


FIG.1a

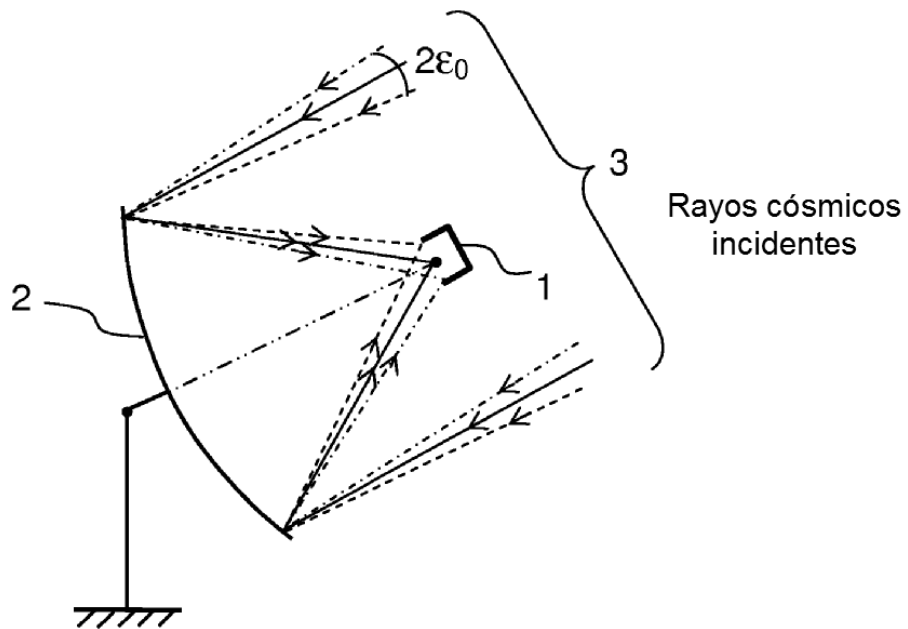


FIG.1b



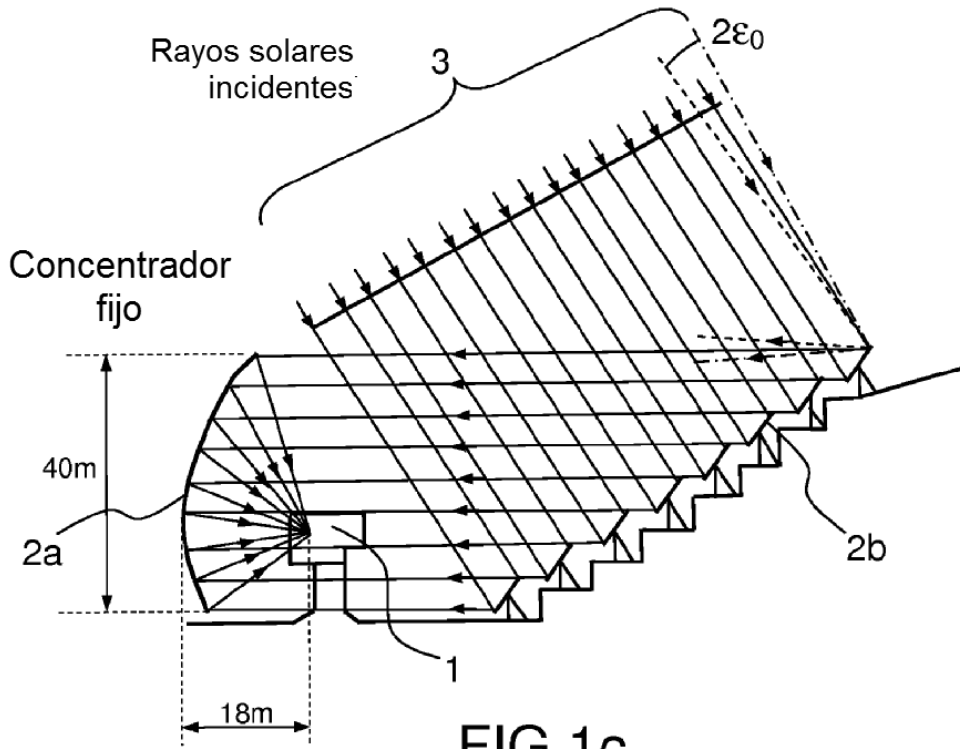


