

# DISEÑO DE COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS.

## Camino hacia la viabilidad de la energía termosolar



José M. Sierra-Velasco  
José L. Cortizo-Rodríguez  
Álvaro Noriega-González  
Eduardo Rodríguez-Ordóñez  
Esteban Fernández-Rico

Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial

Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Campus de Gijón.  
Edificio Departamental Oeste, 5 - 33203 Gijón. Tfno: +34 985 182420.  
jmsierra@uniovi.es

Recibido: 17/05/2011 • Aceptado: 07/11/2011

### *In search of feasibility Thermal Energy using Parabolic Trough Design*

#### ABSTRACT

- This article describes a collaborative activity between faculty members from the Mechanical Engineering Department of the University of Oviedo and engineers from the TERMOPOWER company to develop a prototype of a parabolic trough that allowed the company to acquire the know-how required for the industrial development of this type of equipment that allows them to enter the solar market, with a design based on technical and economic criteria. It identifies all the critical design elements, the interception factor and its influence on the parabolic trough's efficiency. We describe the loads to be considered, wind speed, deformation criteria and methodology used. This paper shows how simulation software, 3D modeling and finite element calculation play a crucial role nowadays in looking for optimal design. It also shows how the interception factor is affected by reflector misalignment or tracking errors.
- **Keywords:** Solar thermoelectric, parabolic trough collector, prototypes, 3D modeling, mechanism simulation.

#### RESUMEN

En este artículo se describe una colaboración Universidad-Empresa, llevada a cabo entre profesores del área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oviedo e Ingenieros de la empresa *TERMOPOWER*. Esta colaboración ha desarrollado un prototipo de colector cilindro-parabólico, que permite a la empresa adquirir el conocimiento necesario para el desarrollo industrial de este tipo de equipamientos e introducirse en el mercado termosolar, con un diseño que aúne criterios técnicos y económicos.

Se identifican todos los elementos críticos en el diseño, y su influencia en el factor de interceptación y en la eficiencia del equipo. Se analiza en detalle la influencia en el factor de interceptación de errores de seguimiento o de desalineación del reflector. Se describen las cargas a considerar, velocidades de viento, deformaciones admisibles y metodología de cálculo utilizada.

Se muestra como el software de simulación, modelado 3D y cálculo por elementos finitos, cumple una función imprescindible hoy día de cara a un diseño de detalle óptimo.

**Palabras clave:** Energía solar termoelectrica, colectores cilindro-parabólicos, prototipos, modelado 3D, simulación de mecanismos.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, ha habido una apuesta de los gobiernos de los países desarrollados para fomentar el desarrollo de las energías alternativas, entre otras la energía solar termoelectrica basada en el empleo de Colectores Cilindro-Parabólicos (CCP). En Noviembre de 2010, España era el primer productor mundial de ENERGÍA TERMOSOLAR, con 432 MW de potencia instalada, y las empresas de nuestro país lideraban los proyectos en este sector a nivel internacional. Sin embargo, en el actual contexto de crisis internacional se hace más importante aún cumplir los objetivos planteados en el año 2000, que

preveían la necesidad de disponer de un mercado competitivo que permitiese en el horizonte del 2020 comercializar esta energía a un precio del 0,04 €/kWh (Geyer, 2000), ver Figura 1, a fin de garantizar así la libre competitividad de esta energía en los mercados, sin necesidad de subvenciones estatales.

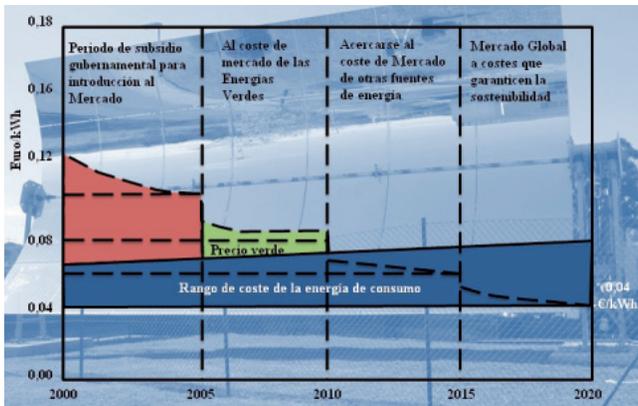


Fig. 1: Evolución del coste de la energía solar termoeléctrica

En la actualidad el coste de generación eléctrica con estas tecnologías está aún entre los 0,15 a 0,18 €/kWh para las centrales basadas en tecnología de colectores cilindro-parabólicos, (Abánades-Velasco et al, 2010).

En el mundo, las zonas donde este tipo de generación de energía eléctrica está teniendo mayor crecimiento se concentra en tres áreas, EEUU, MENA (Middle East and North Africa) y España. En un futuro muy próximo otros países como India, China y Australia serán también mercados importantes.

En el norte de África y Oriente Medio se ha comenzado por instalaciones de Ciclo Combinado de gas integrado con energía solar (ISCC). En EE.UU. y España (ver Figura 2) las plantas son básicamente solares. La mayoría de las plantas son de tecnología cilindro-parabólica.

EVOLUCIÓN DEL SECTOR EN ESPAÑA, Potencia en MW							
REGIÓN	AÑO	2006	2008	2009	2010	>2011	TOTAL
ANDALUCÍA		11	50	120	167	5.423	5.771
ARAGÓN						565	565
CASTILLA LEÓN						300	300
CASTILLA LA MANCHA				50	100	853	1.003
CATALUÑA						80	80
C. VALENCIANA						50	50
EXTREMADURA					200	2.250	2.450
MADRID						62	62
MURCIA				2	30	500	532
<b>TOTAL</b>		<b>11</b>	<b>50</b>	<b>172</b>	<b>497</b>	<b>10.083</b>	<b>10.813</b>

Fig. 2: Evolución del sector en España. Fuente (Fresneda - IDAE, 2009)

En este entorno, las cifras que se mueven en este tipo de plantas son una referencia importante más a tener en cuenta.

