

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 993 176**

21 Número de solicitud: 202330521

51 Int. Cl.:

**H10F 77/42** (2015.01)

**H10F 10/00** (2015.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

**23.06.2023**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**23.12.2024**

Fecha de concesión:

**23.06.2025**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**30.06.2025**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD DE LEÓN (100.00%)  
Avda. de la Facultad 25  
24071 León (León) ES**

72 Inventor/es:

**GARCÍA SIERRA, Juan Felipe y  
DÍAZ FERNÁNDEZ, Patricia**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

54 Título: **SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONCENTRACIÓN**

57 Resumen:

Sistema fotovoltaico de concentración, que comprende:

una lente esférica de bola (2) para concentrar la luz solar (3) mediante refracción;

un panel fotovoltaico (4) de concentración;

un prisma óptico (5) para dirigir los rayos refractados (50) hacia el panel fotovoltaico (4);

una carcasa (6) que aloja el prisma óptico (5) y el panel fotovoltaico (4);

un sistema mecánico de rotación (7) de la carcasa (6) alrededor de un eje acimutal (8) y un eje de altura (9) en torno a la lente esférica de bola (2);

una unidad de control (12) para:

- obtener la posición ( $P$ ) y tiempo ( $T$ ) actuales;

- obtener la posición del sol (63) correspondiente a la posición ( $P$ ) y tiempo ( $T$ ) actuales;

- calcular, utilizando la posición del sol (63), un ángulo de altura ( $\alpha_p$ ) y un ángulo acimutal ( $z_p$ ) para que el panel fotovoltaico (4) se coloque en torno a la lente esférica de bola (2) opuesto al sol (13); y

- operar el sistema mecánico de rotación (7) para colocar el panel fotovoltaico (4) en el ángulo de altura ( $\alpha_p$ ) y el ángulo acimutal ( $z_p$ ) calculados.

ES 2 993 176 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.  
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

## DESCRIPCIÓN

### SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONCENTRACIÓN

#### 5 OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención pertenece al sector de la energía solar fotovoltaica, y más concretamente al de la energía solar fotovoltaica de concentración.

El objeto principal de la presente invención es un sistema o estación de generación de energía solar fotovoltaica de concentración basada en refracción de la luz solar mediante lente esférica de bola. Esta estación puede emplearse para la generación de energía eléctrica fotovoltaica tanto a nivel industrial (plantas) como particular (hogares y edificaciones en general). La peculiaridad de la lente utilizada (una esfera perfecta que no requiere alineación con los rayos solares) permite que la estación pueda incorporarse a las edificaciones integrando dicha lente en los cerramientos verticales u horizontales a modo de acristalamiento.

#### ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La energía solar fotovoltaica emplea habitualmente paneles solares de silicio cristalino cuyo rendimiento (potencia generada) mejora si la orientación del panel respecto al sol es adecuada, esto es, si su superficie se sitúa perpendicular a los rayos del sol. Sin embargo, habitualmente, los paneles tienen una posición y orientación fija y no se orientan frente al sol de forma dinámica o, si lo hacen, utilizan para ello mecanismos (seguidores) que son o bien caros y complejos o bien están limitados al eje acimutal (seguimiento en un solo eje, este-oeste, pero no norte-sur).

Los generadores fotovoltaicos utilizados son además de grandes dimensiones, con paneles de 100x150 cm o mayores conectados en serie y en paralelo, lo que requiere motores con una fuerza considerable que aumenta el precio de los seguidores, al que también hay que sumar los costes de mantenimiento derivado de los componentes mecánicos y electrónicos. Todo esto hace que habitualmente sea más económico colocar más paneles solares si se necesita obtener más potencia en vez de aumentar el rendimiento mediante este tipo de tecnología.

Los sistemas de energía solar fotovoltaica de concentración reducen enormemente el tamaño de las celdas solares (cada celda pasa a ocupar 1 cm<sup>2</sup>, o incluso menos), trabajando con

energía solar equivalente a 500 o más soles y con una eficiencia que se eleva hasta el 30% o más (frente al 15% habitual en paneles convencionales). Sin embargo, para funcionar requieren un sistema óptico de concentración, de gran tamaño en comparación al panel, y el seguidor solar, que antes era opcional, ahora es imprescindible. Los sistemas comerciales  
5 existentes utilizan lentes de Fresnel como concentradores, lentes que son planas y por tanto deben orientarse junto con la celda para que el eje óptico se alinee adecuadamente. Los algoritmos de seguimiento deben ser muy precisos, mejores que los usados habitualmente en paneles convencionales, lo que se consigue, entre otras formas, con la inclusión de sensores  
10 adicionales que aumentan aún más su precio. Aunque existen plantas que utilizan este tipo de tecnología (e.g. sistema Amonix, en las Vegas, Estados Unidos), el coste de los seguidores sigue siendo elevado dada la precisión requerida y dado que la estructura final del generador, incluidos los concentradores, sigue siendo voluminosa y pesada, lo cual hace que en la mayoría de los casos siga resultando más económico utilizar un mayor número de paneles solares convencionales.

15

La presente invención presenta un novedoso sistema fotovoltaico de concentración que resuelve los problemas anteriores.

#### Referencias bibliográficas

20 [1] Soteris A. Kalogirou, Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edition, Elsevier, ISBN-13: 978-0-12-397270-5

#### **DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION**

La presente invención se refiere a una estación o sistema de generación de energía solar  
25 fotovoltaica de concentración basada en refracción de la luz solar mediante lente esférica de bola, con la que se evitan los inconvenientes mencionados anteriormente, favoreciendo y potenciando el uso de este tipo de energía tanto a nivel industrial (plantas fotovoltaicas de concentración) como urbano y residencial.

30 El sistema fotovoltaico de concentración de la presente invención comprende una lente esférica de bola configurada para concentrar la luz solar mediante refracción; un panel fotovoltaico de concentración (que incluye una o varias celdas solares de concentración); un prisma óptico de guiado de luz configurado para dirigir los rayos refractados por la lente esférica de bola hacia el panel fotovoltaico; una carcasa configurada para alojar el prisma

óptico y el panel fotovoltaico; un sistema mecánico de rotación de la carcasa alrededor de un eje acimutal y un eje de altura en torno a la lente esférica de bola; al menos una batería para almacenar la energía generada por el panel fotovoltaico; y una unidad de control configurada para:

- 5
- Obtener la posición y tiempo actuales, obtener la posición del sol correspondiente a la posición y tiempo actuales.
  - Calcular, utilizando la posición del sol, un ángulo de altura y un ángulo acimutal para que el panel fotovoltaico se coloque en torno a la lente esférica de bola opuesto al sol.
  - Operar el sistema mecánico de rotación para colocar el panel fotovoltaico en el ángulo
- 10 de altura y el ángulo acimutal calculados.

La estación de concentración propuesta consigue un altísimo rendimiento en la generación de energía solar fotovoltaica al mismo tiempo que minimiza el tamaño del panel fotovoltaico (o celda solar) utilizado. Sus mayores ventajas e innovaciones son las siguientes:

- 15
- Mayor aprovechamiento de la luz solar (incluida la posibilidad de trabajar con luz difusa o incluso la luz de la luna).
  - Reducción de tamaño y coste con respecto a las soluciones existentes, ya que: se pueden usar paneles de menor tamaño; la lente de bola se puede fabricarse en polímero plástico y rellenarse de agua; el tamaño del sistema mecánico-estructural del
- 20 seguidor es mucho menor, al tener que rotar sólo el panel fotovoltaico.
- Reducción del impacto ambiental (uso de paneles solares de menor tamaño).
  - Seguidor solar (mecanismo de rotación y orientación del panel fotovoltaico) que orienta el panel solar de forma muy precisa (permite una precisión de 1 minuto sexagesimal), lo que es muy importante para que la celda solar de concentración funcione
- 25 correctamente.
- Seguidor basado en ciclos temporales, sin necesidad de ningún sensor adicional.
  - La estación no requiera alineado ni calibración compleja: es suficiente con colocar el panel fotovoltaico de forma que los rayos del sol se refracten correctamente sobre la
- 30 misma y a continuación arrancar el controlador o unidad de control, que realizará el seguimiento de forma precisa en función de la localización geográfica y de la hora actual (valores que puede obtener automáticamente por GPS sin intervención del usuario).

- Mayor integración de las tecnologías de generación de energía solar fotovoltaica en el ámbito urbano y residencial. La estación podría instalarse a modo de escultura-generador en las ciudades, o como parte del acristalamiento (cerramientos verticales y horizontales) de edificios empresariales y de viviendas. Se reduce además el impacto estético en ambientes urbanos y naturales gracias al uso de una esfera perfecta como lente refractiva.