FIG.1c

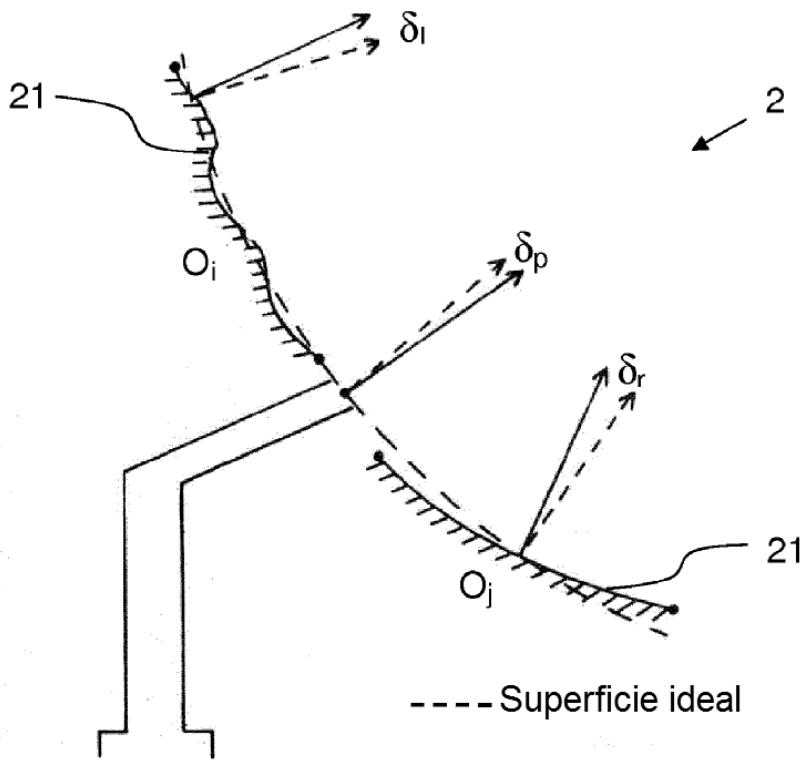


FIG.2

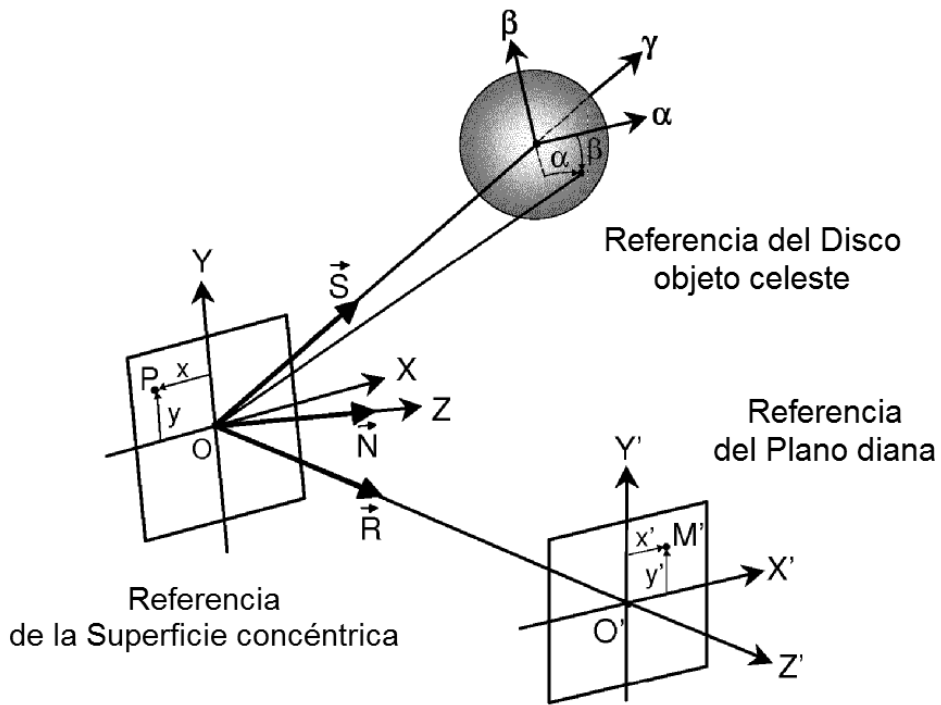


FIG.3a