En la actualidad se construyen plantas termosolares basadas en colectores cilindro-parabólicos de 50 MW y la tendencia de futuro es ir a instalaciones de más de 200 MW de potencia (Fresneda-García, 2009). Para este tamaño, se necesita una superficie de unos 500.000 m<sup>2</sup> y unos 93 km de colectores cilindro-parabólicos. Por tanto, los objetivos evidentes para reducir costes y acercarse a los 0,04 €/kWh de coste de energía planteados, pasan por mejorar el diseño de los colectores cilindro-parabólicos en busca de una reducción de costes de fabricación y montaje, mayor fiabilidad y durabilidad de los mismos. Para ello, se puede actuar sobre los siguientes factores:

- Mayor precisión óptica y de seguimiento.
- Disminución de pérdidas de calor.
- Mayor simplicidad de fabricación.
- Disminución de pesos y costes.
- Mejora de la rigidez por torsión y flexión estructural bajo cargas de viento.
- Reducción del número de componentes
- Mejora de la resistencia a la corrosión.

Habría otros factores a considerar, si bien los más importantes desde el punto de vista del diseño de un colector cilindro-parabólico son los enumerados.

## 2. COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS (CCP)

Se describe a continuación un colector cilindro-parabólico y su función.

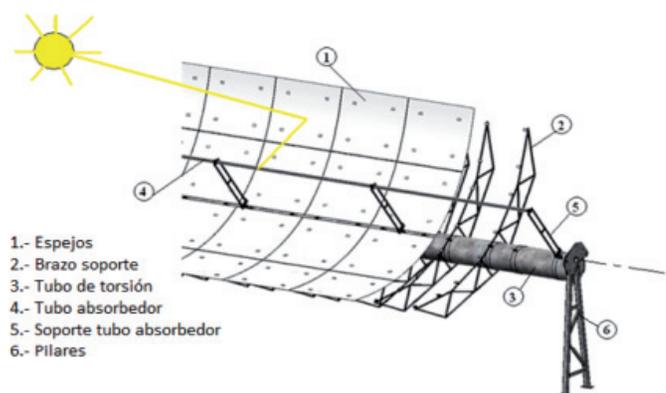


Fig. 3: Módulo de colector cilindro-parabólico

Básicamente, un módulo de colector cilindro-parabólico (CCP), ver Figura 3, está constituido por una estructura, que hace de soporte de los reflectores (normalmente espejos de vidrio), que conforman una superficie parabólica, en cuyo foco se sitúa, mediante unos soportes articulados, un tubo absorbedor. La radiación solar es reflejada por los espejos hacia el foco calentando dicho tubo, por el que circula un fluido (en la actualidad, aceite), que es calentado entre unas

temperaturas que habitualmente oscilan de 293°C a 391°C aproximadamente. La estructura soporte de cada módulo apoya en dos pilares en sus extremos y va unida a la siguiente mediante uniones atornilladas.

La longitud de colectores necesaria para incrementar la temperatura del fluido calo-portador en el rango de temperaturas de trabajo normalmente utilizadas, (293°C a 391°C aprox.) se conoce como “lazo”. Utilizando colectores con una apertura o ancho de parábola de 5,77 m. y una distancia focal de 1,71 m, se llega a una longitud de lazo próxima a los 600 m, constituido por cuatro unidades con accionamiento propio, conocidas por su terminología en inglés como “Solar Collector Assembly” (SCA), de unos 148,5 m, ver Figura 4. Dicha longitud se consigue con 12 módulos simples alineados, 6 a cada lado de una torre central con un accionamiento único. La estructura soporte gira respecto de su eje longitudinal, para hacer el seguimiento del sol a lo largo del día de este a oeste.

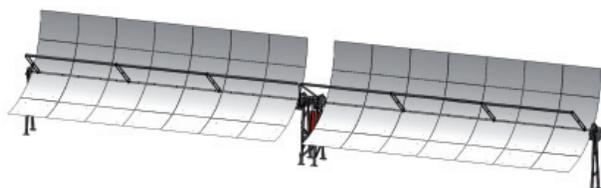


Fig.4: Tramo central de un SCA con torre de accionamiento

## 2.1. ESTADO DE LA TÉCNICA

Se van a revisar ahora los componentes básicos de un CCP y las opciones y tendencias de la industria tras las experiencias de los últimos años.

### 2.2.1. Reflectores

La mayoría de las plantas en funcionamiento emplean como reflectores espejos de vidrio. Dos de las compañías que suministran estos espejos tienen su sede en Asturias, *Saint Gobain Cristalera Española* y *Rioglass Solar*. Ambas comercializan un espejo templado de 4 mm de espesor, garantizan una reflectancia especular del 94 %, y en la actualidad están consolidados frente a otras opciones para los reflectores como pueden ser espejos de aluminio, (se puede citar ALMIRR del grupo Alucoil), que tienen una reflectancia especular menor que el vidrio, (del 87,5 %), pero a cambio garantizan mayor resistencia lo que mejora su manipulación sin peligro de rotura. Finalmente hay una tercera opción, un film reflectante, de muy bajo espesor (0,1 mm), que se pega a un sustrato de aluminio y alcanza valores de reflectancia especular del 94 %, igual que los espejos de vidrio, *Reflec Tech* es un fabricante que ha instalado su film en un campo solar en EEUU y lo ha tenido funcionando por más de 20 años ya. También *Alanod Solar*, una compañía alemana suministra un film, de entre 0,3 a 0,4 mm de espesor, con una reflectancia especular próxima al 93 %.

En este elemento, hay también varias empresas desarrollando e investigando nuevos productos, con dos

objetivos claros: alta reflectividad especular y durabilidad. En este momento, la tendencia generalizada es emplear reflectores de vidrio.

### 2.2.2. Tubo absorbedor

Hasta la fecha, todas las centrales SEGS (*Solar Electric Generation Systems*) han utilizado aceite como líquido calo-portador. A medio plazo, se trabaja en la generación directa de vapor (Montes-Pita, 2008), pero esto presenta problemas técnicos en el diseño de los tubos absorbedores aún sin resolver. Estos tubos, ver Figura 5, están constituidos por un tubo de acero por el que circula el aceite, con un recubrimiento exterior especialmente desarrollado para aumentar la capacidad de absorción de radiación y minimizar la emitancia. Además este tubo de acero va dentro de otro de vidrio exterior y, entre ambos, se hace el vacío para reducir al mínimo las pérdidas de calor.