5

En la práctica, la energía solar fotovoltaica de concentración no suele emplearse dado el elevado coste derivado de la necesidad de construir el seguidor solar requerido para su funcionamiento. El presente sistema no requiere rotar la lente (al ser una lente de bola, una esfera perfecta), lo que permite construir un sistema mecánico de rotación y seguimiento mucho más pequeño (solo rota el prisma óptico y la celda solar, con un tamaño normalmente de 1 cm<sup>2</sup>), con la consiguiente reducción de tamaño y costes. La lente puede rellenarse con agua, por lo que su coste es también muy reducido.

15

En una realización, el sistema construido implementa la solución de S. Kalogirou [1] (un algoritmo de seguimiento altacimutal que utiliza el tiempo sidéreo local) para realizar el seguimiento solar, solución que es válida y precisa para cualquier lugar del mundo, y para cualquier día y hora. Si se utiliza una unidad de GPS electrónico, no necesita ningún tipo de programación o adaptación al lugar en el que se instala para ser perfectamente funcional, ya que obtiene todos los datos que requiere directamente de la red satelital. Alternativamente al GPS se puede utilizar un RTC (Real Time Clock), indicando manualmente la latitud y la longitud de la posición en la que se ubique el sistema requeridas por el algoritmo (las cuales pueden ser almacenadas en memoria para su lectura por parte de la unidad de control).

25

Además, el sistema reduce ostensiblemente los problemas de reflexión, absorción, divergencia y aberraciones propias de las lentes gracias al uso de un prisma óptico. Para evitar que los rayos refractados incidan en lugares distintos a la celda solar (con el consiguiente riesgo), se emplea preferentemente una carcasa o encapsulamiento de aluminio. Dicho encapsulamiento, junto con un disipador de calor sobre el que se sitúan tanto éste como la celda solar, ayudan a reducir las altas temperaturas alcanzadas en la celda.

30

La propuesta puede además tener valor arquitectónico, ya que al no tener que rotar la lente esta puede formar parte de la estructura de edificios, por ejemplo, a modo de acristalamiento

de superficies verticales de edificios (ej: caja de escaleras), donde la utilización de paneles solares convencionales no tiene sentido. También podría ubicarse en los recubrimientos de patios interiores, ya que dejaría pasar la luz.

- 5 Finalmente, dado que la presente solución se encuadra dentro de la energía solar de concentración, el menor silicio requerido en la fabricación de las celdas fotovoltaicas (las de concentración requieren mucho menos al ser tan pequeñas) tendría un impacto ambiental favorable.

## 10 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

A continuación, se describen de manera muy breve una serie de figuras que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

- 15 Las Figuras 1A y 1B muestran, en una vista de perfil y planta respectivamente, los elementos que componen el sistema fotovoltaico de concentración de acuerdo a una realización.

Las Figuras 2A y 2B muestran diferentes realizaciones del sistema mecánico de rotación.

- 20 Las Figuras 3A, 3B y 3C representan diferentes vistas de otra realización del sistema fotovoltaico de concentración.

Las Figuras 4A y 4B muestran dos vistas de la carcasa que aloja el panel fotovoltaico y el prisma óptico.

25

La Figura 5A ilustra la refracción de la luz solar en la lente esférica de bola. La Figura 5B ilustra los rayos refractados incidiendo en el prisma óptico, una vez atravesada la lente esférica de bola.

- 30 Las Figuras 6A y 6B muestran las acciones realizadas por la unidad de control, incluyendo diferentes formas de obtener la posición y tiempo actuales, y distintos modos de obtener la posición del sol.

**REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION**

Las **Figuras 1A** y **1B** muestran de una manera esquemática, en una vista de perfil y planta respectivamente, los elementos que componen el sistema fotovoltaico de concentración 1 de acuerdo a una realización de la presente invención.

5 El sistema fotovoltaico de concentración 1 comprende una lente esférica de bola 2 configurada para concentrar la luz solar 3 mediante refracción, un panel fotovoltaico 4 de concentración, un prisma óptico 5 de guiado de luz configurado para dirigir los rayos de luz solar refractados por la lente esférica de bola 2 hacia el panel fotovoltaico 4, una carcasa 6 configurada para alojar el prisma óptico 5 y el panel fotovoltaico 4, y un sistema mecánico de rotación 7 de la  
 10 carcasa 6 alrededor de un eje acimutal 8 y un eje de altura 9 en torno a la lente esférica de bola 2. En una realización, el sistema mecánico de rotación 7 comprende un primer motor 10 y un segundo motor 11 configurados para rotar la carcasa 6 alrededor del eje acimutal 8 y del eje de altura 9, respectivamente, a través de un sistema de transmisión de movimiento encargado de distribuir el movimiento de rotación de los ejes de los motores (10,11) a la  
 15 carcasa 6.

Una unidad de control 12 configurada para determinar la posición del sistema fotovoltaico de concentración 1, el día y la hora actuales, y obtener los ángulos de acimut y de altura del sol 13 correspondientes a la posición, día y hora determinados. La unidad de control 12 está  
 20 también configurada para, utilizando los ángulos de acimut y de altura del sol 13, calcular un ángulo de altura  $\alpha_p$  y un ángulo acimutal  $z_p$  del panel fotovoltaico 4 (o de la carcasa 6), medidos respectivamente con respecto al eje de altura 9 y al eje acimutal 8, para que el panel fotovoltaico 4 se coloque en torno a la lente esférica de bola 2 opuesto al sol 13, tal y como se muestra en la Figura 1A (vista de perfil donde se aprecia el ángulo de altura  $\alpha_p$ ) y la Figura  
 25 1B (vista en planta donde se aprecia el ángulo acimutal  $z_p$ ). La unidad de control 12 está configurada para operar el sistema mecánico de rotación 7 (e.g. mediante señales de activación  $S_{z_p}$  y  $S_{\alpha_p}$  de los motores 10 y 11, respectivamente) para colocar el panel fotovoltaico 4 en el ángulo acimutal  $z_p$  y el ángulo de altura  $\alpha_p$  calculados para el panel fotovoltaico 4. El sistema fotovoltaico de concentración 1 comprende además una o varias  
 30 baterías 14 configuradas para recibir y almacenar la energía generada por el panel fotovoltaico 4. Por simplicidad, en la vista en planta de la Figura 1B no se representan los motores (10,11), la unidad de control 12 ni la batería 14. El sistema fotovoltaico de concentración 1 puede disponer de una base o estructura 15 en la que se integran diferentes componentes electrónicos y/o mecánicos, como los motores (10,11), la unidad de control 12, la batería 14.

El sistema fotovoltaico de concentración 1 puede comprender una unidad de geolocalización 16 configurada para obtener la posición  $P$  (e.g. representadas mediante coordenadas de latitud y longitud), y opcionalmente la fecha y hora actuales, y enviar dicha información a la  
5 unidad de control 12. La unidad de geolocalización puede ser un sistema de posicionamiento por satélite (e.g. sistema global de navegación por satélite GNSS implementado mediante un receptor GPS). La unidad de control 12 puede obtener la fecha y hora mediante los datos suministrados por la unidad de geolocalización 16 o, alternativamente, mediante una consulta  
10 a otra entidad (e.g. consulta a un reloj interno o externo a la unidad de control, o mediante consulta a un servicio de Internet, en el caso de que la unidad de control 12 tenga conexión con Internet). De manera similar, la unidad de control 12 puede obtener la posición  $P$  del sistema fotovoltaico de concentración 1 mediante otros medios; por ejemplo, la posición  $P$  puede ser obtenida empleando la conexión a Internet o puede estar almacenada en una memoria interna de la unidad de control 12, para el caso de que el sistema fotovoltaico de  
15 concentración 1 se ubique en una posición fija (o, cuando se varíe la posición del sistema fotovoltaico de concentración 1, la posición  $P$  se determina y se actualiza en memoria).

En la **Figura 2A** se muestra una posible realización del sistema mecánico de rotación 7, el cual incluye una base 20 motorizada con capacidad de rotación en el eje acimutal 8 y un  
20 columpio 21 motorizado que permite la rotación de un soporte 22 de la carcasa 6 en el eje de altura 9. El motor inferior, primer motor 10 sujetado mediante escuadra 25, permite la rotación en el eje acimutal 8, mientras que el motor de la parte central, segundo motor 11, realiza la rotación del eje de altura 9 gracias a un columpio 21 accionado por poleas 23 con correa (la correa no se muestra en la Figura 2A). En la Figura 2A se muestra una montura para exterior,  
25 con capacidad para sujetar la lente esférica de bola 2 mediante dos ejes de soporte 19 y dos casquetes de soporte 24. En la **Figura 2B** se muestra una montura para integración en edificaciones, donde la lente esférica de bola 2 (que en la figura se representa flotando) estaría fija y sujeta a algún elemento estructural (por ejemplo, a las paredes) y cumpliría la función de cerramiento vertical u horizontal transparente, quedando el resto de los componentes en el  
30 interior.