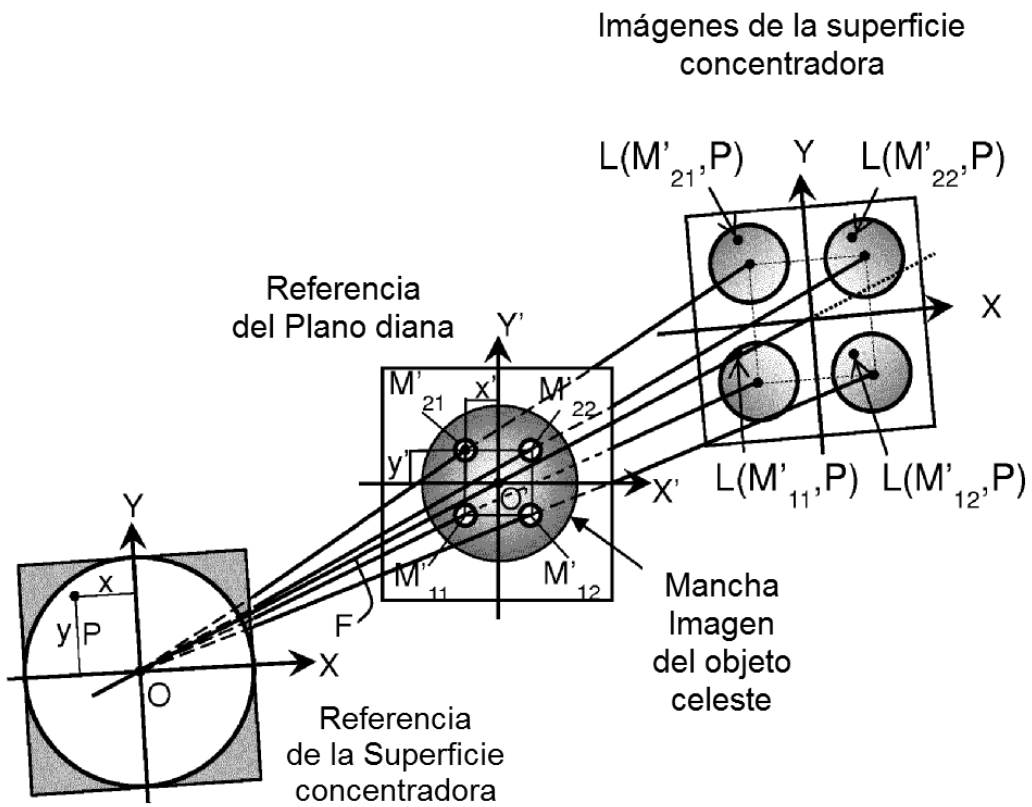


FIG.3b

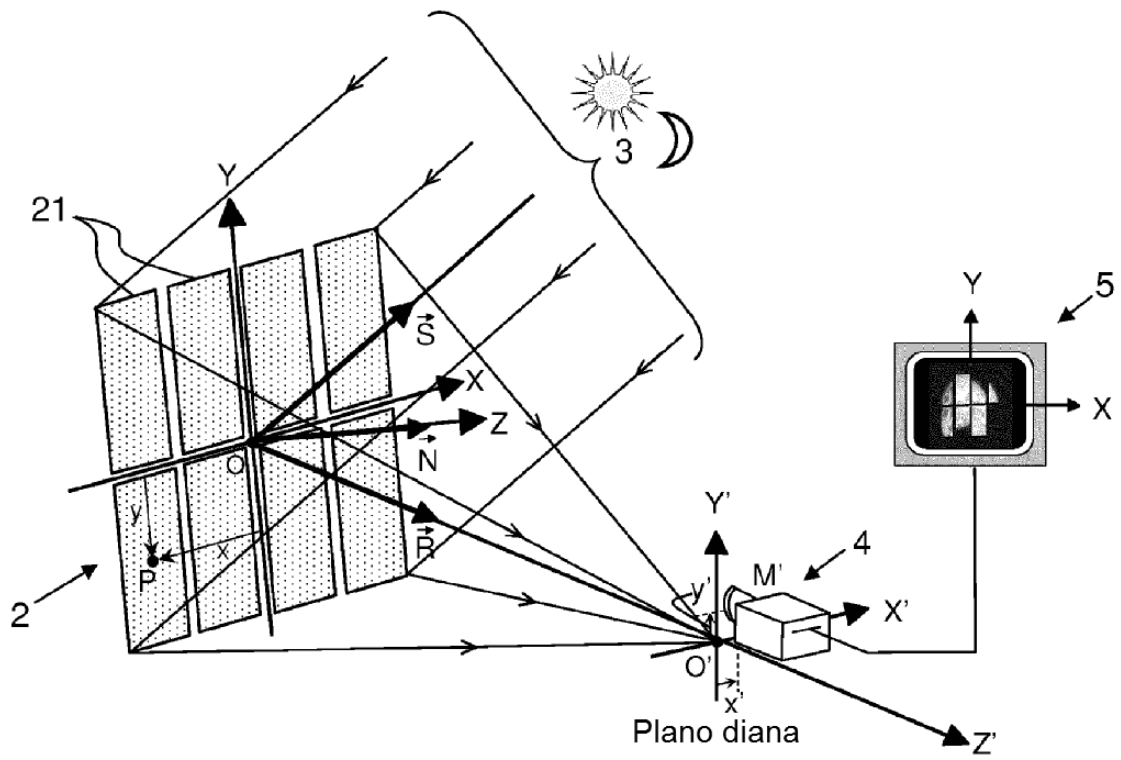


FIG. 4a