Fig.5:Tubo absorbedor

En la actualidad hay dos grandes fabricantes que monopolizan el mercado, una empresa alemana (*SHOTT Solar*) y una israelí (*Solel Solar System Ltd*).

Es este un componente caro, que se suministra en largos de 4,060 m. (una central de 50 MW, utiliza unos 22.000 tubos). En la actualidad se estudian posibles alternativas, con diseños novedosos que reduzcan los costes de fabricación y comienzan a surgir otros competidores. Hoy en día las investigaciones se centran en nuevos recubrimientos que permitan operar en temperaturas por encima de los 550 °C. También es objeto de estudio el empleo de otros fluidos calo-portadores

### 2.2.3. Estructura

La principal discusión existente hasta ahora enfrenta dos posibles diseños para la estructura (ver Figura 6). Por un lado, el diseño de estructura espacial de celosía, con la que se fabricaron las primeras instalaciones y que tiene múltiples variantes, empleando perfiles laminados de tubo (redondo, cuadrado, rectangular), incluso perfiles tubulares de aluminio sin soldaduras. Por otro lado, está el diseño de tubo de torsión, que, en nuestra opinión, posiblemente sea la opción de futuro, por ser más rígido a la torsión y flexión, y de más sencilla fabricación y montaje. Esta es la opción por la que se ha decidido *TERMOPOWER*.



Fig. 6: Izquierda: Estructura con tubo de torsión. TERMOPOWER.  
Derecha: Estructura de celosía espacial.

En la actualidad, los espejos de vidrio tienen pegada por la parte posterior de los mismos cuatro placas cerámicas con una tuerca roscada embutida que sirve de sistema de fijación a la estructura del CCP, siendo en este punto donde durante el montaje se pueden absorber pequeños defectos de fabricación de la estructura.

Se verifica también que el centro de gravedad del conjunto montado coincida con su eje de giro. Así, el conjunto estará perfectamente equilibrado y el mecanismo de accionamiento no tendrá que vencer pares distintos a los debidos a las cargas de viento y al de fricción en los cojinetes debido al peso propio.

#### 2.2.4. Torre de accionamiento y pilares

En la Figura 7 se pueden ver referenciadas las dos unidades tipo en las que se agrupan los CCP en las plantas termosolares, el "SCA" y el "lazo".

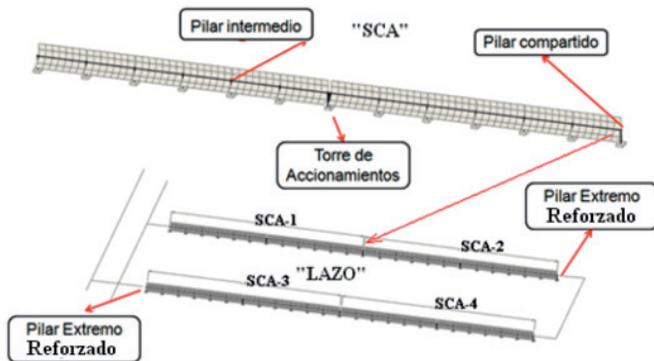


Fig. 7: Posición de los distintos tipos de sustentación en un lazo (4x1SCA).

Como sistemas de accionamiento para el movimiento de giro de la línea de colectores de un SCA, se han empleado hasta la fecha tres tipos de accionamientos: a) basados en un motorreductor, b) basados en actuadores hidráulicos rotativos, dos cilindros hidráulicos que mueven una cremallera que a su vez engrana y hace girar un piñón, y c) mediante dos cilindros hidráulicos lineales que accionan un balancín al que se articulan estos sobre dos orejetas desfasadas.

Teniendo en cuenta que el movimiento de giro para el seguimiento del sol es muy lento que en condiciones de viento por encima del óptimo de servicio, exigen pares importantes,

la precisión de movimiento y los costes de mantenimiento, el mecanismo más robusto que parece imponerse en el mercado es el de orejetas desfasadas, (ver Fig. 8).

Sin embargo, el control de los cilindros no es sencillo ni económico. Esto hace que con frecuencia se produzca la rotura de las cabezas de los cilindros en campo. Por ello, se hace necesario revisar el diseño de los equipos empleados en la actualidad.

Los problemas aparecen debido a que:

- Los dos cilindros se mueven en todo su recorrido a velocidades distintas.



Fig. 8: Orejetas desfasadas

- En partes del recorrido de giro del CCP, los cilindros pueden estar trabajando ambos a tracción o a compresión, o bien uno a tracción y otro a compresión simultáneamente.
- Existen varias posiciones de "punto muerto", dónde el cilindro afectado ha de pasar de estar trabajando a tracción a estar trabajando a compresión.

Una vez construido el primer prototipo de torre de accionamiento con el sistema de orejetas desfasadas, teniendo conocimiento de los problemas de rotura existentes en campo y con la experiencia del desarrollo del control electrohidráulico del sistema, se planteó un nuevo desarrollo, absolutamente innovador y que evita todos los problemas enumerados en el sistema actualmente utilizado por la mayoría de los fabricantes.

El sistema diseñado (ver Fig. 9), está basado en un mecanismo de doble cuadrilátero articulado, accionado de nuevo por dos cilindros hidráulicos, pero que ahora no funcionan por sectores, ni pasan por puntos muertos a lo largo del recorrido, según el giro sea horario o anti-horario. Un cilindro se alarga mientras el otro se acorta a lo largo de todo el recorrido y casi con las mismas velocidades, esto simplifica el control y evita la posibilidad de rotura del anterior diseño.