En las **Figuras 3A, 3B y 3C** se representan, de acuerdo a una vista en perspectiva (Figura 3A), perfil (Figura 3B) y sección en alzado (Figura 3C), otra posible realización de un sistema fotovoltaico de concentración 1 para exterior (el modelo para integración en edificaciones sería  
35 similar, pero reduciendo partes del sistema estructural, según se ilustra en el ejemplo de la

Figura 2B). En estas figuras se muestran las partes estructurales y mecánicas (no se ilustra la unidad de control 12 ni la batería 14).

De acuerdo a una realización, el sistema fotovoltaico de concentración 1 comprende los siguientes subsistemas:

- Un subsistema fotovoltaico de concentración, que comprende el panel fotovoltaico 4 de concentración, formado habitualmente por una sola celda solar fotovoltaica de concentración. Varias celdas solares pueden unirse en serie para aumentar el voltaje, o en paralelo para aumentar la intensidad.
- Un subsistema óptico de concentración, que comprende:
  - La lente esférica de bola 2, de dimensiones adecuadas para conseguir la concentración de luz solar 3 necesaria para optimizar el rendimiento de los paneles o celdas solares de concentración. Dicha lente concentra la luz mediante refracción. El material del que se fabrica, que en cualquier caso deberá ofrecer una gran transparencia, determina el índice de refracción, debiendo tener en cuenta los requisitos de concentración buscados (ratio de concentración o número de soles que soporta el elemento fotovoltaico). Se pueden utilizar lentes de bola de agua (lentes con cubierta de polímero plástico transparente rellenas de agua) dado su bajo coste, o de vidrio óptico (e.g. K9) si se desea obtener un mayor índice de refracción a cambio de un mayor coste.
  - El prisma óptico 5 de guiado de luz, para optimizar la dirección de los rayos de luz refractados por la lente esférica de bola 2 antes de que estos incidan sobre el panel fotovoltaico 4.
- Un subsistema mecánico que incluye el sistema mecánico de rotación 7, a su vez comprendiendo:
  - Dos sistemas motores con una precisión final de 1 minuto sexagesimal (precisión también alcanzada por el algoritmo de seguimiento solar ejecutado por la unidad de control 12 y requerida para el funcionamiento óptimo de la celda solar de concentración). Estos sistemas motores están formados por dos motores (primer 10 y segundo 11 motor) paso a paso con reducciones mecánicas de suficiente precisión para alcanzar estos valores. Un ejemplo de configuración válida sería un motor paso a paso de 400 pasos por revolución (con ángulo de paso de  $360/400=0.9^\circ$ ), equipado con una reducción 1:54 de

tipo planetario, lo que dotaría al sistema de una precisión final de 1 minuto ( $0.9/54 * 60$ ). El sistema compensa mediante software el backlash o retroceso inherente a los cambios de dirección.

- 5

  - 10

    - Sistema de transmisión de movimiento, necesario para distribuir el movimiento de rotación de los ejes de los motores a la estructura que sujeta la celda solar. La transmisión puede ser directa mediante bridas de acople (eje de acimut, este-oeste) o mediante poleas 23 sin reducción con correa 26 (eje de altura, norte-sur). Preferentemente, no se deben utilizar reducciones en la transmisión ya que estas se incluyen normalmente en los motores. Puede incluir una corona de orientación 18 (mostrada en la Figura 3B, junto con un palpador 36 y un refuerzo 37 en la base de la corona de orientación 18 mostrada en la Figura 3C) para la correcta rotación en el eje acimutal.
  - 15

    - Un subsistema estructural que comprende:
      - 20

        - Una montura de tipo altacimutal con los componentes necesarios para soportar y alojar el resto de subsistemas, permitiendo su correcto funcionamiento y posicionamiento. Está formada por un armazón de soporte de acero, cuatro bases circulares, dos de ellas (base superior 20 y base móvil 27 de la corona de orientación 18) con capacidad de rotación (eje acimutal, este-oeste) y las otras bases (base inferior 28 y base fija 29 de la corona de orientación 18) fijas, una tapa protectora 30 para la correa 26, una chapa 31 para fijar dicha tapa protectora 30, y un columpio 21 que permite la rotación en altura (norte-sur) y sobre el que se monta el soporte 22 (e.g. una placa de soporte) de la carcasa 6 que aloja el prisma óptico 5 y el panel fotovoltaico 4, en forma de U. También se incluyen columnas 32, escuadras 25, ejes de soporte 19 y casquetes de soporte 24 para sustentar y fijar los componentes entre sí, así como varias patas 33 para nivelar el plano acimutal. En caso de utilización en exteriores, los materiales son además resistentes a la intemperie. El modelo para integración en edificaciones, donde la lente esférica de bola 2 se sustenta en la misma, reduce partes del sistema estructural, prescindiendo de patas 33, columnas 32, bases (y con ellas, corona de orientación 18 y colector eléctrico 35) y casquetes de soporte 24.
      - 25

        - La carcasa 6 o encapsulamiento, preferentemente de aluminio, para alojar el prisma óptico 5 y el panel fotovoltaico 4. Este encapsulamiento evita la

30

dispersión no deseada de los rayos solares refractados, lo que sería peligroso dado el elevado índice de concentración. Cumple también una función disipadora del calor generado, dadas las buenas propiedades conductivas del material (utilizado habitualmente, por ejemplo, para la construcción de disipadores de calor de determinados chips de ordenadores). Para optimizar esta última función, puede incluir también un disipador de calor de cobre.

- Una tapa 34 (escudo), preferentemente de aluminio, para la protección y disipación de calor de la superficie del sistema situada debajo de la lente esférica de bola 2. Aunque durante el funcionamiento normal del sistema toda la luz refractada incide dentro del encapsulamiento de aluminio de la celda solar (y por tanto no es peligrosa), este escudo protegería en caso de avería.

- Un subsistema electrónico de control, que comprende:

- La unidad de control 12 con capacidad para operar los dos motores (10,11), uno para el eje de acimut 8 y otro para el eje de altura 9. La unidad de control 12 se puede implementar mediante un microcontrolador o cualquier otra electrónica con capacidad de control y procesamiento de datos. En una realización se emplea una placa Lionheart, alimentada a 12V y con drivers DRV8825 de Texas Instruments integrados para el control preciso de los motores. La unidad de control 12 implementa preferentemente un algoritmo de seguimiento solar en el sistema altacimutal basado en la solución propuesta por S. Kalogirou [1].

- La unidad de geolocalización 16, implementada preferentemente mediante un receptor GPS, para obtener los datos de posición, día y hora que requiere el algoritmo directamente de la red satelital. Alternativamente al GPS, se puede utilizar un reloj en tiempo real (RTC, Real-Time Clock) incluido en un circuito integrado para que la unidad de control 12 pueda obtener la hora y día actuales, obteniendo la posición (latitud y longitud) requeridas por el algoritmo mediante el acceso a una memoria interna o externa a la unidad de control, en la cual se ha registrado previamente de forma manual la posición del sistema de fotovoltaico de concentración 1.

- Un subsistema eléctrico que comprende:

- Una o varias baterías 14, preferentemente de litio, para almacenamiento de la energía generada por el panel fotovoltaico 4. Las baterías 14 cuentan con su

propio sistema de gestión de baterías que asegura la carga y descarga correcta y equilibrada de sus celdas. Para estaciones de cierta envergadura, las baterías son preferentemente de tipo ión de litio NMC (LiNiMnCoO<sub>2</sub>), ya que estas han demostrado un rendimiento óptimo en el mercado de la energía solar fotovoltaica (con una eficiencia de ida y vuelta de hasta el 90% y conservando más del 70% de capacidad después de 2000 ciclos de carga, según fabricante).

5

- Un regulador de carga, para adaptar el voltaje de salida de la celda o panel de concentración a los valores necesarios para cargar las baterías.

10

- Un cableado eléctrico adecuado a los requerimientos eléctricos finales de la estación.

- Un colector eléctrico 35 que, junto con la corona de orientación 18 (subsistema mecánico) permiten la correcta rotación en el eje acimutal y evitan que el cableado de los motores y de la celda solar se enreden al girar.

15

- Opcionalmente, convertidores para subir (step-up) o bajar (step-down) el voltaje entre los diferentes subsistemas según lo requieran las necesidades concretas de la estación final planificada. Por ejemplo, las celdas solares de concentración más habituales en el mercado son de 1 cm<sup>2</sup>, con una tensión de salida de 2.7 V y unos 5.6 A de corriente, por lo que es habitual emplear al menos un convertidor step-up para subir dicho voltaje al necesario para poder cargar las baterías (que habitualmente suelen trabajar entre 5 V y 50 V).

20

- Opcionalmente, si la estación lo requiere (por ejemplo, para su uso en hogares), puede contar con el resto de los componentes propios de cualquier sistema fotovoltaico. Por ejemplo, un inversor de DC-AC, o un sistema de carga desde la red eléctrica.