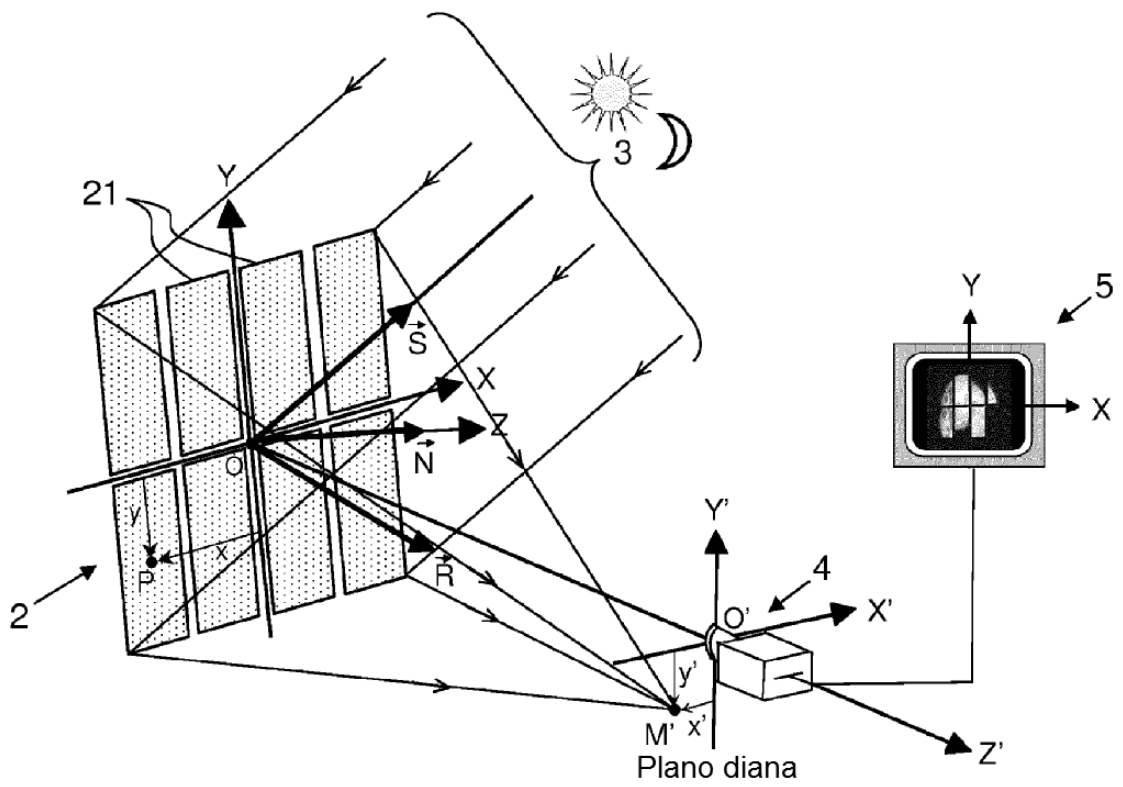
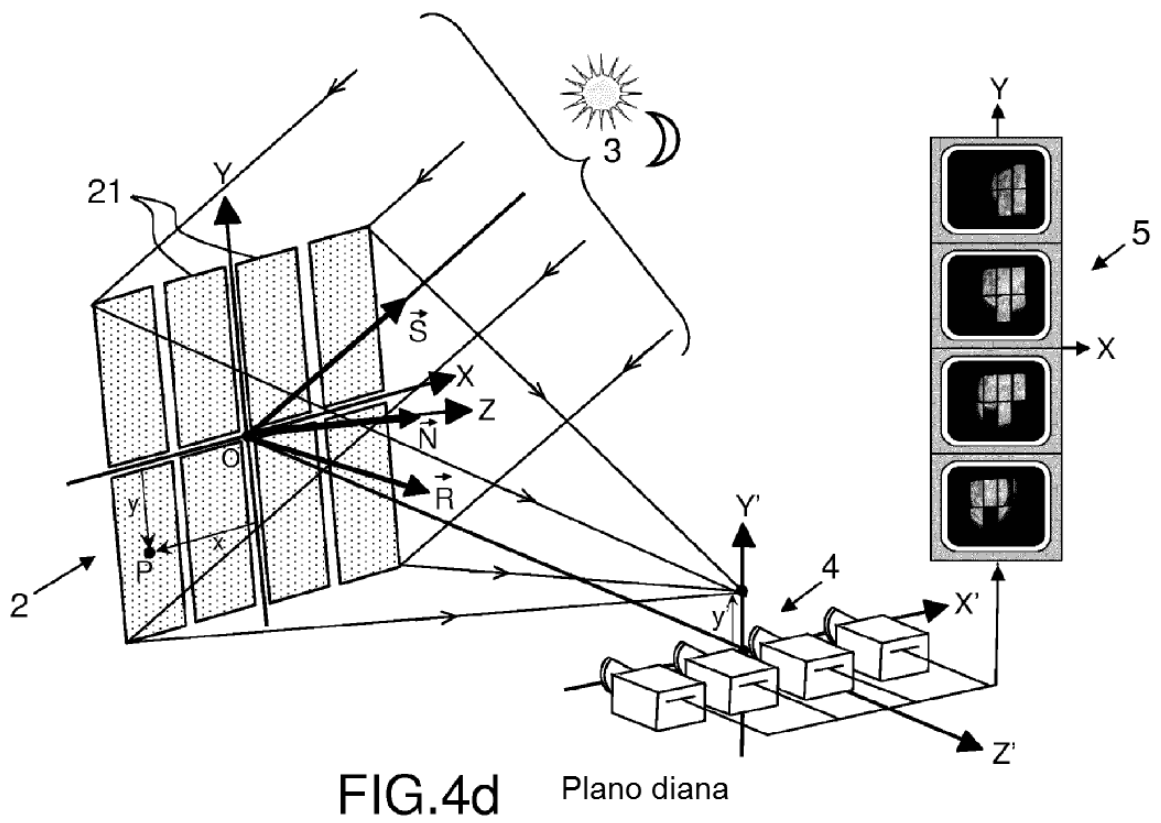
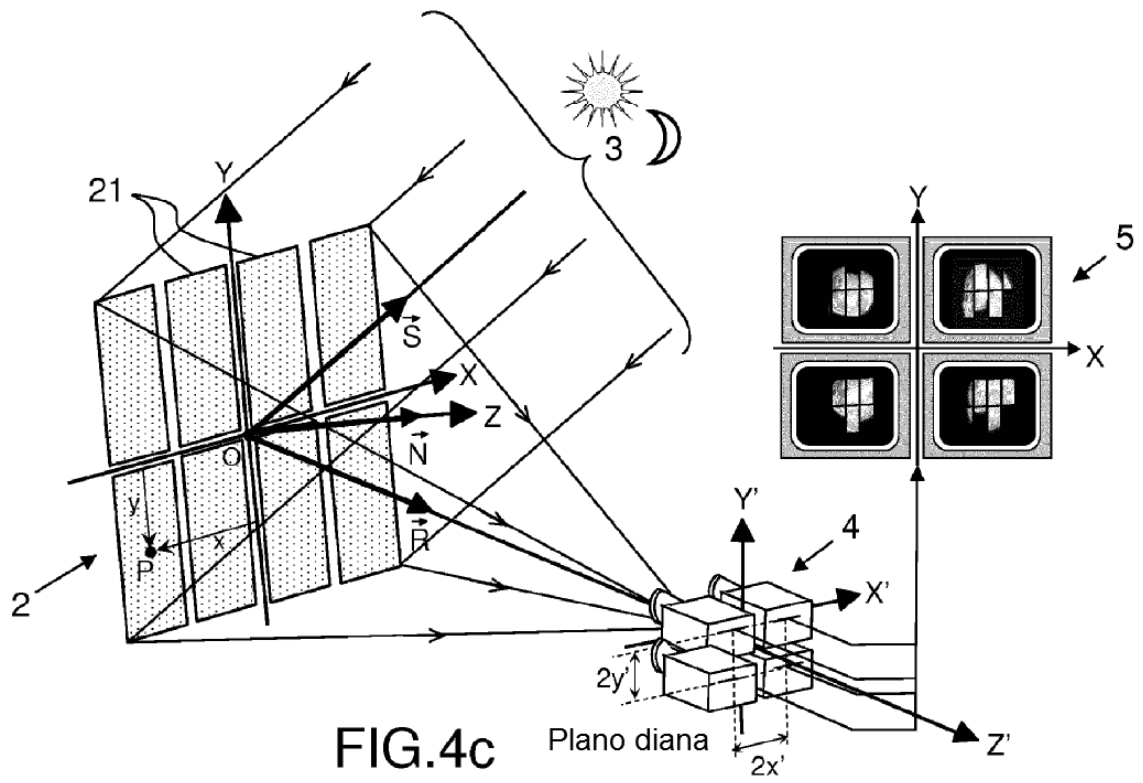