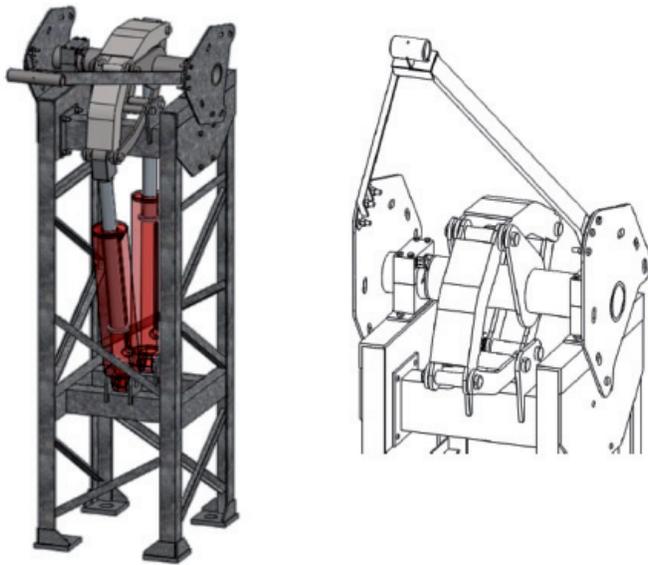


Fig. 9: Nueva torre de accionamiento basada en un mecanismo de doble cuadrilátero.

**2.2.5. Soportes del tubo absorbedor: Heat Collection Element (HCE)**

El tubo HCE es un elemento singular en este tipo de instalaciones, ya que su posición, cuando está en funcionamiento, debe estar situada en el foco de la parábola a fin de aprovechar la radiación solar reflejada en los espejos. Por su interior circula el líquido calo-portador (aceite). El tubo HCE, como ya hemos dicho, viene suministrado en tramos de 4.060 mm de longitud y cada tramo se une por soldadura al siguiente. Esta operación se realiza en campo, una vez la estructura con los espejos del colector ha sido apoyada sobre pilares o torre de accionamiento.

Por otro lado, el fluido calo-portador alcanza a la entrada al lazo 293°C y luego en la longitud del lazo incrementa ésta hasta la temperatura de salida, aprox. 391°C. Estos incrementos de temperatura hacen que el tubo HCE experimente un incremento de longitud considerable, que debe ser absorbido por los soportes (ver Fig. 10).

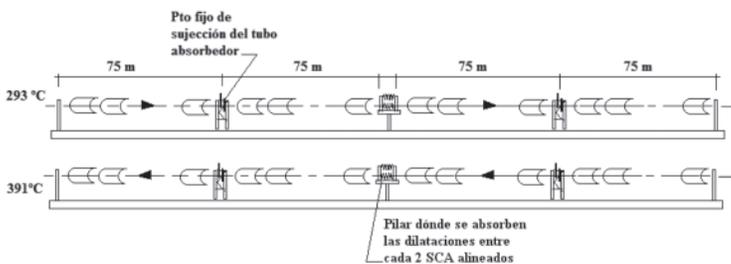


Fig. 10: Torres de accionamiento y pilares compartidos en un lazo, formado por 4 SCA de aprox. 150 m cada uno.

Como se ha indicado los tubos HCE se unen entre sí por soldadura. En la torre de accionamiento de cada SCA hay un soporte al que se suelda el primer tramo de tubo HCE y desde ese punto hacia cada lado, hay una longitud (exactamente de  $4060 \cdot 3 \cdot 6 = 73.080$  mm) de tubo HCE, las dilataciones

en cada tramo de tubo HCE continuo de los ocho tramos existentes por lazo (4 SCA), variarán ligeramente entre sí. Entre cada SCA, hay un pilar compartido, que aloja un dispositivo para compensar las variaciones de longitud al final de cada tramo de SCA con el contiguo. También en los extremos de los dos SCA que van en paralelo para formar el lazo, existe un sistema que compensa de nuevo estas diferencias de longitud.

Se requiere un estudio preciso, para determinar el ancho en los puntos de fijación en cada torre de accionamiento (diferente en cada torre de las cuatro que hay por lazo), y para fijar la posición sobre cada tubo de torsión del CCP en que han de ir soldados los tres soportes que lleva cada uno. Dicha posición no ha de variar de un tubo de torsión a otro, de modo que todos sean iguales e intercambiables (ver Fig. 11).

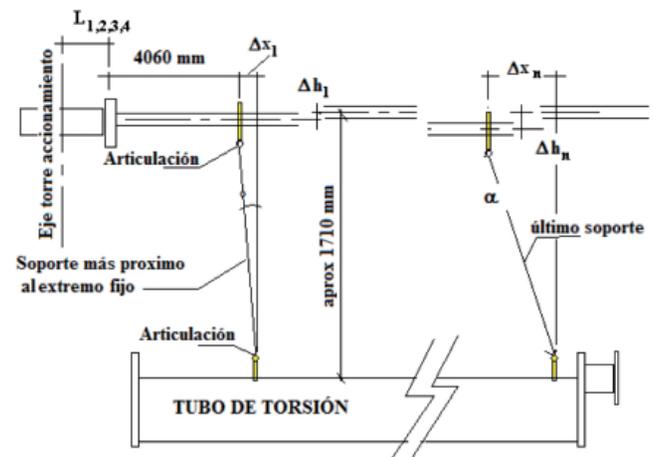


Fig. 11: Debido a las dilataciones térmicas, los soportes de HCE van con distintas inclinaciones

Los soportes de HCE son unas barras articuladas en ambos extremos, en su unión al tubo de torsión y en su unión al tubo HCE. Su longitud y posición sobre el tubo de torsión deberán estar convenientemente calculadas, para que teniendo en cuenta las dilataciones térmicas que experimenta el tubo HCE, este quede situado en el foco teórico a la temperatura de funcionamiento.

**2.2.6. Seguimiento solar**

El rendimiento de un CCP depende, entre otros factores, de la precisión con que el CCP está correctamente orientado según el vector solar que indica la posición del sol en cada momento. Existen métodos de cálculo del vector solar muy precisos, pero también muy costosos y lentos computacionalmente hablando. La referencia es el *Multiyear Interactive Computer Almanac* (MICA).

