



Nuevo sistema de seguimiento solar de dos ejes basado en el mecanismo de biela – manivela

New solar tracking system based on rod-crank mechanism

José Manuel Palomar-Carnicero
Pedro Casanova-Peláez
Francisco Alberto Díaz-Garrido
Fernando Cruz-Peragón
Rafael López-García

Doctor Ingeniero Industrial
Doctor Ingeniero Electrónico
Doctor por la Universidad de Sheffield (Reino Unido)
Doctor Ingeniero Industrial
Doctor Ingeniero Industrial

Universidad de Jaén
Universidad de Jaén
Universidad de Jaén
Universidad de Jaén
Universidad de Jaén

Recibido: 12/01/09 • Aceptado: 08/04/09

ABSTRACT

- In the last few years, photovoltaic solar energy has become one of the most popular renewable energies in Spain. However, one of the main drawbacks of this source of energy is the high cost of photovoltaic solar panels in relation with the amount of energy that can be produced. This issue can question the profitability of this particular type of facilities. Nevertheless, recent studies have shown that an optimized mechanical design together with a robust and reliable electronic tracker system makes possible to achieve a mean increase of the solar radiation capture up to 30% compared with fixed facilities. In addition, this improvement in the produced energy can be achieved with a small cost increase respect the total cost of the facilities. In this paper, a prototype of a new solar tracker system is presented. The system is based on a novel cinematic mechanism moved using a set of hydraulic actuators. The new design has made possible to optimize aspects such as the simplicity, the mechanical strength, the performance reliability or the system maintenance. Results are quite promising and highlighting.
- **Key words:** Solar tracker, rod-crank, hydraulic, electronic tracking system.

RESUMEN

La energía solar fotovoltaica en los últimos tiempos se ha convertido en uno de los recursos energéticos renovables de mayor auge en España. Sin embargo, uno de sus principales problemas es el alto coste de los paneles solares fotovoltaicos en relación a la cantidad de energía que producen, lo que fuera del marco regulador actual puede inducir a cuestionar la rentabilidad de este tipo de instalaciones. Estudios previos han desvelado que un diseño mecánico optimizado, junto con un sistema electrónico de seguimiento robusto y altamente fiable, puede llegar a conseguir aumentos en la captación solar superiores al 30 % de media con respecto a sistemas fotovoltaicos sin seguimiento, con un incremento pequeño en el coste total de la instalación. En este trabajo se presenta un prototipo de seguidor con un novedoso diseño cinemático

basado en un mecanismo biela-manivela con accionamiento hidráulico. Este diseño ha permitido optimizar aspectos tales como la simplicidad y robustez mecánica, la fiabilidad de funcionamiento o el mantenimiento del sistema, entre otros. Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios y prometedores.

Palabras clave: Seguidor solar, biela - manivela, accionamiento hidráulico, sistema electrónico de seguimiento.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica se está convirtiendo en uno de los recursos energéticos renovables de mayor auge en los últimos años, debido en gran parte al marco regulador a la que está sometida y a los avances tecnológicos que la están acompañando [1].

Esto ha propiciado que recientemente el número de instalaciones de energía solar fotovoltaica conectadas a red [2] se haya multiplicado, constituyendo una fuente atrayente de inversiones, que en ocasiones puede llegar a proporcionar una rentabilidad anual cercana al 10 % de la inversión inicial, aunque con la contrapartida de requerir grandes inversiones iniciales y unos relativamente altos plazos de amortización.

En este sentido la provincia de **Jaén**, y en general toda **Andalucía Oriental**, constituyen zonas de gran potencial para la implantación de este tipo de instalaciones, debido a los altos niveles de radiación solar de que dispone y el número elevado de días despejados al año que se presentan. Sin embargo, uno de los principales problemas que tiene asociada esta energía renovable es el alto coste de los paneles solares fotovoltaicos en relación a la cantidad de energía que producen, lo que fuera del marco regulador actual puede inducir a cuestionar la rentabilidad de este tipo de instalaciones.

A pesar de ello, esta problemática puede ser en gran parte minimizada optimizando la captación solar de los paneles. En este sentido los sistemas de seguimiento solar constituyen una alternativa de enorme potencial para maximizar la producción de energía eléctrica [3-4]. Estudios previos realizados por investigadores del *Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén* han desvelado que un diseño mecánico optimizado junto con un sistema electrónico de seguimiento robusto y altamente fiable, puede llegar a conseguir aumentos en la captación solar superiores al 30 % de media (de forma puntual puede superarse el 40%) con respecto a sistemas fotovoltaicos sin seguimiento, con un incremento pequeño en el coste total de la instalación.

2. JUSTIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL SEGUIMIENTO SOLAR

Seguidamente se pasará a justificar la ganancia en la captación de la radiación global incidente que presentan los sistemas de seguimiento solar de dos ejes respecto a aquéllos que mantienen una posición inclinada fija y horizontal. A pesar de que la radiación solar fuera de la atmósfera posee un valor muy estable (en torno a $1,35 \text{ kW/m}^2$) [5], la rotación de la tierra y la naturaleza de la atmósfera varían este valor tanto a lo largo del día como a diferentes altitudes y latitudes, por lo que la irradiancia o radiación incidente instantánea a nivel del suelo en superficie horizontal tiene una componente directa (la más interesante) y otra difusa. Mientras que la componente directa de la radiación se comporta como un vector (con dirección y sentido) y es la de mayor importancia, la componente difusa se recibe desde todas las direcciones celestes, es decir, es una radiación hemisférica. El comportamiento real de esta componente difusa es

complejo, existiendo desde modelos simples isótropos hasta modelos más complejos anisótropos.