25

En una realización concreta, el sistema fotovoltaico de concentración 1 incluye una celda de concentración de 1 cm<sup>2</sup> capaz de soportar 900 soles y generar una potencia de hasta 15 W a 2,7 V; un sistema óptico de concentración, con una lente esférica de bola 2 de 20 cm de diámetro para focalizar la luz del sol en la celda solar; una unidad de control 12 que calcula la posición del sol en cada momento según el sistema de coordenadas altacimutal siguiendo los algoritmos de S. Kalogirou [1]; un sistema electrónico, con una placa Lionheart Pro que funciona a 12 V y dos motores (10,11) paso a paso con reductoras planetarias que permiten alcanzar una precisión de 0,035°; un sistema de baterías 14 de 12,6 V y 20400 mAh, que

30

alimentan la electrónica y se cargan gracias a la energía fotovoltaica generada; y un sistema estructural, fabricado en acero y madera y que da soporte a todos los componentes, permitiendo el adecuado funcionamiento de todos ellos. El sistema es totalmente autosuficiente, generando suficientes recursos para mantenerse funcionando mientras  
5 almacena el excedente para permitir la carga simultánea de hasta dos dispositivos electrónicos a alta velocidad (3 A), pudiendo cargar hasta catorce smartphones equipados con baterías de 3600 mAh. El sistema puede escalarse (ampliando las dimensiones del concentrador óptico, del sistema de celdas fotovoltaicas y de las baterías) según las necesidades energéticas.

10

En las **Figuras 4A** y **4B** se muestran dos vistas de la carcasa 6 (en concreto, un encapsulamiento de aluminio) que aloja el panel fotovoltaico 4 junto con el prisma óptico 5. La carcasa 6 incorpora en su base un disipador de calor 40, preferentemente de cobre. De la base de la carcasa 6 salen el terminal positivo 41 y el terminal negativo 42 de salida de la  
15 celda solar.

En la **Figura 5A** se ilustra la refracción de la luz solar 3 al utilizar una lente esférica de bola 2 (para simplificar la figura, sólo se muestran los rayos de luz incidentes en la lente que están contenidos en el plano 2D de la figura, siendo la dirección de propagación de la luz solar 3  
20 horizontal y el sentido de propagación de izquierda a derecha). Los rayos incidentes en la lente esférica de bola 2 se refractan. A la derecha de la lente esférica de bola 2 aparecen los rayos refractados 50, parte de los cuales (especialmente los rayos extremos 50a) tienden a alejarse de la zona de concentración 51 de los rayos.

En la **Figura 5B** se ilustran los rayos refractados 50 incidiendo en el prisma óptico 5 una vez  
25 atravesada la lente esférica de bola 2. Los rayos refractados 50, incluyendo los rayos extremos 50a que tienden a disgregarse, son redirigidos por el prisma óptico 5 hacia el panel fotovoltaico 4, evitando con ello que se pierda eficiencia en la concentración de los rayos solares. Al entrar en el prisma óptico 5, los rayos refractados 50 sufren una nueva refracción, varias reflexiones  
30 internas (para algunos de ellos, dependiendo del ángulo de incidencia en el prisma óptico 5), y una nueva refracción al abandonar éste e incidir sobre el panel fotovoltaico 4. Estos fenómenos ópticos permiten confinar la luz al interior del prisma óptico 5, agrupando y guiando los rayos de luz de forma que estos no se pierdan, como se apreciaba en el ejemplo de la Figura 5A. Para simplificar la representación, sólo se muestra el fenómeno de reflexión en las  
35 caras internas del prisma, obviando la refracción.

En la realización mostrada en la Figura 5B, en la cual no se representa la carcasa 6 que envuelve al prisma óptico 5 y el panel fotovoltaico 4, la forma del prisma óptico 5 es un tronco de pirámide rectangular (podría ser cuadrangular) de bases paralelas (i.e. pirámide cuadrangular/rectangular regular truncada de bases paralelas), con la base mayor 52 enfrentada a la lente esférica de bola 2 y la base menor 53 enfrentada y en contacto directo con el panel fotovoltaico 4, donde el área de la base menor 53 coincide preferentemente con el área del panel fotovoltaico 4. Sin embargo, se pueden utilizar prismas ópticos de guiado de luz con diferentes formas y estructuras, con tal que cumplan la función de dirigir los rayos refractados 50 por la lente esférica de bola 2 hacia el panel fotovoltaico 4.

El prisma óptico 5 es preferentemente un prisma cuadrangular (e.g. tronco de pirámide cuadrangular), fabricado en vidrio de calidad óptica K9 o similar, con el área de la base menor 53 coincidente con el área de la celda solar fotovoltaica de concentración y orientada hacia ella, y teniendo la cara opuesta a dicha base (base mayor 52 orientada hacia la lente esférica de bola 2) un área mayor. El área concreta de dicha cara, así como la altura del prisma, dependerán de la distancia a la que se deba situar la celda, que deberá ser tal que el área ocupada por la luz solar concentrada coincida con el área de la celda (si el área de la luz concentrada fuera menor, la celda no funcionaría correctamente, y si fuera superior, no se optimizaría la energía generada, ya que se desaprovecharía parte de la luz solar).

Para obtener los ángulos de acimut ( $z_s$ ) y de altura ( $\alpha_s$ ) del sol, la unidad de control 12 recibe en primer lugar la posición  $P$  y el tiempo  $T$  (incluyendo el día y la hora actuales). Estos datos ( $P$ ,  $T$ ) los puede obtener de una unidad de geolocalización 16, como por ejemplo un receptor GPS (**Figura 6A**). Alternativamente, el tiempo  $T$  lo puede obtener de un reloj en tiempo real 60 (RTC, Real-Time Clock) y la posición la puede recuperar accediendo a una memoria 61 (interna o externa) que tenga guardada la posición actual del sistema (**Figura 6B**). La posición  $P$  y el tiempo  $T$  se pueden obtener de otras formas diferentes, como por ejemplo utilizando una conexión a Internet, en el caso de que el sistema disponga de dicha conexión (e.g., a través de un módulo WiFi que se conecta a un router WiFi con acceso a Internet).

A partir de la posición  $P$  y el tiempo  $T$ , la unidad de control 12 obtiene la posición del sol 63, representado por ejemplo en el sistema altacimutal (ALT-AZ) o en cualquier otro sistema de referencia. En una realización, la posición del sol 63 comprende los ángulos de acimut ( $z_s$ ) y de altura ( $\alpha_s$ ) del sol, los cuales se pueden obtener de diferentes formas.

En una realización, la posición del sol 63 se obtiene mediante una consulta a una base de datos 62, tal y como se ilustra en el ejemplo de la Figura 6A. Por ejemplo, se puede utilizar una base de datos 61 astronómicas para obtener la posición del sol 63 con las coordenadas RA-DEC del sol (como las que utilizan en planetarios virtuales o telescopios) que correspondan a la posición  $P$  y tiempo  $T$  actuales, y hacer las transformaciones trigonométricas necesarias para pasar al sistema altacimutal, obteniendo los ángulos de acimut ( $z_s$ ) y de altura ( $\alpha_s$ ) del sol.

10 En otra realización, según se muestra en el ejemplo de la Figura 6B, la posición del sol 63 se obtiene aplicando un algoritmo de seguimiento solar altacimutal. Se describe a continuación el algoritmo de seguimiento solar altacimutal descrito en S. Kalogirou [1], aunque se podrían emplear otros algoritmos de seguimiento solar altacimutal. Dicho algoritmo incluye una serie de ecuaciones que presenta aproximaciones para el cálculo de los ángulos de altura ( $\alpha_s$ ) y de acimut solar ( $z_s$ ), suficientemente precisas para nuestro sistema:

- El acimut solar  $z_s$  se obtiene según la ecuación (1):

$$\sin(z_s) = \cos(d) * \sin(h) / \cos(\alpha_s) \quad (1)$$

siendo  $z_s$  el acimut solar,  $d$  la declinación,  $h$  el ángulo horario y  $\alpha_s$  la altitud solar.

20

- La altura solar  $\alpha_s$  se calcula según la ecuación (2):

$$\sin(\alpha_s) = \sin(L) * \sin(d) + \cos(L) * \cos(d) * \cos(h) \quad (2)$$

siendo  $L$  es la latitud.

- 25 - La declinación  $d$  se calcula según la ecuación (3):

$$d = 23.45 * \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + N)\right) \quad (3)$$

siendo  $N$  el número del día.