Para solventar este problema se han desarrollado algoritmos que aproximan el vector solar con suficiente precisión y cuyo coste computacional es muy bajo (Blanco-Muriel et al, 2001), (Grena, 2008). La precisión de estos algoritmos debe ser elevada ya que el rendimiento del CCP

es muy sensible a pequeñas desalineaciones respecto al vector solar teórico y ocasiona que parte de la energía solar incidente se desaproveche.

Dentro del desarrollo del proyecto se han utilizado redes neuronales para modelizar y predecir el vector solar con una precisión del orden del algoritmo desarrollado en el *Ente Nazionale Energie Alternative* (ENEA, Laboratorio Italiano de referencia en temas de energías alternativas) y un orden de magnitud mayor que la del algoritmo desarrollado por técnicos de la *Plataforma Solar de Almería* (PSA) y un coste computacional un orden de magnitud menor que el de ambos.

### 3. HERRAMIENTAS DE DISEÑO

Para el desarrollo y la validación del proyecto, se ha empleado software y técnicas de diseño y cálculo de máxima potencialidad en el campo de la ingeniería actual.

#### Software de simulación cinemática y dinámica.

Este software se ha utilizado fundamentalmente para el estudio y optimización de los mecanismos en la torre de accionamientos: posición, esfuerzos, carrera necesaria de los cilindros, etc.

#### Software de modelado Sólido 3D (diseño paramétrico).

Todos los modelos estudiados, han sido modelados en 3D, mediante software que permite posteriormente pasar a planos de fabricación y listas de materiales, así como editar los modelos en formatos estándar, que nos permitan posteriormente realizar un análisis por elementos finitos (FEM).

#### Software de Cálculo estructural.

Para la comprobación estructural del colector, se ha empleado software de cálculo espacial en 3D, por métodos matriciales de rigidez (ver Figura 12, modelo de colector). En aquellos elementos dónde este software no da suficiente información, por ejemplo en los soportes de tubos de vacío y cartelas soldadas al tubo de torsión, unión de las placas

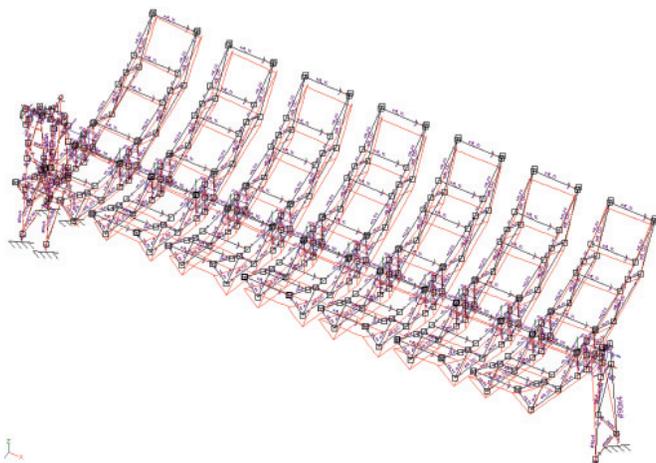


Fig. 12: Deformaciones sobre estructura, pilar intermedio y torre de accionamiento.

extremas al tubo de torsión, etc., se recurre a un software de cálculo por elementos finitos, que permite analizar en detalle este tipo de elementos.

#### Software para circuitos hidráulicos.

El circuito electrohidráulico de control para el seguimiento del sol ha sido implementado previa simulación con software y, utilizando un banco de ensayo, se ha podido probar previamente sobre un prototipo de laboratorio el adecuado comportamiento del sistema diseñado.

#### Software de Cálculo por elementos finitos.

En algunos puntos singulares del CCP es conveniente un estudio en detalle empleando software de cálculo por elementos finitos. Así es interesante analizar las uniones soldadas de las placas finales del tubo de torsión y del tubo que hace de eje de giro entre dos colectores contiguos o también las cartelas soldadas al tubo de torsión donde articulan los soportes del tubo absorbedor (ver Fig. 13).

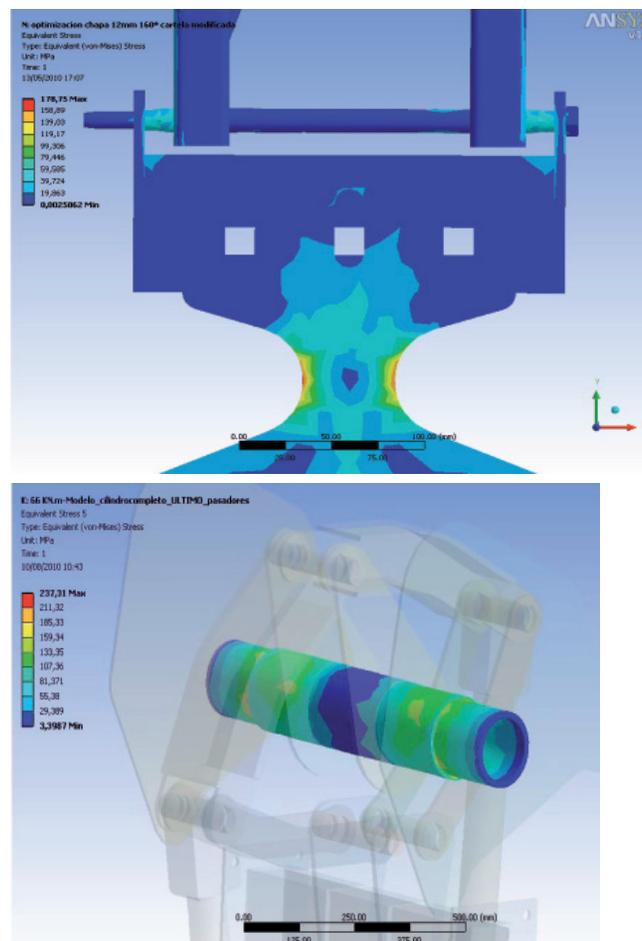


Fig. 13: Tensiones en soporte de tubo HCE y eje de accionamiento

Cuando se aborda un proyecto de desarrollo de un nuevo producto, es evidente que no se puede quedar en los prototipos virtuales, aún con toda la información que nos dan, antes de sacar una serie de fabricación o introducir el

producto en el mercado. En este caso, se construyó un primer prototipo para ensayo en el laboratorio, por un lado, del tubo de torsión y del sistema de amarre de los brazos de celosía que soportan los espejos al tubo de torsión, y por otro, de los propios brazos de celosía, para poder realizar ensayos bajo carga, medir deformaciones, y valorar aspectos como rigidez, manejabilidad, facilidad de fabricación, tolerancias de fabricación esperadas, control necesario en el proceso de montaje final, etc.