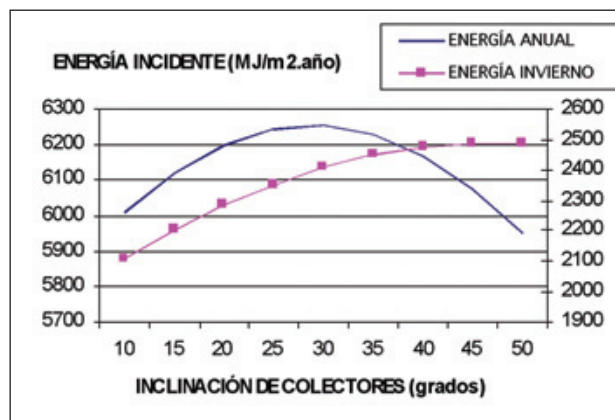


Figura 1. Optimización de la captura energética anual para la provincia de Jaén.

Cuando se inclinan los sistemas de captación, pierden parte de esta componente difusa, pero en contraprestación reciben parte de la que se refleja en el entorno, como suelo, montañas, edificios, etc. (albedo). Si la inclinación es adecuada, la componente directa aumenta, lo que equivale casi siempre a la llegada de mayor irradiancia global al colector. La energía captada en un día o exposición global diaria ($\text{kJ/m}^2.\text{día}$) en cada caso corresponderá a la integral a lo largo del tiempo de la curva instantánea. Así, al inclinar un colector convenientemente se capta una mayor cantidad de energía. De estudios detallados, se conoce que la inclinación que maximiza la captura energética está en un rango $\pm 15^\circ$ respecto a la latitud. Al evaluar los datos de forma global para un año en Jaén [6], se observa que en torno a 30° de inclinación, la captura anual de energía será máxima, como muestra la figura 1. Puesto que, lo que realmente interesa es maximizar la captura de energía en los meses de invierno, la figura 1 muestra que la energía máxima se obtendrá para una inclinación mayor ($\sim 48^\circ$).

Se ha comprobado como una inclinación (y orientación o azimut terrestre) del colector supone una ganancia en la captura de energía solar respecto a otro horizontal. Para llevar más allá esta optimización en la captura energética, el límite llega en aquel caso donde siempre el ángulo de incidencia de la radiación es cero. Por definición, este ángulo de incidencia es el que forma la radiación directa incidente con el vector normal al plano del colector. En el último caso, la componente directa de la radiación llega de forma íntegra al colector, lo que supone, en la mayoría de las ocasiones, mayor captación energética. Además, y para el caso de la ciudad de Jaén, la figura 2 presenta la exposición global diaria, al comparar para un día medio de cada mes del año los tres casos previamente indicados.

La figura 2 muestra claramente una sustancial mejora en cuanto a exposición global diaria de un sistema con

seguimiento en dos ejes respecto de los sistemas sin seguimiento sobre superficie horizontal e inclinada. La figura 3 indica el porcentaje de mejora en la captación con seguimiento a dos ejes respecto a la de una inclinación de 30° (orientado al sur) que, como se vio en la figura 1, supone la máxima captación energética solar anual sin seguimiento. El valor medio de ganancia anual, cuando se compara el sistema con seguimiento frente a un sistema fijo con superficie inclinada 30°, ronda el 33%, llegándose de forma puntual a ganancias del 41%.

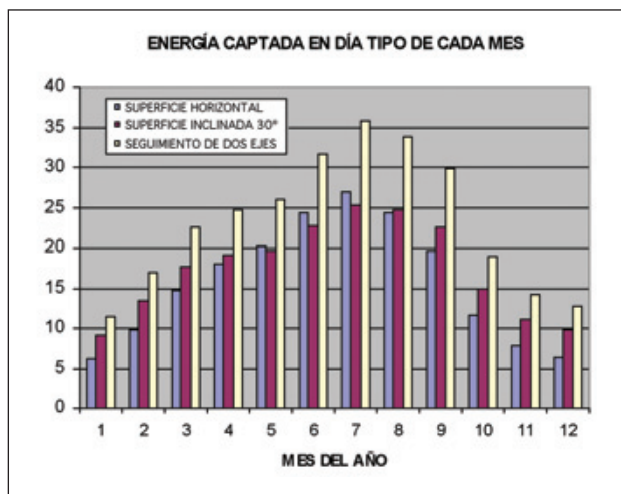


Figura 2. Captura energética global en un día medio de cada mes, para diferentes condiciones en Jaén

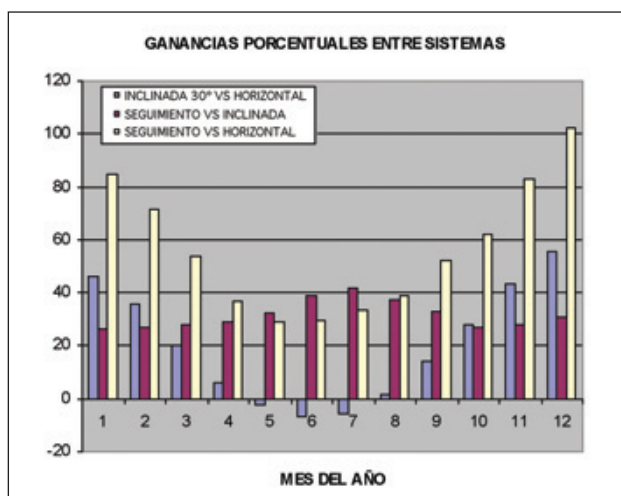


Figura 3. Estimación de las ganancias porcentuales respecto a diferentes sistemas instalados en la provincia de Jaén.