- El valor del ángulo horario  $h$  se puede aproximar con la ecuación (4):

$$30 \quad h = (AST - 12) * 15 \quad (4)$$

siendo  $AST$  el tiempo aparente solar, calculado según la ecuación (5):

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (5)$$

5 donde  $LST$  es el tiempo local estándar y  $ET$  es la ecuación del tiempo, el primero medido en horas decimales y el segundo en minutos;  $SL$  es la longitud estándar de la localización donde se encuentra el sistema, y  $LL$  la longitud local real, ambas medidas en grados.  $DS$  (del inglés “daylight saving”) es un término correctivo medido en minutos que puede valer 60 o 0 según se esté o no en horario de verano. Se puede aproximar el valor de  $ET$  con la ecuación (6):

$$ET = 9.87\sin(2B) - 7.53 \cos \cos (B) - 1.5\sin (B) \quad (6)$$

donde, según la ecuación (7):

$$10 \quad B = (N - 81) * \frac{360}{364} \quad (7)$$

En el caso del acimut solar  $z_s$  de la ecuación (1), los ángulos se miden desde el Sur, en sentido negativo hacia el Este, positivo hacia el Oeste, mientras que en el sistema de coordenadas altacimutal el acimut  $AZ$  se mide desde el Norte, sentido positivo hacia el Este.

15 Hay que tener en cuenta que  $\sin(x) \in [-1,1]$  y que  $\arcsen(x) \in [-90,90]$ , con lo cual solo se cubre la mitad de la circunferencia ( $-90^\circ, 90^\circ$ ), en principio los cuadrantes 1 (cuadrante superior derecho) y 4 (cuadrante inferior derecho). Sin embargo, en lo que al seno se refiere, un valor positivo podría corresponder a un ángulo de los cuadrantes 1 o 2, y uno negativo a un ángulo de los cuadrantes 3 o 4. Este valor del ángulo se puede calcular con el arco seno si se conoce el valor del seno e interpretar a qué cuadrante corresponde, lo que es importante para el acimut solar  $z_s$ . Usando el arco seno se obtienen unos valores entre  $[-90^\circ$  y  $90^\circ]$ . El valor obtenido será válido (teniendo en cuenta el sentido de medida del ángulo, positivo hacia el oeste) salvo en algunos casos en los que el sol sale por el noreste y se pone por el noroeste; se puede detectar cuando ocurre esto y corregir el valor obtenido para  $z_s$ , para llevarlo a los cuadrantes que corresponden (cuadrantes 1 y 4 en vez de cuadrantes 2 y 3):

- Si el  $\cos(h) > \text{tg}(d)/\text{tg}(L)$ , siendo  $L$  la latitud, no es necesario cambiar nada.
  - Si el  $\cos(h) < \text{tg}(d)/\text{tg}(L)$ , hay dos casos: si son horas de mañana  $z_s = -180^\circ + |z_s|$ , que pertenece al cuadrante 4, mientras que si son horas de tarde  $z_s = 180^\circ - |z_s|$ , que pertenece al cuadrante 1.
- 30

Es importante tener claro que en este caso  $-180^\circ$  y  $180^\circ$  es justo la dirección del Norte medido desde el Sur. Una vez calculada la altura ( $\alpha_s$ ) y el acimut solar ( $z_s$ ), la unidad de control 12 calcula las coordenadas altacimutales de giro del panel fotovoltaico 4, ya que se miden grados desde el Norte (lo que permite, por ejemplo, alinear el sistema usando un magnetómetro).

5

El ángulo acimutal ( $z_p$ ) del panel fotovoltaico, que es el ángulo en el sistema altacimutal ALT-AZ que hay que rotar el panel fotovoltaico 4 para que se oponga al sol 13, quedando situado en el lado opuesto de la lente esférica de bola 2, se define en la ecuación (8) teniendo en cuenta que  $z_p$  se mide desde el Norte,  $z_s$  se mide desde el Sur, y el panel fotovoltaico 4 debe colocarse en oposición al sol 13:

10

$$z_p = (360^\circ + z_s) \text{ mod } (360^\circ) \quad (8)$$

donde  $x \text{ mod } (360^\circ)$  representa "x módulo 360", es decir, reducir el ángulo al intervalo  $[0^\circ, 360^\circ]$  para evitar dar más de una vuelta.

15 La altura  $\alpha_p$  del panel fotovoltaico será la altura  $\alpha_s$  del sol, pero con signo contrario, según la ecuación (9):

$$\alpha_p = -\alpha_s \quad (9)$$

A continuación, se expone un ejemplo práctico calculando los ángulos solares el día 8 de marzo de 2022 a las 11:00h en la residencia VŠB-TUO de Ostrava en la República Checa, localizada en una latitud de 49.837 N y una longitud de 18.159 E:

20

- Para calcular el acimut solar  $z_s$  la unidad de control 12 emplea la ecuación (1):

$$\sin(z_s) = \cos(d) * \sin(h) / \cos(\alpha_s)$$

25

- Para calcular la altitud solar  $\alpha_s$  la unidad de control 12 utiliza la ecuación (2):

$$\sin(\alpha) = \sin(L) * \sin(d) + \cos(L) * \cos(d) * \cos(h)$$

- Mediante la ecuación (3) la unidad de control 12 calcula la declinación  $d$ :

30

$$d = 23.45 * \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + N)\right)$$

siendo N el número de días, que al ser 8 de marzo le corresponde el número 67, por lo que:

$$d = 23.45 * \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + 67)\right) = -5.597^\circ$$

- Se calcula la ecuación del tiempo  $ET$  según la ecuación (6):

$$ET = 9.87\sin(2B) - 7.53 \cos \cos (B) - 1.5\sin (B)$$

5 donde, empleando la ecuación (7):

$$B = (N - 81) * \frac{360}{364} = (67 - 81) * \frac{360}{364} = -13.85^\circ$$

por lo que:

$$ET = 9.87\sin(2 * (-13.85^\circ)) - 7.53 \cos \cos (-13.85^\circ) - 1.5 \sin (-13.85^\circ) = -11.54 \text{ min}$$

10

- En este caso de la ecuación (5) se sabe que  $LST$ , tiempo local estándar, es 11,  $SL$  es la longitud estándar,  $LL$  la longitud local y  $DS$  es el ahorro de luz diurna (valor 0 en esa fecha), por lo que la ecuación (5) queda:

$$AST = 11 + \left(-\frac{11.54}{60}\right) - \frac{4(15 - 18.159)}{60} = 11.02 \text{ horas}$$

15

- Con la ecuación (4) se puede calcular el ángulo horario  $h$ :

$$h = (AST - 12) * 15 = (11.02 - 12) * 15 = -14.7^\circ$$

- Con estos datos ya se puede resolver las ecuaciones (2) y (1) para calcular la altura solar  $\alpha_s$  y el acimut solar  $z_s$ :

20

$$\sin(\alpha_s) = \sin(L) * \sin(d) + \cos(L) * \cos(d) * \cos(h) = \sin(49.837) * \sin(-5.597) + \cos(49.837) * \cos(-5.597) * \cos(-14.7) = 0.55$$

$$\alpha_s = \arcsin \arcsin (0.55) = 33.12^\circ$$

25

$$\sin(z_s) = \cos(d) * \sin(h) / \cos(\alpha_s) = \cos(-5.597) * \frac{\sin(-14.7)}{\cos(33.12)} = -0.30$$

$$z_s = \arcsin \arcsin (-0.30) = -17.46^\circ$$

- Si se quiere calcular el acimut  $AZ$  en el sistema ALT-AZ (medido desde el Norte) se emplea la siguiente ecuación (10):

$$AZ = -17.46^\circ + 180^\circ = 162.52^\circ \quad (10)$$

- 5
- El ángulo acimutal  $z_p$  del panel fotovoltaico, expresado en el sistema ALT-AZ (medido desde el Norte), se calcula según la ecuación (8):

$$z_p = -17.46^\circ + 360^\circ = 342.54^\circ$$

- La altura  $\alpha_p$  del panel fotovoltaico es igual a la altura solar ( $\alpha_s$ ), cambiada de signo (según la ecuación 9):

10

$$\alpha_p = -\alpha_s = -33.12^\circ$$

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema fotovoltaico de concentración, caracterizado por que comprende:
- 5 una lente esférica de bola (2) configurada para concentrar la luz solar (3) mediante refracción;
- un panel fotovoltaico (4) de concentración;
- un prisma óptico (5) de guiado de luz configurado para dirigir los rayos refractados (5) por la lente esférica de bola (2) hacia el panel fotovoltaico (4);
- 10 una carcasa (6) configurada para alojar el prisma óptico (5) y el panel fotovoltaico (4);
- un sistema mecánico de rotación (7) de la carcasa (6) alrededor de un eje acimutal (8) y un eje de altura (9) en torno a la lente esférica de bola (2);
- al menos una batería (14) para almacenar la energía generada por el panel fotovoltaico (4);
- 15 una unidad de control (12) configurada para:
- obtener la posición ( $P$ ) y tiempo ( $T$ ) actuales;
- obtener la posición del sol (63) correspondiente a la posición ( $P$ ) y tiempo ( $T$ ) actuales;
- 20 calcular, utilizando la posición del sol (63), un ángulo de altura ( $\alpha_p$ ) y un ángulo acimutal ( $z_p$ ) para que el panel fotovoltaico (4) se coloque en torno a la lente esférica de bola (2) opuesto al sol (13); y
- operar el sistema mecánico de rotación (7) para colocar el panel fotovoltaico (4) en el ángulo de altura ( $\alpha_p$ ) y el ángulo acimutal ( $z_p$ ) calculados.
- 25 2. El sistema según la reivindicación 1, caracterizado por que comprende una unidad de geolocalización (16) configurada para obtener la posición ( $P$ ) y el tiempo ( $T$ ) actuales y enviar dicha información ( $P$ ,  $T$ ) a la unidad de control (12).
3. El sistema según la reivindicación 2, caracterizado por que la unidad de geolocalización (16) es un sistema de posicionamiento por satélite.
- 30 4. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el sistema mecánico de rotación (7) incluye una base (20) motorizada con capacidad de rotación

en el eje acimutal (8) y un columpio (21) motorizado que permite la rotación de un soporte (22) de la carcasa (6) en el eje de altura (9).