#### 4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La exigencia viene en este momento de la necesidad de optimizar el diseño para reducir los costes de fabricación y montaje, manteniendo las características mecánicas del conjunto que permitan garantizar el adecuado posicionamiento de la parábola respecto del tubo HCE, de forma que se tenga la necesaria eficiencia térmica del conjunto en funcionamiento (Geyer M, 2002).

El equipo se calcula para diferentes emplazamientos, teniendo en cuenta la normativa correspondiente. En este caso se toma como referencia el EUROCODIGO II y el Código Técnico de la Edificación Parte II: DB SE-AE, Acciones en la Edificación (actualizado en BOE de 25 enero de 2008), para definir las acciones a tener en cuenta en el cálculo en función de los distintos emplazamientos posibles. En él se definen:

- Acciones gravitatorias
- Sobrecargas de uso
- Sobrecargas de nieve
- Acciones del viento
- Acciones térmicas
- Acciones sísmicas

Dentro de las cargas mencionadas a considerar en el diseño, un rol muy importante lo tienen las cargas de viento, en este prototipo se han considerado las situaciones de carga que se presentan en la Tabla 1.

Es importante reseñar aquí, que no existe una normativa específica para este tipo de máquinas y, debido a su peculiar

Nivel	Condiciones de operación
1	En cualquier posición se minimizarán las deformaciones del colector de forma que el factor de interceptación ha de ser tan elevado como sea posible bajo un viento de operación inferior a 7 m/s.
2	Ante vientos de tipo medio, hasta 14 m/s, las deformaciones hacen disminuir el factor de interceptación de forma gradual.
3	Transición entre condiciones de operación normales y situación de supervivencia, el accionamiento debe ser capaz de llevar a la posición de supervivencia al colector con vientos entre 14 y 21 m/s.
4	Posición de reposo ante viento de supervivencia (+30° sobre la vertical), definidos por velocidad de 31,3 m/s. Tensiones dentro de tolerancia.

Tabla 1: Condiciones de operación relacionadas con la velocidad del viento.

forma (superficie cóncava de los espejos), y a la variación de la posición a lo largo del día, se hace necesario de cara al planteamiento de las hipótesis de cálculo, un estudio de la variación de la presión del viento para las distintas posiciones del CCP. En este punto se sugiere utilizar valores obtenidos de ensayos en túnel de viento (Hosoya et al., 2008), o bien obtener los valores para nuestro propio colector de un ensayo similar.

Este tipo de ensayos, permite validar los estudios realizados mediante software de análisis de dinámica de fluidos computacional y completar el estudio analizando diferentes situaciones tanto de posición del CCP, como de viento.

#### 5. FACTOR DE INTERCEPTACIÓN

##### 5.1. CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

El diseño del CCP, el proceso de fabricación y el montaje del mismo es determinante en la eficiencia óptica final del conjunto. Se considera en este sentido que las características ópticas son independientes de la temperatura (Güven y Bannerot, 1986a).

Se define la eficiencia óptica del colector como el cociente entre la energía que llega a la superficie del tubo absorbedor (receptor) y la que llega a la superficie reflectante del colector. Esta eficiencia óptica depende de:

- Propiedades de los materiales.
  - La transmitancia del vidrio.
  - La absorbancia de la superficie del absorbedor.
  - La reflectancia de la superficie del colector.

- El factor de interceptación.

El factor de interceptación  $\gamma$  es la fracción de la radiación reflejada en el colector que incide en la superficie de absorción del receptor. Contiene los efectos de todos los errores ópticos y a su vez depende de:

- Las dimensiones del colector.
- Los errores en el ángulo de la superficie de espejo parabólico.
- La dispersión del haz de radiación solar.

Güven y Bannerot (Güven y Bannerot, 1986b) clasifican los errores ópticos en:

- Aleatorios:
- Errores en la pendiente
  - Imperfecciones en la superficie del reflector
  - Errores en el transitorio de seguimiento

Estos errores se agrupan en un parámetro  $\sigma$

No aleatorios:

- Errores en el perfil de la superficie reflectante debidos a la distorsión
- Errores sistemáticos en el seguimiento
- Desalineación sistemática del reflector respecto al eje geográfico del colector
- Error en la colocación del receptor respecto al reflector

Estos errores se agrupan en dos parámetros:

Error de seguimiento  $\beta$  [°]

Desalineación del reflector  $(d_r)_y$  [mm]

Los tres parámetros indicados ( $\sigma$ ,  $\beta$ ,  $d$ ) se combinan con:

Diámetro del tubo de absorbedor:  $D$

Ratio de concentración geométrico:  $C = A_\alpha / A_\gamma$

Donde  $A_\alpha$  el área de apertura de la parábola (normal al eje de la parábola) y  $A_\gamma$  el área del receptor por unidad de longitud ( $\pi \cdot D$ ), para producir parámetros universales para todas las geometrías de colector. Estos parámetros universales son:

Error universal aleatorio universal [rad],  $\sigma^* = \sigma \cdot C$

Error universal no aleatorio debido a errores angulares [rad],  $\beta^* = \beta \cdot C$

Error universal no aleatorio debido a descolocación del receptor y del perfil del reflector [rad]

$$d^* = (d_r)_y / D$$

### 5.2. ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE INTERCEPTACIÓN

El factor de interceptación se puede calcular en función del semiángulo de apertura de la parábola ( $\psi$ ) y de los tres errores universales con el código suministrado por **Güven y Bannerot**, que se reproduce a continuación, y que permite obtener el factor de interceptación resolviendo la Ecuación (1) utilizando MATLAB®.