Una clara evidencia del alto potencial de la energía solar es el incremento de huertos solares que están apareciendo en toda Andalucía y muy especialmente en la provincia de Jaén, sirva como ejemplo los huertos solares de **Villanueva de la Reina**, **Andujar** o **Mures**, entre otros. Otro aspecto importante que pone de manifiesto el potencial y el futuro

de este tipo de instalaciones es el elevado número de empresas especializadas en energía solar que recientemente están emergiendo.

A la vista de las conclusiones expuestas, se plantea la posibilidad de desarrollar un sistema de seguimiento solar de dos ejes que permita maximizar la rentabilidad de la instalación fotovoltaica.

3. FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

Los sistemas de seguimiento solar son dispositivos que actúan orientando las células solares con el objeto de maximizar su captación solar a lo largo del día [7]. Una manera de clasificar los sistemas de seguimiento es de acuerdo con la estrategia de seguimiento adoptada. En este sentido, existen los sistemas de seguimiento en un eje, que solo permiten el movimiento del seguidor de Este a Oeste (movimiento acimutal), manteniendo el ángulo de inclinación del panel fijo. Adicionalmente, existen los sistemas de seguimiento en dos ejes, los cuales además de variar la orientación del panel de Este a Oeste permiten variar el ángulo de inclinación del mismo, lo que hace posible orientar y mantener de manera casi permanente la superficie perpendicular a los rayos del sol (ángulo de incidencia 0°). Los sistemas de seguimiento en dos ejes son ligeramente más costosos que los de un solo eje, pero permiten un mayor aprovechamiento energético, lo que se traduce en menores plazos de amortización de la instalación. La figura 4 muestra algunos de los modelos de seguidores existentes actualmente en el mercado.

Respecto a la mecánica del seguidor, para garantizar el máximo aprovechamiento energético de las placas solares, es necesario que el sistema sea mecánicamente robusto y preciso en su orientación. Es decir, la rentabilidad de la instalación está altamente condicionada a factores tales como el buen funcionamiento mecánico del seguidor y una buena estrategia de control que garantice que el sistema se encuentra siempre en la posición óptima. Errores en el funcionamiento del seguidor, bien por fallo mecánico del mismo o por fallo en el control de la posición, reducirían el rendimiento de la instalación, lo que afectaría dramáticamente a la rentabilidad de la misma.

Actualmente son múltiples los sistemas de seguimiento solar en dos ejes que se pueden encontrar en el mercado (figura 4). En todos los casos utilizan el mismo principio de funcionamiento (mantener el ángulo de incidencia a 0°), diferenciándose básicamente en aspectos constructivos y de diseño tales como la mecánica del sistema de seguimiento adoptado (ver figura 5) (sistemas hidráulicos, tornillos de potencia, sistemas de tornillo sin fin, motor eléctrico con motorreductor, etc) o el tipo de estructura adoptada (celosía o estructura tubular (ver figura 4)) entre otros.

La mayoría de los sistemas comerciales utilizan dos técnicas fundamentalmente: cálculo matemático de la posición solar o sensores de radiación (de tipo fotoeléctrico) para llevar los paneles a la orientación de máxima radiación

A pesar de ello, los sistemas comerciales recurren en muchas ocasiones a soluciones mecánicas complejas en las que el mantenimiento del equipo y/o la reparación del mismo en caso de avería puede resultar un problema, siendo preciso en algunos casos desmontar completamente el seguidor. En este sentido, la simplicidad y robustez mecánica son atributos fundamentales que deberían ser tenidos en cuenta en el diseño mecánico del seguidor, a fin de facilitar las labores de mantenimiento. Asimismo, existen aspectos de diseño que son claramente mejorables

mediante un estudio exhaustivo y detallado de la cinemática del seguidor, así como de los componentes críticos del mismo, tales como rodamientos o los propios sistemas de accionamiento.

Otro aspecto clave de la eficiencia del sistema de seguimiento es la estrategia de control de la posición adoptada. La mayoría de los sistemas comerciales utilizan dos técnicas fundamentalmente: cálculo matemático de la posición solar o sensores de radiación (de tipo fotoeléctrico) para llevar los paneles a la orientación de



Figura 4. Modelos de seguidores solares de dos ejes existentes actualmente en el mercado.

A) Modelo de seguidor de la firma MECASOLAR (Sistema de piñón + corona para movimiento acimutal y tornillo de potencia para movimiento cenital)

B) Modelo de seguidor de la firma ADES (Sistema de piñón + corona para movimiento acimutal e hidráulico para movimiento cenital)

C) Modelo de seguidor de la firma SOLENER (Sistema de engranaje + husillo para movimientos acimutal y cenital)



Figura 5. Detalle de un mecanismo para el movimiento de un seguidor solar A) cenital (sistema de tornillo de potencia), B) acimutal (sistema de piñón + corona).

máxima radiación. Cada uno de estos sistemas tiene ciertas ventajas e inconvenientes. Pasamos a describir brevemente el funcionamiento de cada uno de estos sistemas:

- El sistema mediante cálculo de la posición solar se basa en un reloj-calendario en tiempo real que debe dar de la forma más precisa posible la fecha y hora; esta información, junto a la latitud y longitud de la posición del sistema permite, mediante cálculos matemáticos más o menos complejos, la determinación de la posición del Sol en cada momento, y con ella la orientación adecuada del sistema. Este sistema debe, por tanto, incorporar un reloj de tiempo real con su batería de mantenimiento como fuente principal de datos, dependiendo de su correcto funcionamiento (precisión fundamentalmente) el cálculo de la posición del Sol. Asimismo, es necesario disponer de la latitud y longitud del lugar donde se ubica el seguidor; esta se debe determinar en el momento de la instalación (hoy en día es fácil con los sistemas GPS) e introducirse al sistema mediante un programador adecuado (un ordenador portátil puede ser suficiente). Por otra parte, resuelta la posición del Sol en cada momento, es necesario manejar los actuadores eléctricos para posicionar correctamente el seguidor; para ello se recurre a una realimentación de la posición del sistema para cada uno de los 2 ejes, mediante sensores de posición absolutos o incrementales.
- El sistema mediante sensores de radiación se basa en 3 sensores de luminosidad (fotodiodos, células solares o similares) dispuestos adecuadamente de forma que utilizando uno de ellos como referencia, el sistema se mueva en los 2 ejes hasta que la luminosidad recibida por los tres sea similar. En ese momento, se debe suponer que el panel se encuentra perpendicular a la radiación directa. Se colocarán los tres sensores entre planos perpendiculares opacos que crearán una

sombra sobre el sensor de referencia o sobre cada uno de los otros dos, cuando el panel no se encuentre perpendicular al Sol. La diferencia de luminosidad entre el sensor de referencia y cada uno de los otros permitirá determinar el sentido del giro que debe realizar el sistema de seguimiento para mantenerse en todo momento perpendicular al Sol. Este sistema, en principio más simple que el anterior, puede provocar malfuncionamientos en los momentos con alta radiación difusa, ya que las sombras no serán lo suficientemente oscuras para determinar los errores de posición; también la presencia de claros ocasionará movimientos erráticos con un consumo de energía en el posicionamiento sin mejora significativa en la generación. Además, pueden aparecer problemas por la acumulación de suciedad sobre el captador de radiación, que llevarían el sistema a un malfuncionamiento completo e impredecible.

La posibilidad de ensayar un sistema híbrido que combine las ventajas de las dos estrategias de control descritas resulta altamente atractiva, permitiendo un posicionamiento inicial mediante cálculo de posición solar y un ajuste más óptimo por medida de radiación.

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño serán las condiciones de seguridad del sistema. Para ello hay que tener en consideración la velocidad del viento, ya que la superficie expuesta es elevada y será necesario posicionarla horizontalmente ante velocidades de viento excesivas. Otros aspectos de seguridad se tendrán en cuenta para evitar roturas en el sistema mecánico ante posibles bloqueos que se puedan producir por elementos externos que se introduzcan en los mecanismos de giro.

Por último, el sistema deberá contener también un sistema de comunicaciones adecuado para centralizar la monitorización de la planta (tanto a nivel de generación de energía como de operaciones de mantenimiento) e incluso el control remoto de los seguidores.

Hasta la fecha se han estudiado en el *Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén*, a petición de empresas de la zona, algunos de los aspectos previamente descritos, aunque en todos los casos utilizando herramientas como complejos cálculos matemáticos, desarrollo de modelos o simulaciones mecánicas. La construcción y ensayo de un prototipo a escala real permitiría un paso más en el estudio de todos estos aspectos descritos, de enorme importancia para garantizar la rentabilidad de la instalación. Adicionalmente, también sería posible hacer un seguimiento real del sistema, lo que permitiría validar experimentalmente los resultados previos en cuanto a mejora de la captura energética, identificar mediante el uso los aspectos y componentes más críticos del diseño, estudiar la integridad estructural de los elementos mecánicos de mayor criticidad, así como estudiar cuidadosamente la estrategia de control a adoptar para garantizar siempre que el seguidor está en la posición óptima.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DESARROLLADO

Como se ha indicado anteriormente, son múltiples los sistemas de seguimiento solar en dos ejes que se pueden encontrar en el mercado. Sin embargo, existen aspectos de diseño que son claramente mejorables mediante un estudio exhaustivo y detallado de la cinemática del seguidor, así como de los componentes críticos del mismo, tales como rodamientos o los propios sistemas de accionamiento. De esta manera, y tras mantener múltiples contactos con la empresa **Proenersol S.C.A.**, surge la idea de desarrollar un prototipo de seguidor solar de dos ejes de 10kWp (superficie 84 m²), optimizado mecánicamente respecto a otros sistemas comerciales, utilizando un sistema electrónico de control para el seguimiento realizado a medida y que incorpore parte de los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por el grupo BIOSHAE TEP-169 en el campo de la energía solar. Esta idea se materializa en un contrato de colaboración (Contrato OTRI JME/Nº Exp.:762) mediante el cual la *Universidad de Jaén*, a través del *Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera* y el grupo BIOSHAE TEP-169

(BIOcombustibles y Sistemas de AHorro Energético), se compromete a diseñar y gestionar la fabricación, montaje y puesta a punto del prototipo atendiendo a las siguientes premisas de diseño:

- Simplicidad mecánica
- Robustez mecánica y fiabilidad de funcionamiento
- Electrónica de seguimiento simple y fiable
- Mantenimiento bajo (operaciones rutinarias con tiempos mínimos de operación)

El sistema desarrollado consiste en un dispositivo cinemático para seguimiento solar en dos ejes, con accionamiento hidráulico, permitiendo el giro en el plano acimutal y cenital (figura 6). El conjunto se compone de cuatro apartados fundamentales: el sistema de giro para el plano acimutal, la estructura (compuesta de torre y vela), el sistema de movimiento en el plano cenital y el sistema de control.