5 5. El sistema según la reivindicación 4, caracterizado por que la base (20) del sistema mecánico de rotación (7) incorpora en su parte superior una tapa (34) de aluminio para protección y disipación de calor.

10 6. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el prisma óptico (5) adopta una forma de tronco de pirámide cuadrangular o rectangular de bases paralelas, con la base mayor (52) enfrentada a la lente esférica de bola (2) y la base menor (53) enfrentada y en contacto directo con el panel fotovoltaico (4).

15 7. El sistema según la reivindicación 6, caracterizado por que el área de la base menor (53) del prisma óptico (5) coincide con el área del panel fotovoltaico (4).

8. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que la unidad de control (12) está configurada para obtener la posición del sol (63) mediante un algoritmo de seguimiento solar altacimutal.

20 9. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que la unidad de control (12) está configurada para obtener la posición del sol (63) mediante una consulta a una base de datos (62).

25 10. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la lente esférica de bola (2) está rellena de agua.

11. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la lente esférica de bola (2) está fabricada en polímero plástico o en vidrio óptico.

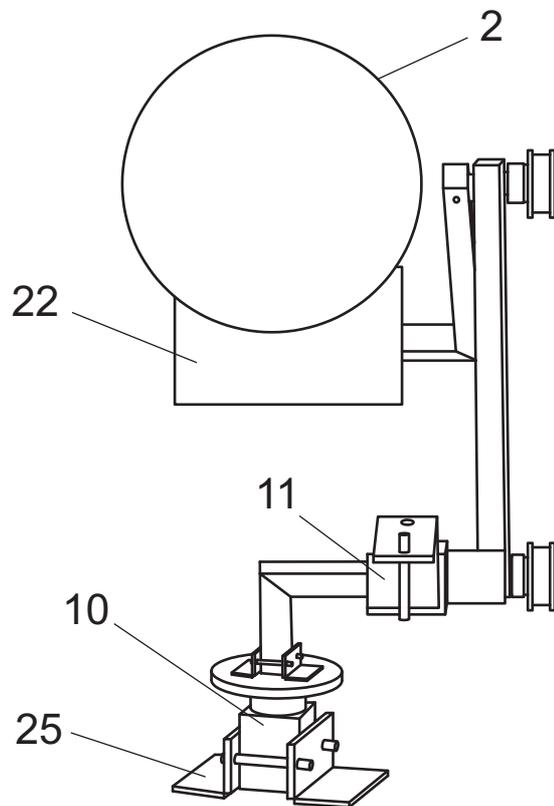
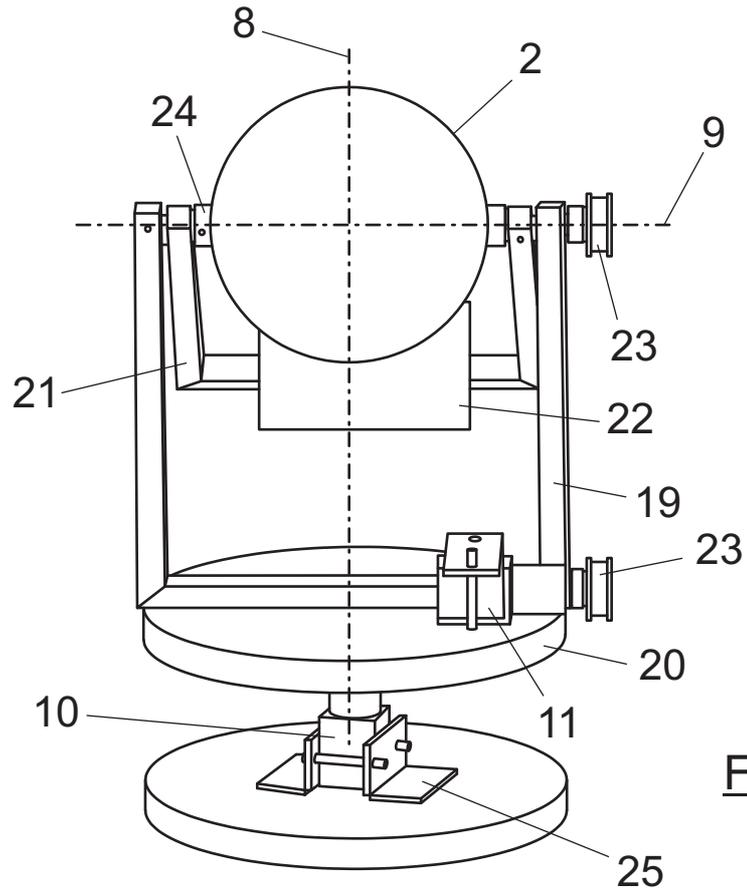
30 12. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la carcasa (6) encapsula al prisma óptico (5) y al panel fotovoltaico (4) evitando que los rayos refractados (50) incidan fuera del panel fotovoltaico (4).

13. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la carcasa (6) está fabricada en aluminio.

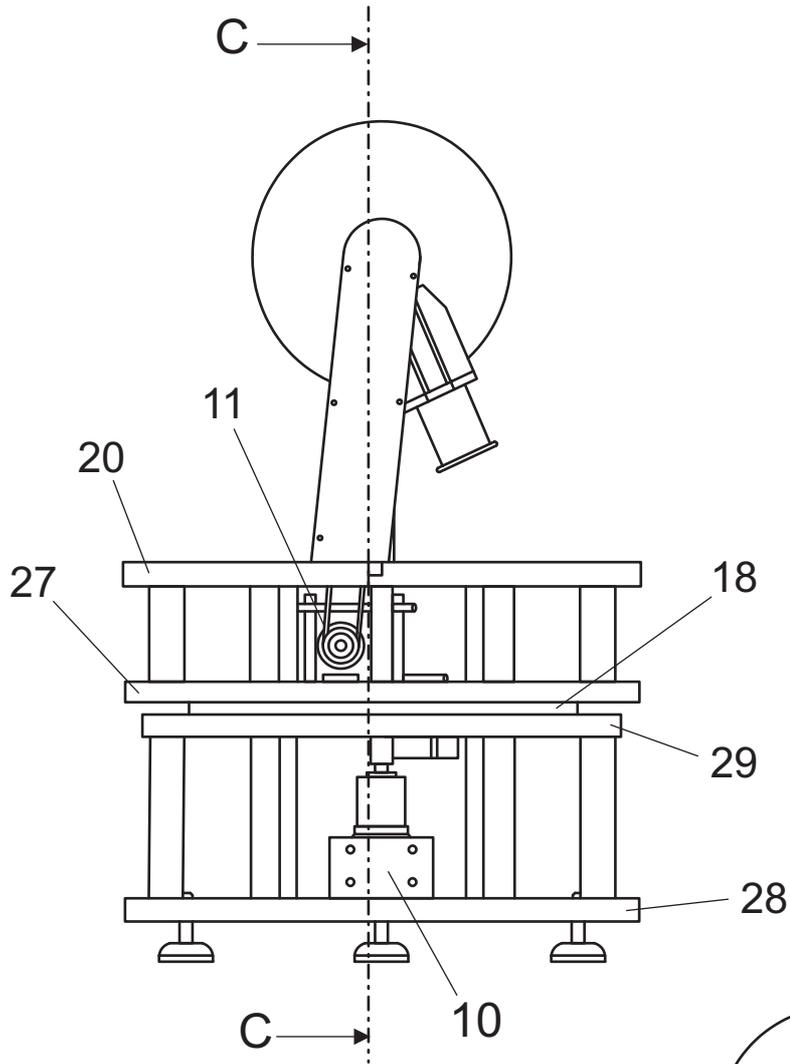
5 14. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la carcasa (6) incluye un disipador de calor (40).

15. El sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la lente esférica de bola (2) está integrada en un elemento estructural de una edificación.