$$\gamma = \frac{1 + \cos \Psi_{mm}}{2 \sin \Psi_{mm}} \int_0^{\Psi_{mm}} \left[ \operatorname{erf} \left\{ \frac{\sin \Psi_{mm} (1 + \cos \Psi) (1 - 2d^* \sin \Psi) - \pi \beta^* (1 + \cos \Psi_{mm})}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \Psi_{mm})} \right\} - \operatorname{erf} \left\{ \frac{\sin \Psi_{mm} (1 + \cos \Psi) (1 + 2d^* \sin \Psi) + \pi \beta^* (1 + \cos \Psi_{mm})}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \Psi_{mm})} \right\} \right] \frac{d\Psi}{(1 + \cos \Psi)} \quad (1)$$

En estos cálculos intervienen magnitudes geométricas del colector ( $\psi$ ,  $C$  y  $D$ ) pero también los parámetros que definen a los errores ( $\sigma$ ,  $\beta$  y  $(d_r)_y$ ) que deben conocerse ya que afectan en gran medida al factor de interceptación. A continuación, se indican (tabla 2) las características principales del colector de **TERMOPOWER** (Kearney DW, 2007).

A partir de estos datos, se puede calcular el semiángulo de la parábola ( $80,3^\circ$ ) y el ratio de concentración geométrico ( $30,61$  ó  $26,24$  respectivamente para los diámetros del tubo absorbedor  $60$  y  $70$  mm).

Si para el parámetro que mide los errores aleatorios, se utilizara el valor estimado,  $\sigma = 0,0064$ , (Brooks M J, 2005)

adecuado para colectores de alta tecnología, se puede ver como varía el factor de interceptación  $\gamma$  cuando varían  $\beta^*$  y  $d^*$  con un tubo absorbedor de diámetro  $70$  mm. El valor máximo del factor de interceptación es de  $0,98$  y se produce cuando los errores universales  $\beta^*$  y  $d^*$  son nulos.

Para ver con más detalle la influencia de los errores en el factor de interceptación  $\gamma$  se representa en la Figura 14 su variación cuando la desalineación del reflector  $(d_r)_y$  varía entre  $0$  y  $15$  mm y para los valores  $0,1^\circ$  y  $0,2^\circ$  grados sexagesimales del error de seguimiento  $\beta$ , considerando un diámetro de tubo absorbedor de  $70$  y  $60$  mm.

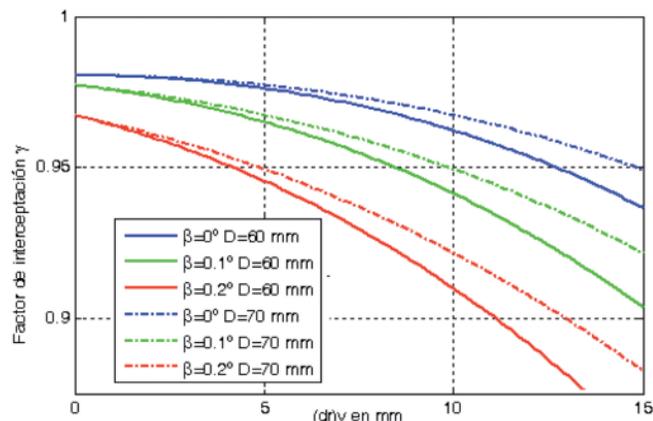


Fig. 14: Variación del factor de interceptación  $\gamma$  función de  $(d_r)_y$ ,  $\beta$  y  $D$ .

También se representa en la Fig.15 la variación del factor de interceptación  $\gamma$  cuando la desalineación del reflector  $(d_r)_y$  toma los valores constantes de  $0$ ,  $3$  y  $10$  mm y el error de seguimiento  $\beta$  varía entre  $0^\circ$  y  $0,8^\circ$ .

Si se observa la variación del factor de interceptación  $\gamma$  con  $\beta$  o  $(d_r)_y$ , cuando el otro error óptico está fijo, se puede

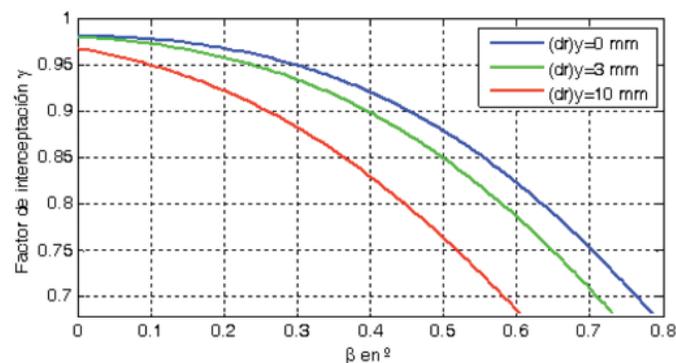


Fig. 15: Variación del factor de interceptación  $\gamma$  función de  $(d_r)_y$  y  $\beta$

Característica	CCP TERMOPOWER	Característica	CCP TERMOPOWER
Tipo de Estructura	Tubo de torsión	Área de Apertura (espejos) (SCA)	$\sim 824 \text{ m}^2$
Distancia Focal	1.710 mm	Tipo de espejo	Vidrio Templado
Apertura	5.770 mm	Peso de estructura y apoyos por $\text{m}^2$ de área de apertura	$\sim 20 \text{ kg/m}^2$ de apertura
Longitud por módulo	12 m	Longitud por SCA	$\sim 150 \text{ m}$
Accionamiento	Hidráulico-Cuadrilátero		

Tabla 2: Características del colector

ver que el valor del factor de interceptación es muy sensible al error de seguimiento mientras que es más tolerante a los errores de desalineación del reflector. De esta última afirmación se extrae la enorme importancia de disponer de sistemas de seguimiento de elevada precisión, para determinación del vector solar y accionamientos de elevada precisión y mínimas holguras.