4.1 SISTEMA DE GIRO EN EL PLANO ACIMUTAL

El sistema propuesto está constituido por dos anillos (2.5 m de diámetro), uno fijo y otro móvil que gira con respecto al anterior mediante un sistema de ruedas (rodamiento axial). El movimiento de giro de un anillo respecto de otro se realiza mediante un sistema hidráulico constituido por cuatro pistones articulados en sus dos extremos conectados dos a dos, y convenientemente comandados para cada instante del día (figura 6).

La configuración de cuatro pistones permite que el sistema esté compensado mecánicamente, lo que permite minimizar los empujes radiales, haciendo posible un equipo más compacto, simple, optimizado y robusto que los actualmente existentes en el mercado.

El fácil mantenimiento del sistema es otro aspecto de vital importancia, por lo que se ha optado porque el sistema

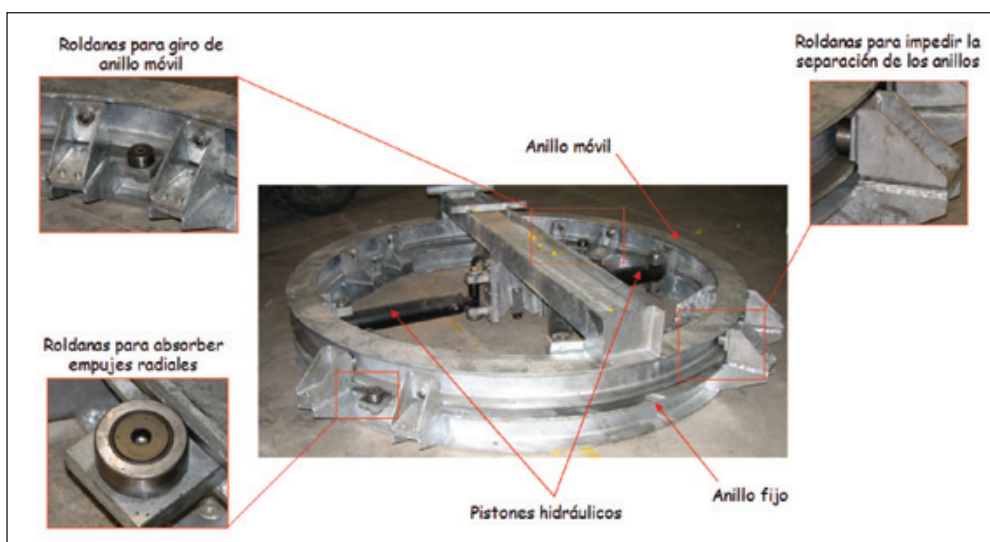


Figura 6. Detalle de los elementos que componen el sistema de giro en el plano acimutal.

de giro y accionamiento acimutal se encuentre situado en la base del seguidor. Todo ello se encuentra instalado sobre una base de hormigón anclada al terreno.

La figura 7 muestra algunos de los resultados obtenidos tras analizar de la cinemática del sistema.

cambio de un régimen de trabajo a otro (figura 7B); en esta posición, uno de los cilindros de cada par se encuentra en posición radial, no contribuyendo al giro del anillo. Para el cálculo del momento resistente máximo que son capaces de vencer los hidráulicos, se ha considerado que la posición