FIG. 4b



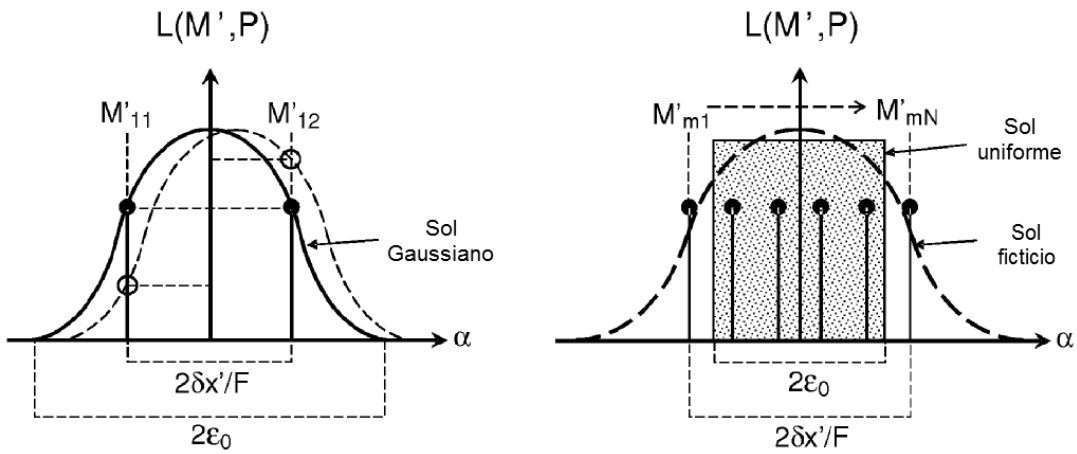


FIG.5a

FIG.5b

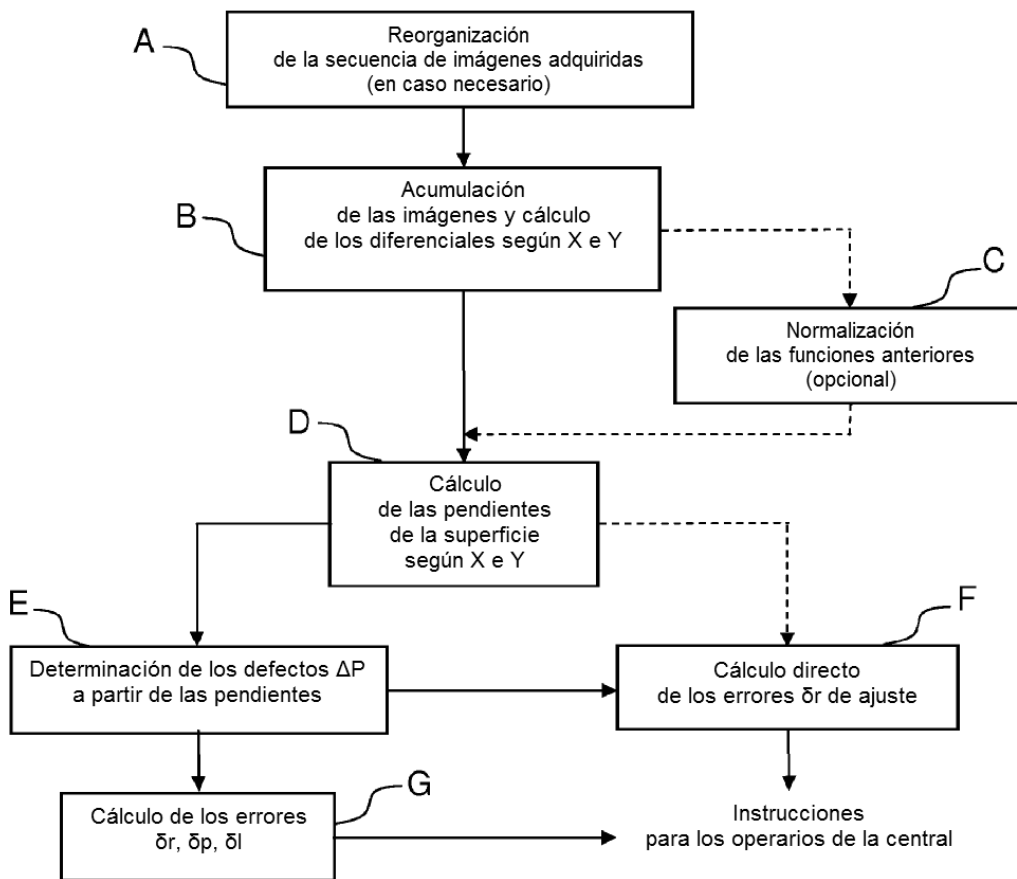