Finalmente, para el colector desarrollado por *TERMOPOWER*, el factor de interceptación se puede estimar considerando los siguientes errores ópticos:

- Geometría del espejo (garantía del fabricante, medición laser): 5 mrad.
- Error de posición del HCE en montaje Z y X:  $\pm 1,5$  mm.
- Errores de geometría de la estructura montada antes de espejos: 1 mrad.
- Error angular de los SCEs para formar un SCA: 1,5 mrad.
- Dispersión disco Solar Sun Shape (3.5): 2,23 mrad.

Considerando estos errores (sin errores de seguimiento), el factor de interceptación obtenido es  $\gamma = 0,9927$  (99,27 %).

Si además consideramos ahora:

- Error electrónica del accionamiento: 0,23 mrad.
- Error seguimiento discontinuo: 1 mrad.
- Error torsión en el seguimiento: 2,7 mrad.

Con todos los errores enumerados, el factor de interceptación obtenido es  $\gamma = 0,9757$  (97,57 %).

Estos valores habrán de ser verificados experimentalmente, en el primer SCA instalado, con medios de fabricación y montaje adecuados.

## 6. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista del equipo diseñado, el empleo de una estructura basada en tubo de torsión, de fácil fabricación, con muy buenas características mecánicas, unido a los brazos de celosía que proporcionan gran rigidez al conjunto una vez fijados al tubo de torsión y a los espejos, dando como resultado un diseño sencillo y robusto. Todo ello con pocos elementos, lo que facilita el montaje garantizando unas tolerancias estrechas y un buen comportamiento a deformación por flexión y torsión.

Se plantea un nuevo diseño de la torre de accionamientos basada en un mecanismo de cuadrilátero articulado, que reduce mucho la complejidad del control electrohidráulico de las actuales torres, e impide la rotura de los cilindros por un fallo en el control como sucede en la actualidad.

Se muestra de forma detallada como calcular el factor de interceptación del colector.

Desde la finalización del proyecto, la empresa ha continuado trabajando en el producto y ha finalizado un diseño que ya comercializa con sus socios industriales, y del cual se ha instalado un primer SCA de prueba. Sobre dicho SCA, técnicos del Centro de Investigaciones Energéticas,

Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) han medido el factor de interceptación (obteniendo resultados coherentes con los cálculos teóricos indicados en este artículo) y realizarán futuros estudios y comprobaciones de eficiencia.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este artículo es producto de una colaboración Universidad-Empresa y no hubiera sido posible sin la decisión y apoyo de personas con una vocación empresarial, comprometidas con el desarrollo y la innovación. Nuestro agradecimiento a D. Felipe Requejo Monso (Ingeniero Industrial - CEO) y a D. Javier Requejo Sigüenza (Ingeniero en Telecomunicación - MOB) de *Termopower*. (Parque tecnológico de Asturias, P-46, 2ª Planta/ 33428, Llanera)

El proyecto aquí presentado, se ha realizado desde Septiembre de 2009, por un periodo de un año, entre personal del Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oviedo, e ingenieros de la empresa *TERMOPOWER* y ha contado con financiación pública, a través de un proyecto CDTI de Referencia IDI – 20090762.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abánades-Velasco A, Bernardos-Rodríguez E, López-Paniagua Ignacio et al. "Energía solar termoelectrica. Tecnología y desarrollos". *DYNA Ingeniería e Industria*. Octubre 2010, Año 85 N° 7 p. 563-574
- [2] Blanco-Muriel M, Alarcón-Padilla D, López-Moratalla T et al. "Computing the solar vector". *Solar Energy* 2001. Vol. 70-5, p. 431-441.
- [3] Brooks MJ. "Performance of parabolic trough solar collector". Director: Harms TM. University of Stellenbosch, February 2005.
- [4] Fresneda-García A. "Energía solar termoelectrica, situación actual". En: *Jornadas técnicas-energía solar termoelectrica (Madrid, 13 de mayo de 2009)*. Disponible en: [http://www.ifema.es/ferias/genera/ponencias09/06/Amparo\\_Fresneda\\_IDAE.pdf](http://www.ifema.es/ferias/genera/ponencias09/06/Amparo_Fresneda_IDAE.pdf)
- [5] Geyer M. "EUROTrough Progress and "NEXTrough, Opportunities for an Euro-American Trough Alliance". En: *Trough Meeting SUNLAB (Madison, USA, June 18, 2000)*. Disponible en: [www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/geyer\\_eurotrough.pdf](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/geyer_eurotrough.pdf)
- [6] Geyer M, Lüpfert E, Osuna R, et al. "EUROTROUGH - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation". En: *11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies (Zurich, Switzerland, September 4-6, 2002)*. Disponible en: [www.1000friendsofflorida.org/Solar/EuroTrough\\_Paper2002.pdf](http://www.1000friendsofflorida.org/Solar/EuroTrough_Paper2002.pdf)
- [7] Grena R. "An algorithm for the computation of the solar position". *Solar Energy* 2008. Vol. 82 p. 462-470.
- [8] Güven H, Bannerot RB. "Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries". *Solar Energy*. 1986. Vol. 36 n° 6 p. 535-550
- [9] Güven H, Bannerot RB. "Derivation of universal error parameters for comprehensive optical analysis of parabolic troughs". *Journal of Solar Energy Engineering*. 1986. Vol. 108 p. 275-281
- [10] Hosoya N, Peterka JA, Gee RC, Kearney D. "Wind Tunnel Tests of Parabolic Trough Solar Collectors". Subcontract Report NREL/SR-550.32282 May 2008
- [11] Kearney DW. "Parabolic Trough Collector Overview". *Parabolic Trough Workshop 2007 at the National Renewable Energy Laboratory*, Golden CO. Disponible en: [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/kearney\\_collector\\_technology.pdf](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/kearney_collector_technology.pdf)
- [12] Montes-Pita M J, "Análisis y propuestas de sistemas solares de alta energía que emplean agua como fluido calorífero". Directores: Abánades-Velasco A, Sánchez-González M. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, 2008.