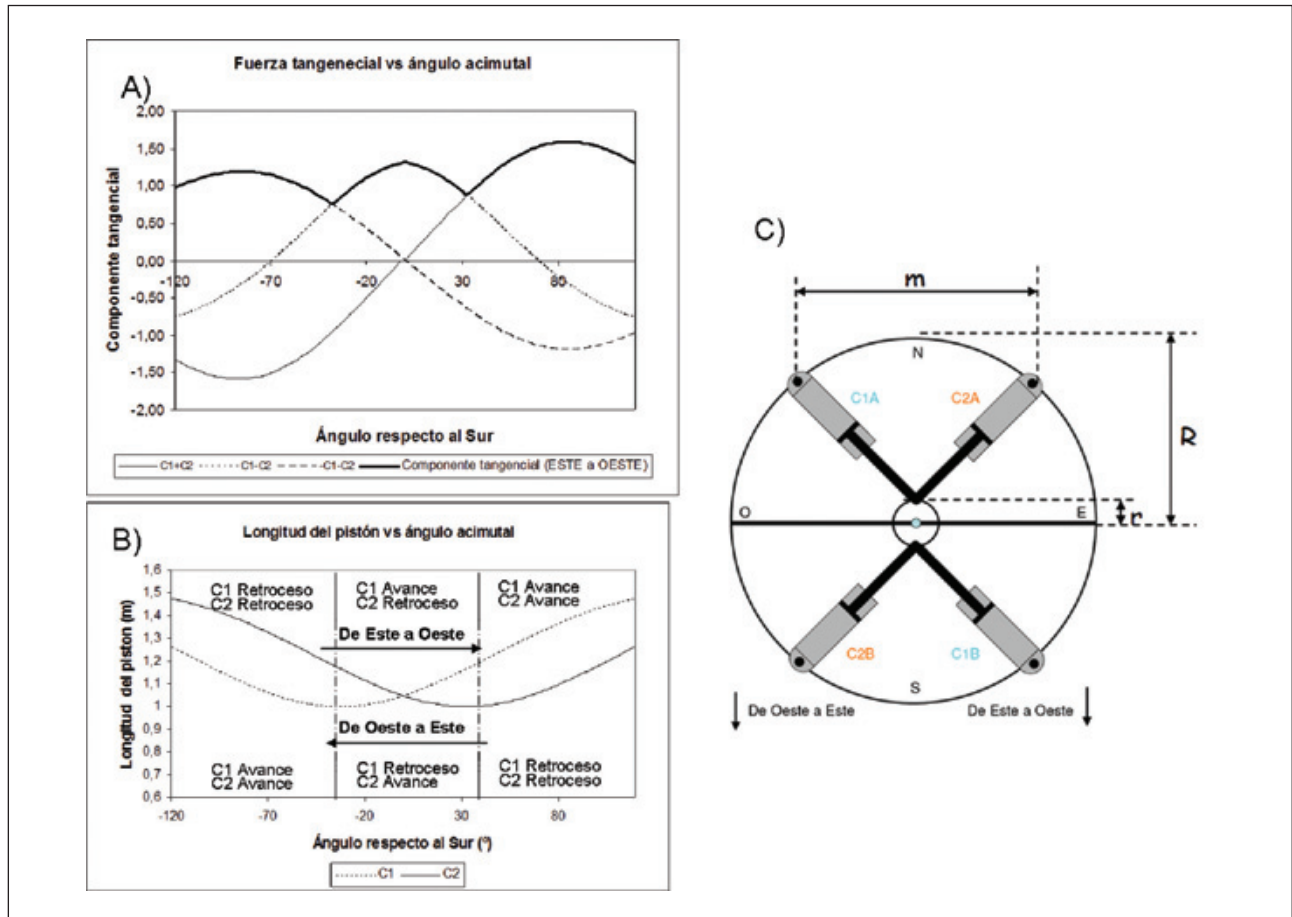


Figura 7. Datos relativos a la cinemática del movimiento acimutal A) Gráfica en la que se ilustra la variación de la componente tangencial (responsable del giro en el plano acimutal) con el ángulo respecto al Sur (movimiento de Este a Oeste), B) Gráfica en la que se ilustra la variación de la longitud de los pistones con el ángulo respecto al Sur durante el movimiento en el plano acimutal C) Esquema del mecanismo para el movimiento acimutal.

Para el análisis de la posición más crítica, se ha considerado un par de cilindros y se han analizado distintas posiciones de acuerdo con el ángulo que forman las botellas, obteniendo las componentes de empuje en las direcciones radial y tangencial (la responsable del giro, figura 7A). Las variables sobre las que se ha actuado se encuentran ilustradas en la figura 7C (radio del anillo, R , excentricidad de los hidráulicos respecto al del centro giro, r , y distancia, m , entre cada par de pistones). Para el cálculo se ha considerado que cuando el cilindro retrocede, realiza un 25% menos de fuerza que cuando avanza para la misma presión de aceite. Esto es cierto si se considera que el área del cilindro es diferente para uno y otro lado. Como se puede apreciar en la figura 7A los puntos críticos (punto de menor fuerza tangencial) ocurren cuando se produce el



Figura 8. Vista de la estructura (peso 4000 kg). Fotografía del conjunto formado por la torre y la vela.

más desfavorable ocurre cuando uno de los dos cilindros está en posición puramente radial y el otro se encuentra retrocediendo ($\pm 38^\circ$ con respecto al Sur).

Las figura 7B muestra como varía la carrera de los cilindros a medida que el sistema gira en el plano acimutal.

4.2 ESTRUCTURA

Se compone de dos partes: la torre, la cual se encuentra convenientemente unida en un extremo al anillo móvil del sistema de giro en el plano acimutal; y la vela (dimensiones 7m x 12m), unida a la torre en su otro extremo mediante dos articulaciones para permitir el giro de la misma (figura 8). La torre (altura 4m) es una estructura de celosía construida con barras unidas mediante uniones atornilladas, para reducir peso y facilitar el transporte.

4.3 SISTEMA DE MOVIMIENTO EN EL PLANO CENTAL

Para el giro de la vela se han dispuesto dos cilindros hidráulicos con las mismas características que los empleados para el movimiento en el plano cenital. La disposición geométrica de los cilindros se muestra en la figura 9.

Los valores correspondientes a las distancias a y b (figura 9B) son fijos, siendo la magnitud c variable a medida que va variando el ángulo de inclinación de la vela. El ángulo máximo de giro de la vela, de acuerdo con la configuración adoptada en la figura 9A, se encuentra limitado a 70° . La figura 9C muestra como varía la longitud del pistón a medida que varía el ángulo de giro de la vela. Así mismo, la figura 9C ilustra como varía de la componente tangencial ejercida por los cilindros (responsable del giro) con el ángulo de inclinación de la vela.

4.4 SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL

Basado en un microcontrolador de última generación, implementa un potente algoritmo que calcula la posición del sol para cada instante del año. El sistema (figura 10) ha sido diseñado a medida tanto a nivel de hardware como de software. Recibe las señales de los sensores de posición para situar tanto la base como la vela del seguidor directamente hacia el Sol, actuando sobre la bomba y las electroválvulas del sistema hidráulico y maximizando a su vez la fuerza que realizan los pistones en función del ángulo en que se encuentran. Recibe, además, señales de diversos sensores para conocer la velocidad del viento, la presencia de lluvia o nieve, la presión del sistema hidráulico y posibles sobrecorrientes del motor, entre otras, que permiten tomar decisiones de posicionamiento, tanto por condiciones climatológicas como por integridad para los sistemas mecánico, hidráulico y eléctrico. También dispone de mecanismos de comunicación (USB, RS232, RS485 y Bluetooth) que facilitan la monitorización y control remotos, incluyendo el manejo del seguidor manualmente mediante una PDA para labores de mantenimiento.