FIG.6

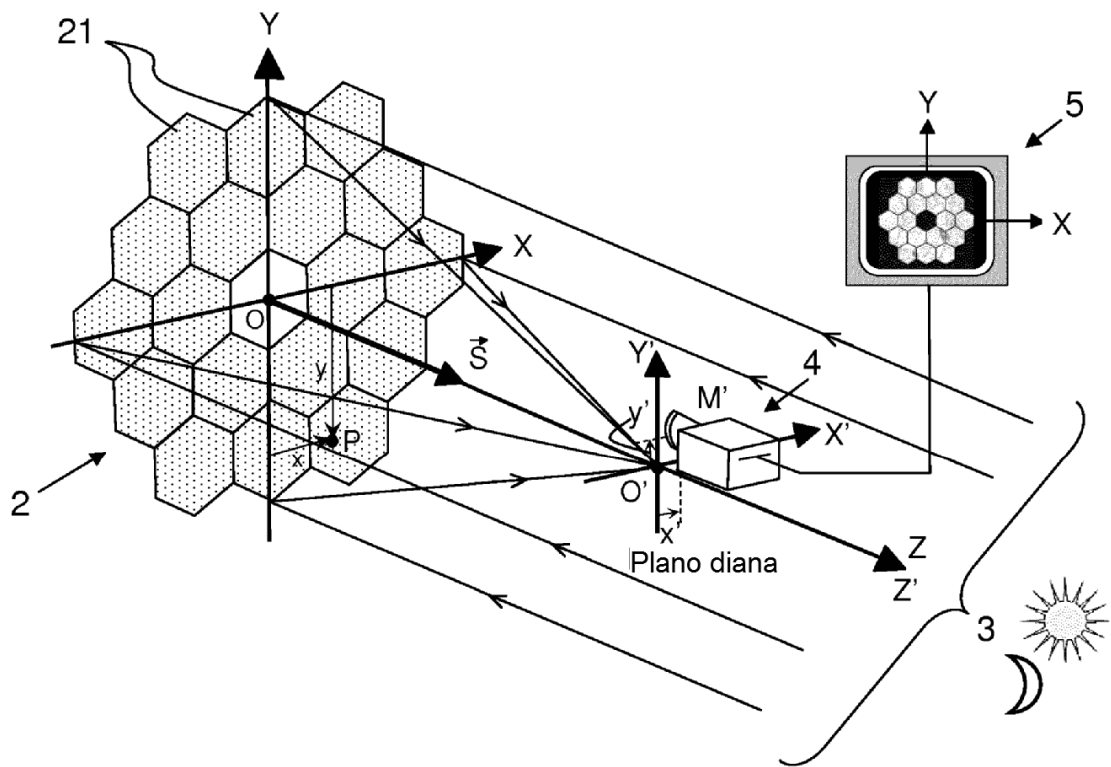


FIG.7a

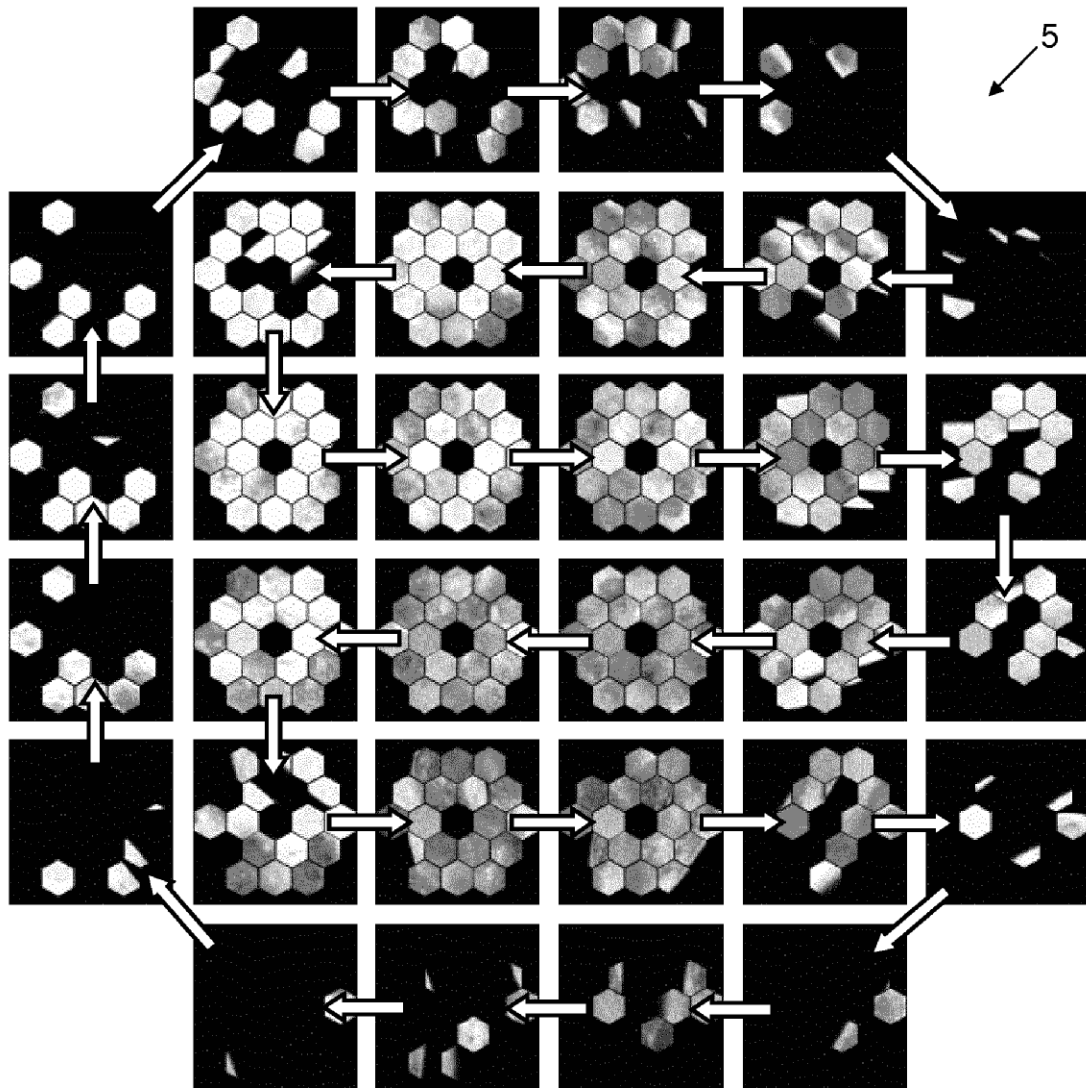