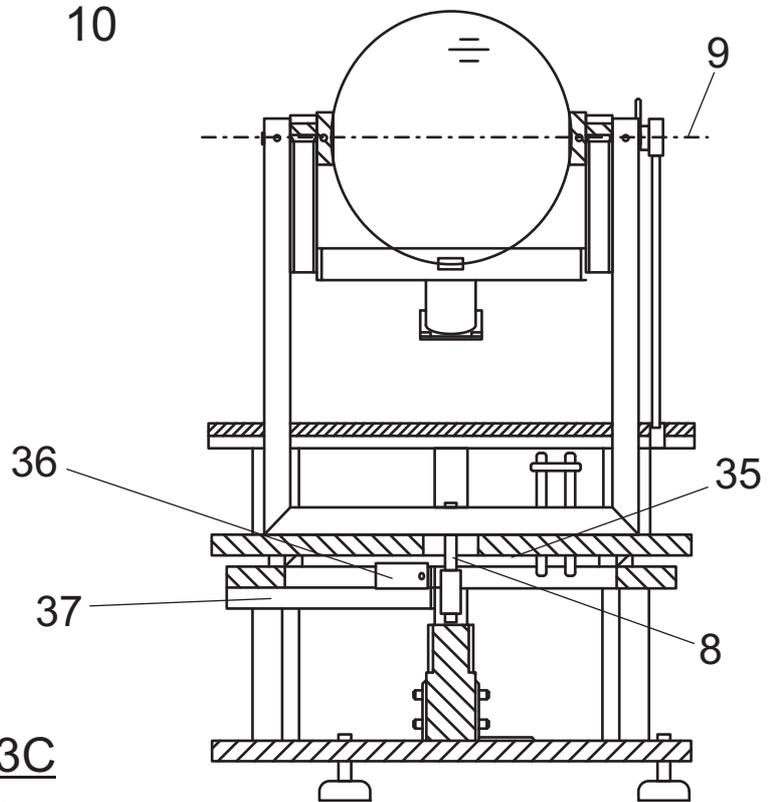








**FIG. 3B**



**FIG. 3C**  
SECCIÓN C-C

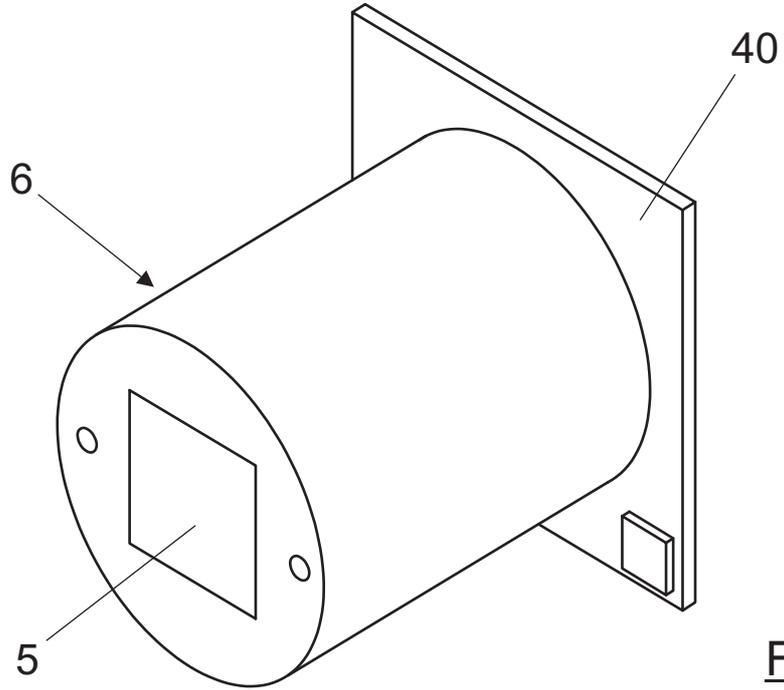


FIG. 4A

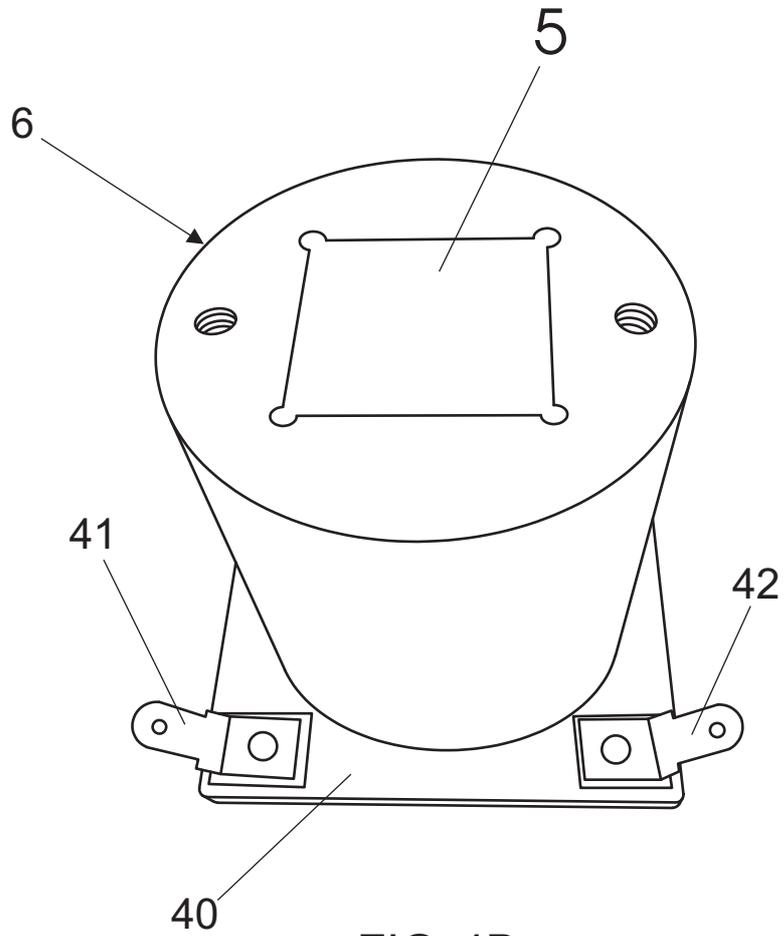
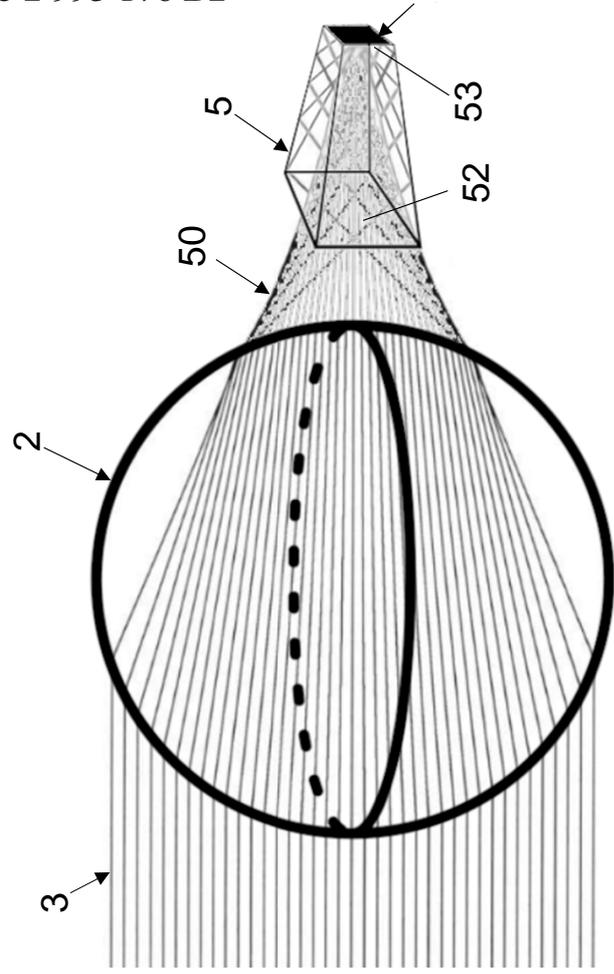
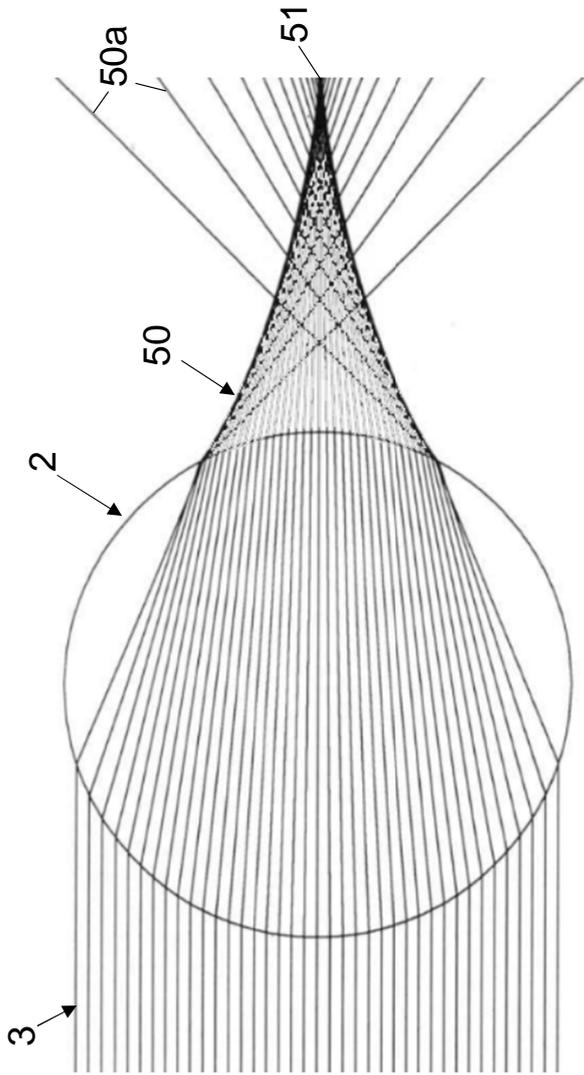