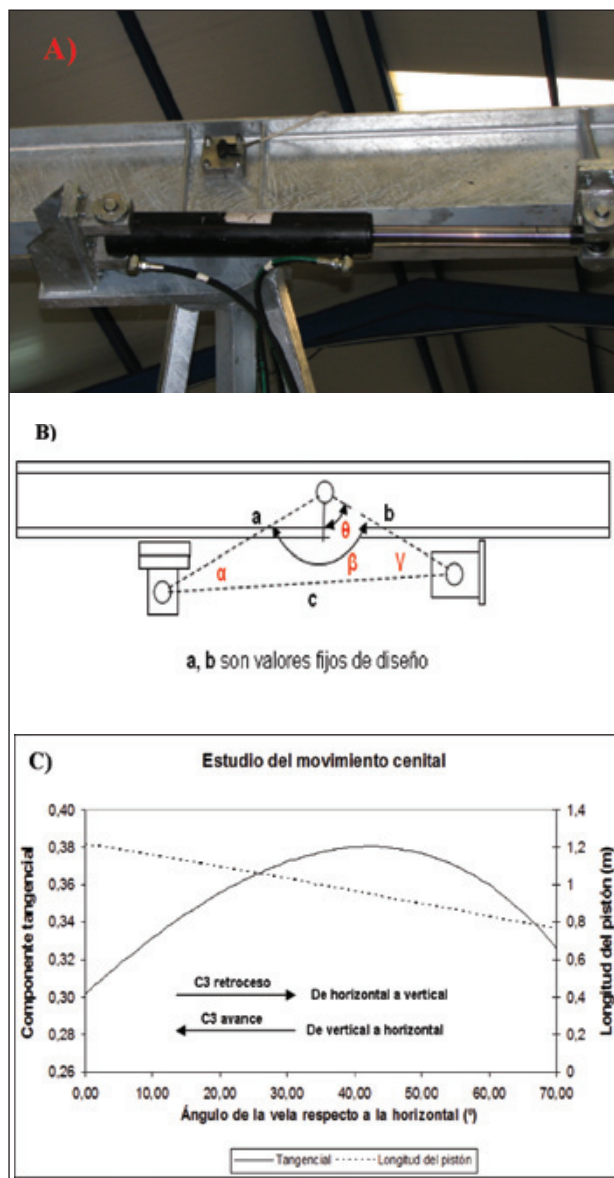


Figura 9. A) Fotografía del hidráulico empleado para el giro de la vela B) Esquema de la disposición los hidráulicos para el giro de la vela C) Gráfica en la que se ilustra la variación de la componente tangencial (responsable del giro en el plano cenital) y de la longitud de los pistones con el ángulo respecto a la horizontal durante el movimiento en el plano acimutal.



Las pruebas de durabilidad consistieron en simular el desgaste y deterioro de los componentes más críticos de la máquina

El sistema desarrollado se encuentra optimizado desde el punto de vista mecánico, minimizando los esfuerzos en dirección radial sobre los anillos. El empleo de un sistema hidráulico como medio de accionamiento permite reducir el tamaño del equipo, además de poder trabajar con velocidades enormemente bajas (requeridas en aplicaciones de seguimiento solar) sin ser necesario recurrir a reductores de velocidad (frecuente fuente de problemas y averías). El empleo de un sistema hidráulico de accionamiento permite que el sistema pueda funcionar de forma autónoma usando acumuladores de presión, permitiendo que el sistema pueda

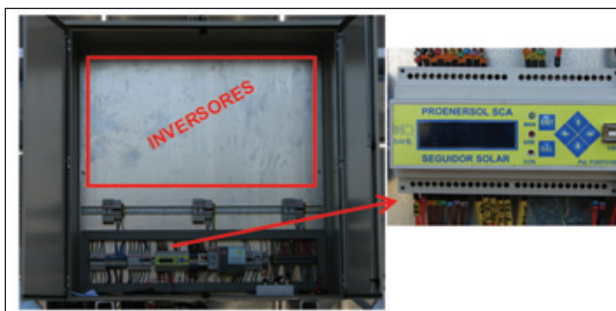
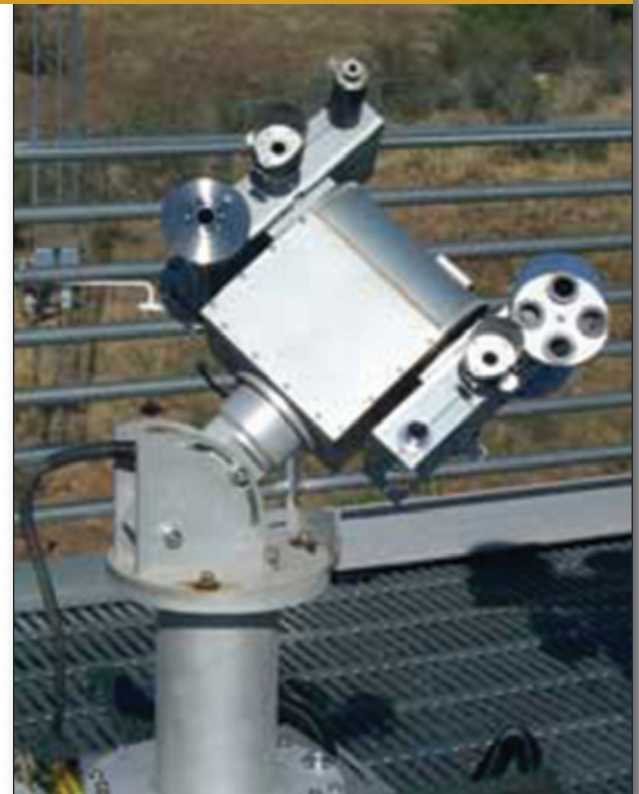


Figura 10. Cuadro eléctrico del sistema y detalle del sistema electrónico de control.