FIG.7b

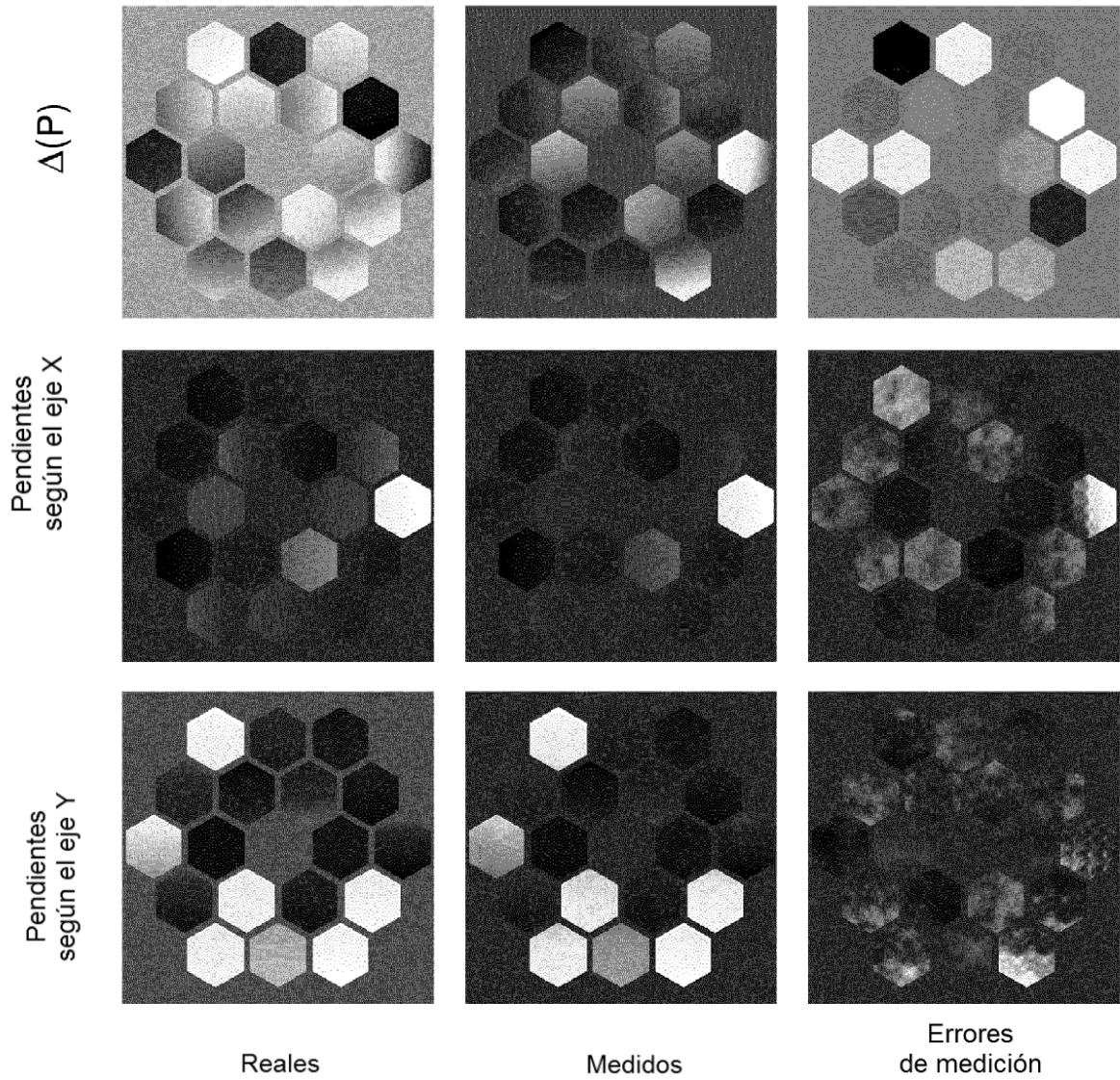


FIG.7c



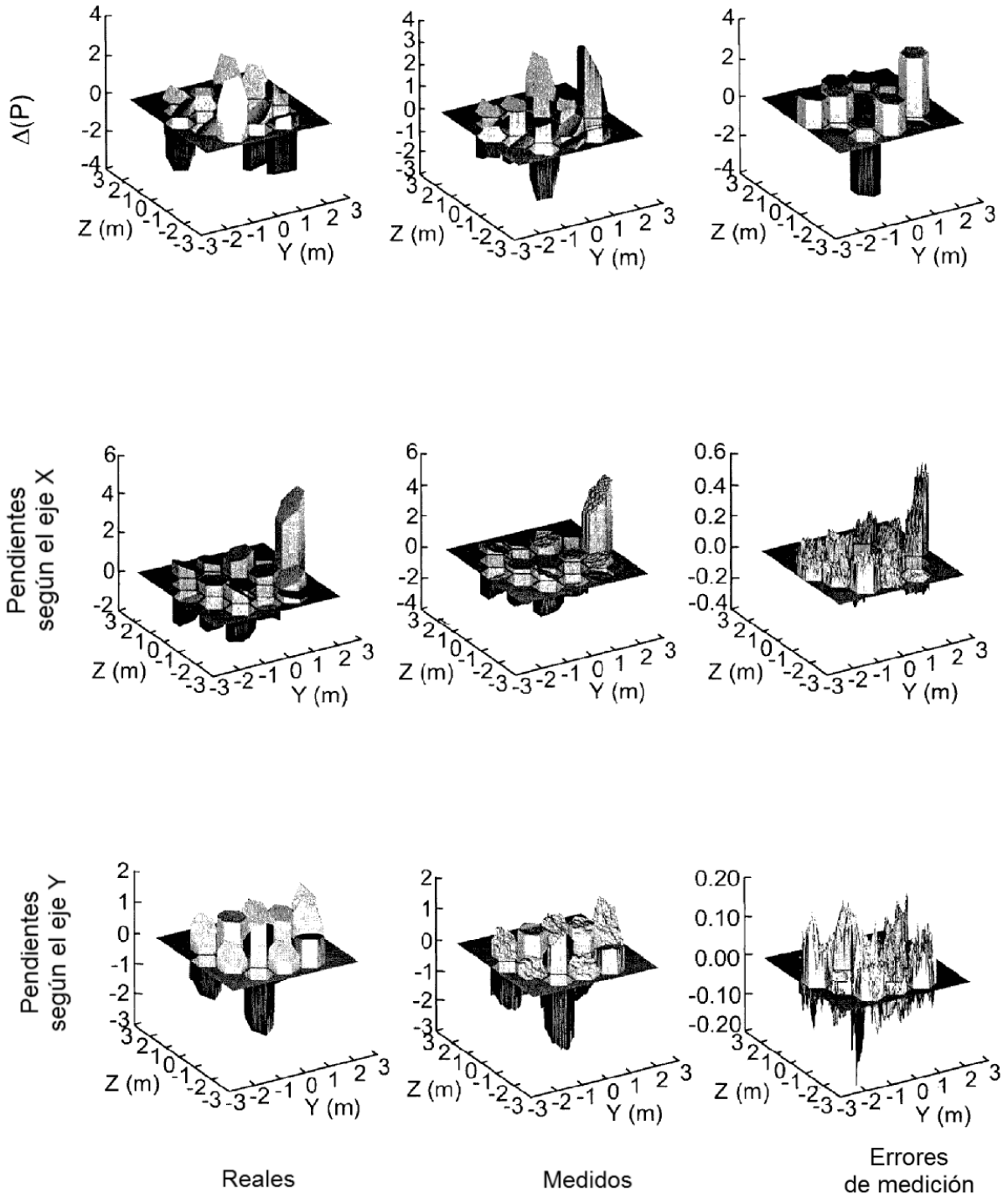