FIG. 4B



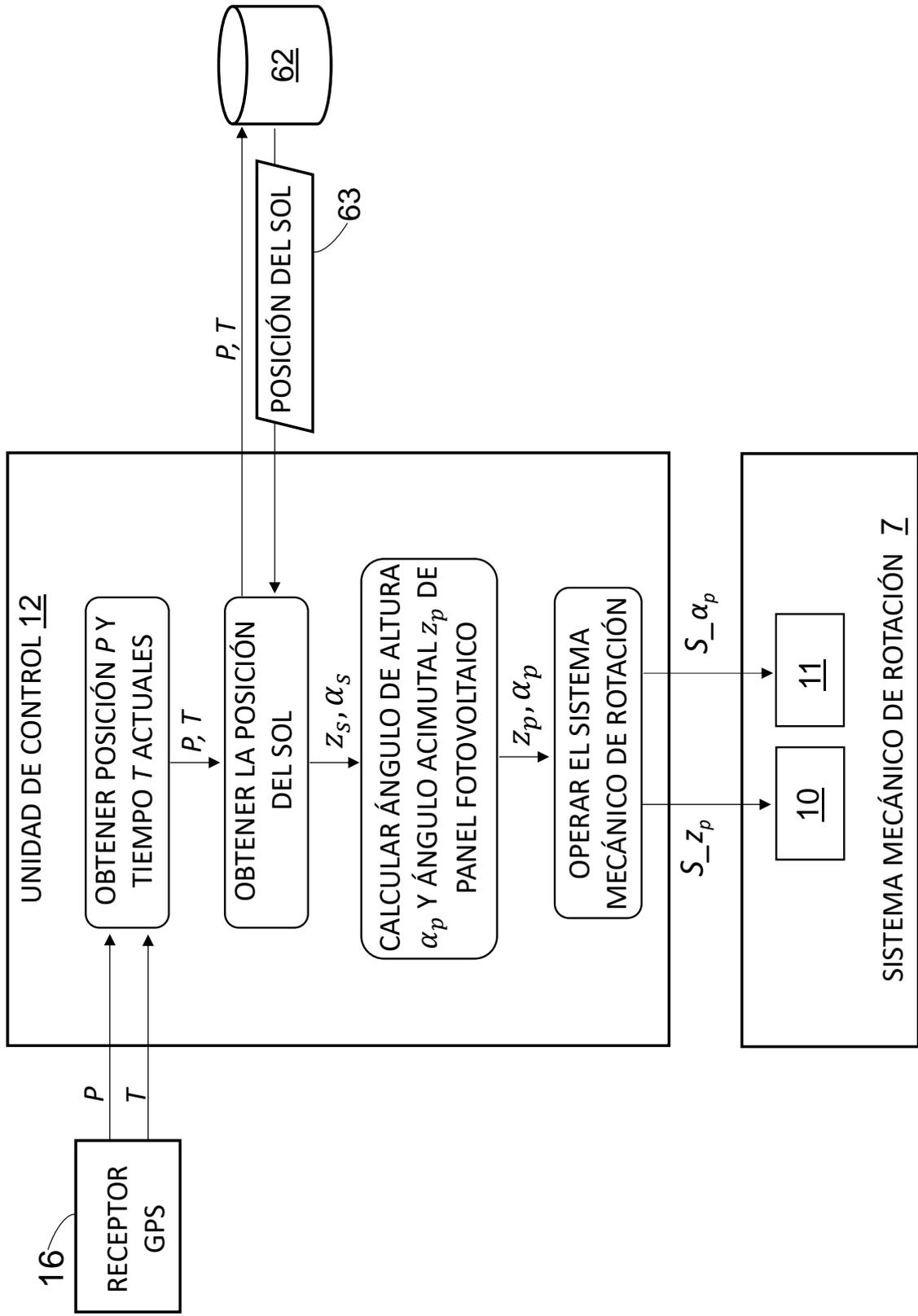


FIG. 6A

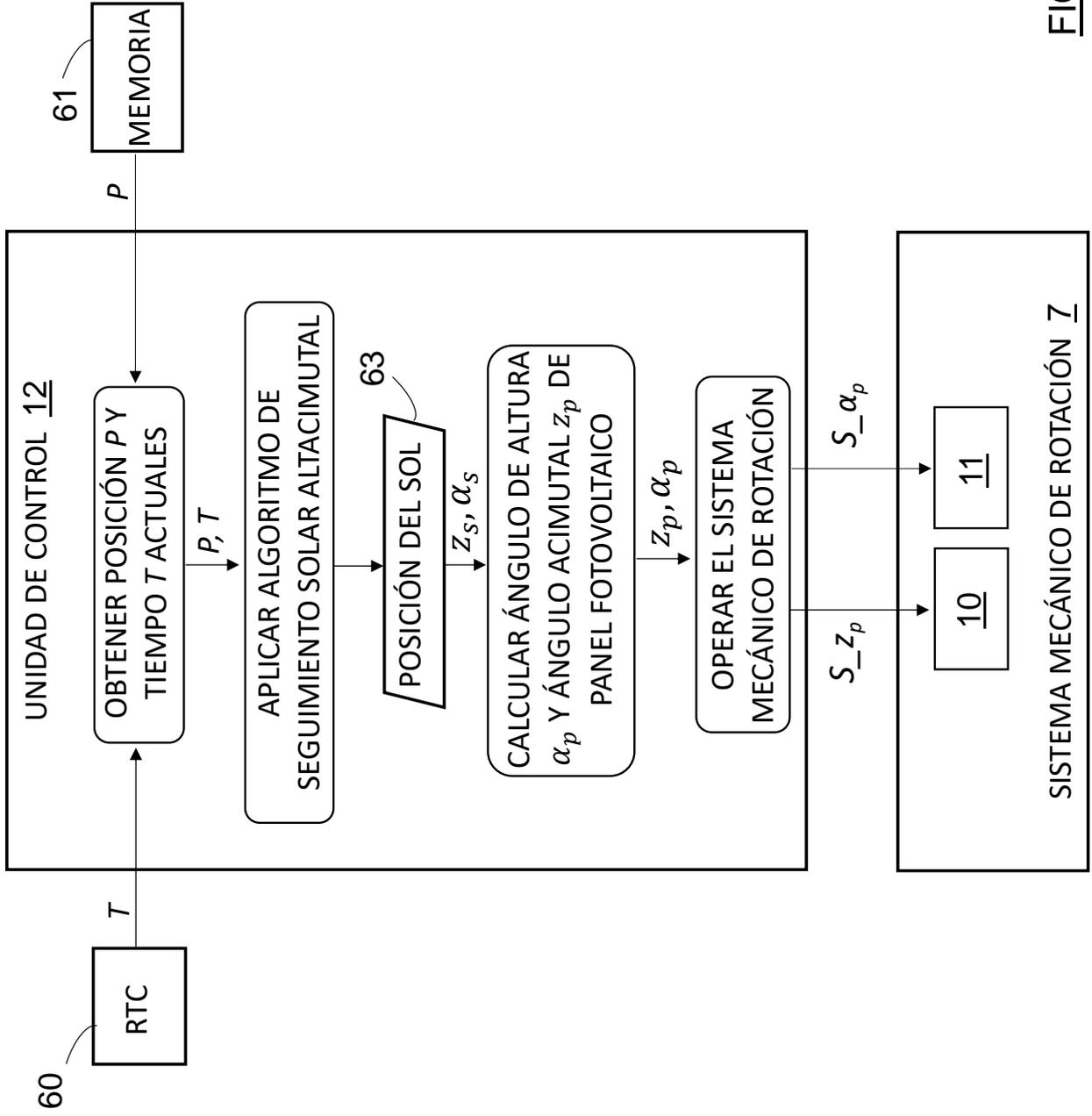


FIG. 6B