Figura 11. Prototipo del seguidor solar en su ubicación actual para pruebas (superficie 84m²)



seguir operando aún en caso de fallo de la red de alimentación eléctrica. Esto supone una mejora patente, ya que el sistema puede ser llevado a una posición de seguridad ante condiciones climatológicas adversas, aún sin suministro eléctrico. Asimismo, el sistema de control establece diferentes regímenes de trabajo sobre los cilindros, lo que permite minimizar los esfuerzos sobre la estructura y maximizar la fuerza útil.

5. CONCLUSIONES

En la actualidad, el prototipo de seguidor solar (figura 11) desarrollado ha concluido satisfactoriamente la fase de pruebas para comprobar la durabilidad y robustez del sistema. Las pruebas de durabilidad consistieron en simular el desgaste y deterioro de los componentes más críticos de la máquina. Para ello, el sistema de mantuvo funcionando de forma acelerada durante tres meses con lo que se consiguió simular 30 años de vida (en un día se simulaban cuatro meses). Durante las pruebas se monitorizaron diferentes parámetros de funcionamiento de la máquina que

permitieran evaluar su comportamiento (presión de del circuito hidráulico, picos de presión, inestabilidades y oscilaciones del sistema, ángulo de posicionamiento de la base y de la vela, velocidad del viento, etc.). Tras la finalización de los ensayos, los resultados han sido altamente prometedores: algunos de los elementos móviles del sistema sufrieron desgaste (pistas de rodadura y rodamientos axiales), pero en ningún caso se produjo el fallo catastrófico de los mismos que implicaran la parada de la máquina. En cuanto a la mantenibilidad del sistema, solo fueron necesarias operaciones rutinarias de mantenimiento como engrase de algunas de las partes móviles o cambio del filtro de la aceite de la central hidráulica.

Como resultado del trabajo realizado se ha generado una patente del sistema de seguimiento ideado (nº 200701596), la cual es propiedad de la *Universidad de Jaén*, y cuya explotación se ha cedido en exclusividad a la empresa *Proenersol*.

En cuanto a los integrantes del grupo de investigación continúan trabajando en los múltiples proyectos y contratos de colaboración suscritos con empresas de la comunidad Andaluza en materias de sostenibilidad energética y del entorno, abarcando campos tan punteros como la refrigeración solar (refrigeración por absorción), el aprovechamiento energético de residuos mediante instalaciones de cogeneración, o el ahorro energético a través de sistemas domóticos.

6.- AGRADECIMIENTOS, AYUDAS Y SOPORTE FINANCIERO

Parte del trabajo presentado es el resultado de un contrato de investigación suscrito entre el Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén y la empresa *Proenersol SCA* para el desarrollo de un prototipo de seguidor solar a dos ejes de 10 kWp (superficie 84 m²) (Contrato JME/exp.762). Así mismo, este trabajo ha sido posible gracias al proyecto del Plan Propio de apoyo a la investigación de la Universidad de Jaén titulado 'Desarrollo y optimización mecánica de un sistema de seguimiento solar de dos ejes para el aprovechamiento energético del olivar jiennense' (RFC/PP 2006).

El grupo agradece al Plan Propio de Apoyo a la Investigación de la UJA la ayuda prestada a través del proyecto RFC/PP 2006, gracias al cual se han podido obtener datos que han hecho posible optimizar el desarrollo de la estrategia de control empleada para seguimiento solar. Así mismo, agradecemos la ayuda que nos han brindado las empresas *Electromontiel S.L.* y *Proenersol Seguidores S.L.*, sin las cuales no hubiera sido posible materializar este proyecto.

7.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDAE, 'Desarrollo de la Energía Solar Fotovoltaica en España. Perspectivas de Futuro', *Erasolar*, nº 118, 2004.
- [2] Abella MA y Chenlo F. (CIEMAT. Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos), 'Sistemas Fotovoltaicos Conectados a red. Estimación de la Energía Generada', *Erasolar*, nº 132, 2006.
- [3] Salas Pep. (Wattpic Energía Inteligente), 'Monografía Seguidores Solares', *Infopower*, nº 78, 2005.
- [4] Lorenzo E. 'Retratos de la conexión Fotovoltaica a la Red (IV). Seguidores y Huertas Solares', Instituto de Energía Solar - Universidad Politécnica de Madrid (artículo disponible en <http://www.fotovoltaica.com/retrato4.pdf>)
- [5] Duffie & Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', 2nd Edition, John Wiley & sons, New York, USA, 1991.
- [6] CENSOLAR, "Valores medios de irradiación solar sobre superficie horizontal", 1ª Edición, Centro de Estudios de la Energía Solar, Sevilla, 1993.
- [7] Gasquet HL. 'Manual Teórico y Práctico Sobre los Sistemas Fotovoltaicos', *Solartronic S.A.* (manual disponible en <http://www.solartronic.com>)