FIG.7d



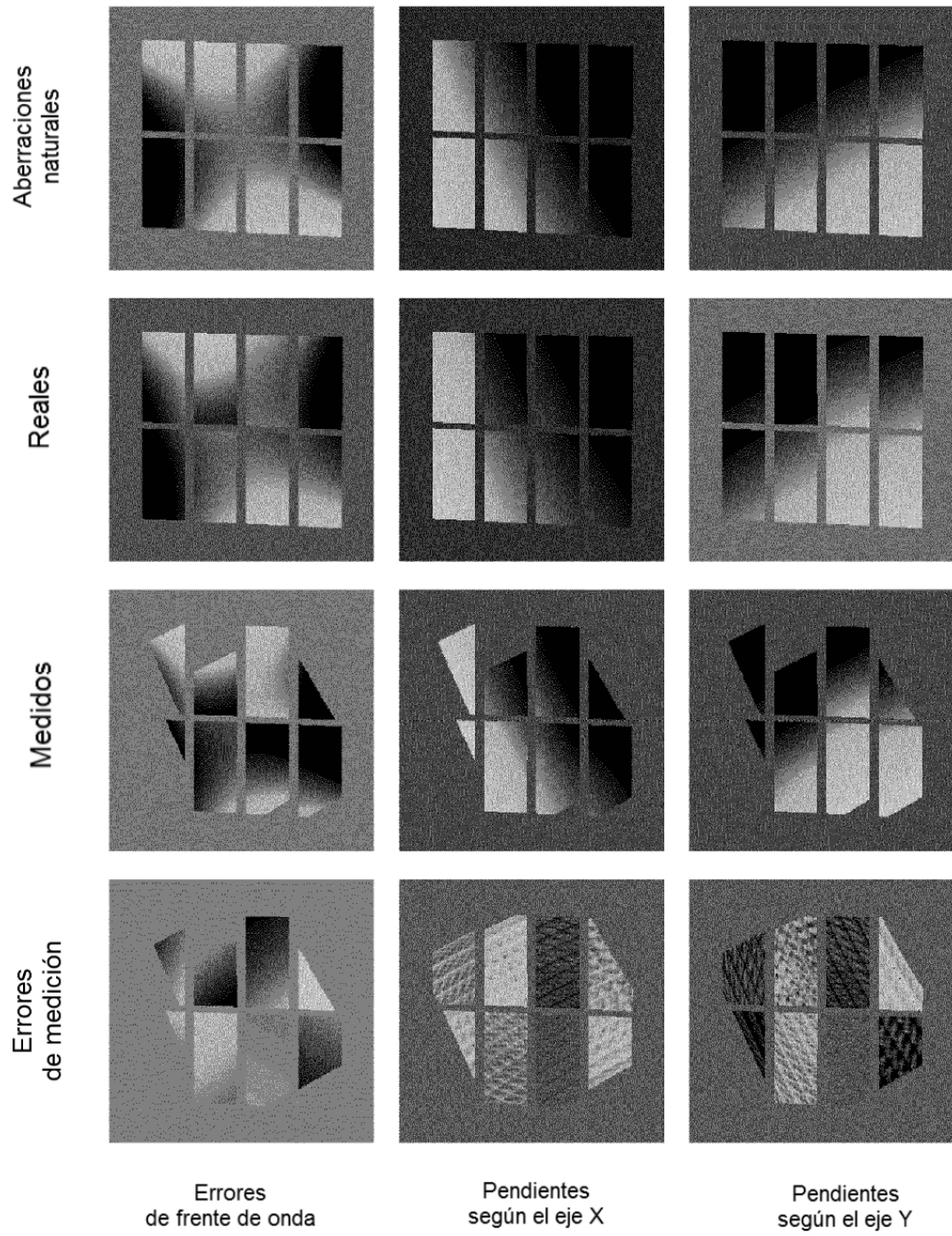


FIG.8b

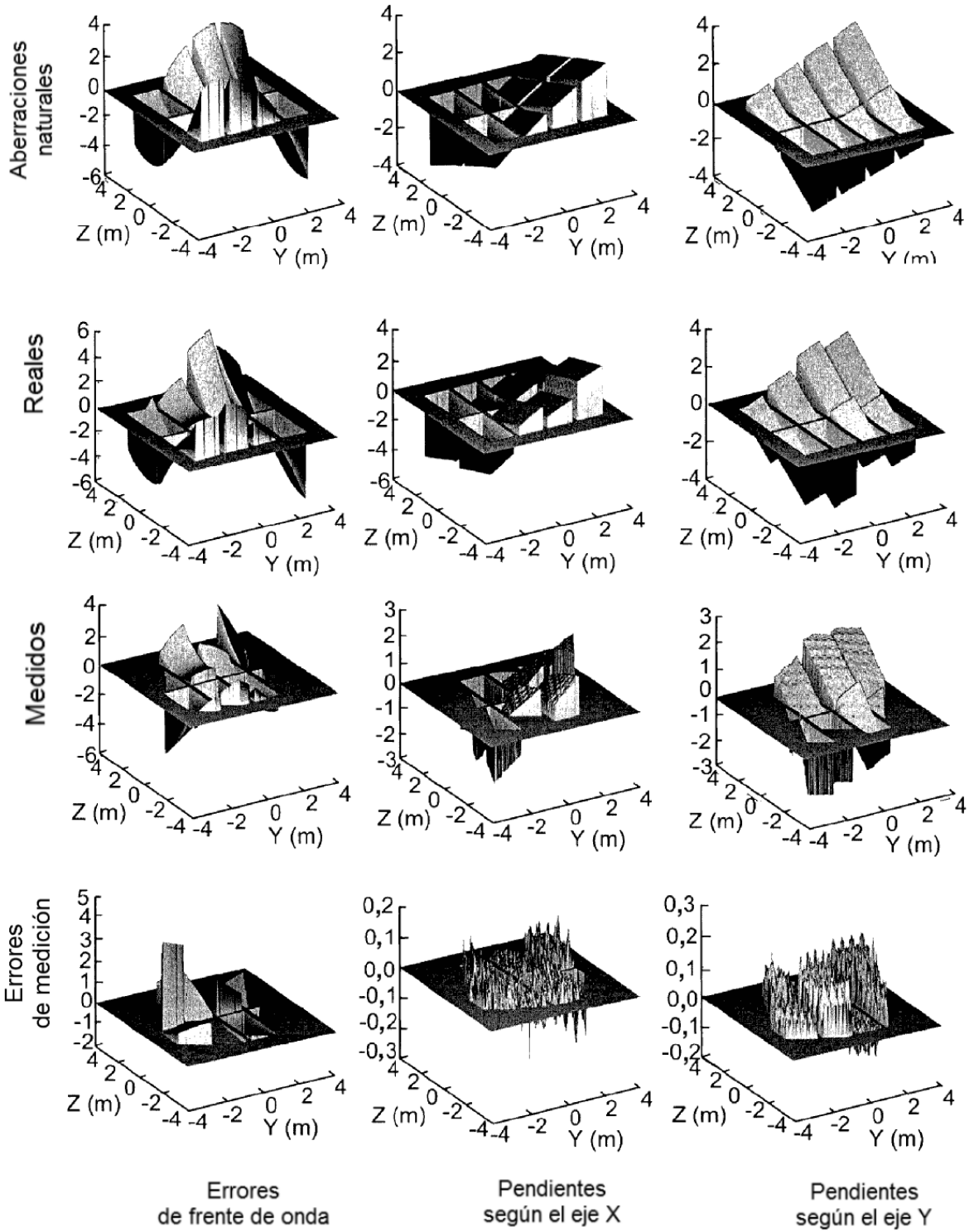


FIG.8c