

## Desarrollo de un prototipo de helióstato para la Planta Colón Solar

*Rafael Osuna, Francisco Cerón  
Inabensa*

*Manuel Romero y Ginés García  
DER-Plataforma Solar de Almería, Ciemat*



www.energuia.com

***Las restricciones en cuanto a disponibilidad de terreno en la planta Colón Solar y la asimetría de la parcela dieron lugar durante el proceso de diseño a la creación de una actividad específica destinada a desarrollar un nuevo prototipo adecuado a estas circunstancias. El resultado de la optimización ha sido el prototipo COLON-70 con superficie reflectante de 70 m<sup>2</sup> desarrollado por Inabensa con la colaboración y asesoramiento de Ciemat. La configuración de la superficie de espejos es totalmente densa, sacrificándose el típico hueco central que suele ser habitual para dotar a los helióstatos de abatimiento en situaciones de descanso o emergencia. Por contra el diseño es ligero con un peso de la parte móvil inferior a 32 kg/m<sup>2</sup>. La estructura del helióstato es en forma de T (pedestal+brazo soporte) y con 6 celosías sobre las que se alojan un total de 21 facetas. El prototipo de helióstato COLON-70 construido y ensayado en la Plataforma Solar de Almería cumplió los objetivos de calidad óptica (2,9 mrad) fijados por el proyecto y el objetivo económico marcado de 35.000 pta/m<sup>2</sup> para 500 unidades.***

### 1. Introducción

El sistema captador primario de energía en una central termosolar de torre o de receptor central está formado por un campo de helióstatos o espejos que focalizan el haz luminoso procedente del sol concentrándolo en el receptor situado encima de la torre. Dichos helióstatos poseen un sistema de seguimiento en dos ejes para su focalización continuada sobre un punto focal fijo, manteniendo una imagen constante a lo largo del movimiento solar. En este sentido un campo de helióstatos equivale a un enorme paraboloide facetado en una gran extensión de terreno cuyo factor de ocupación del suelo se sitúa entre el 20 y el 30% [3]. El campo de helióstatos conjuntamente con el bloque de potencia son los subsistemas más costosos de una central termoeléctrica, representando un 72% del total. En cuanto al coste de los helióstatos, éstos representan un 60% de la inversión en la parte solar de la planta. Resulta por tanto crucial el abaratamiento de los costes del campo de helióstatos para conseguir obtener un sistema competitivo en términos económicos.

Un helióstato, de la actual generación, consta básicamente de una superficie reflectante, una estructura soporte, un mecanismo de accionamiento en acimut

y en elevación, pedestal, cimentación y un sistema de control. El desarrollo de los helióstatos muestra una clara evolución desde los primeros prototipos, con una estructura pesada y rígida con segundas superficies acristaladas y superficie reflectante en el entorno de los 40 m<sup>2</sup> [4], a los más recientes mucho más ligeros de peso, de mayor superficie y de más bajo coste con una mayor variedad de materiales reflectantes a base de espejos de bajo contenido en hierro o polímeros con la superficie anterior plateada [6]. Históricamente se han perfilado dos líneas perfectamente definidas en el desarrollo de los helióstatos, siempre encaminadas a obtener un coste más bajo sin reducir el rendimiento.

La primera línea está encaminada hacia configuraciones de helióstatos a base de facetas y de grandes superficies de más de 100 m<sup>2</sup>, con las correspondientes reducciones en el precio por m<sup>2</sup> de estructuras, mecanismos, cableado y cimentaciones. Por contra, a mayor tamaño de los helióstatos, mayores problemas ópticos y mayores problemas de lavado.

La segunda la originan los helióstatos con nuevos materiales reflectantes, como es el caso de los de membrana tensionada (helióstatos con una superficie metálica muy fina tensada desde un anillo que, a su vez soporta a la propia membrana). La parte

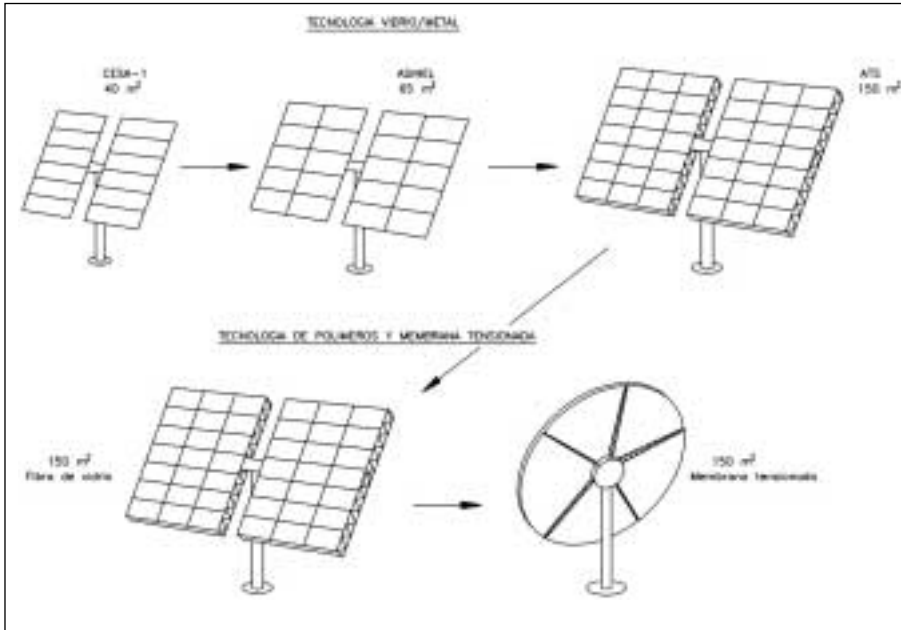


Figura 1. Evolución histórica en el desarrollo de helióstatos

anterior de la membrana está cubierta por unos films reflectantes, normalmente a base de plata depositada.

Hasta ahora, la experiencia acumulada se circunscribe a los helióstatos, llamemos, convencionales, con espejos de cristal. La disponibilidad de estos helióstatos ha resultado ser superior al 95% en la mayor parte de los casos. La reflectividad promedio anual de un campo de helióstatos está entre el 85% y el 90%. Puede variar ligeramente al alza en función de las características de la superficie reflectante y algo más a la baja, en función del grado de limpieza. El mecanismo de accionamiento y las facetas suponen un 66 % del total en el coste de un helióstato, mientras que en el coste de las facetas el precio del espejo puede llegar a suponer un tercio del total, siendo pues éste un aspecto a optimizar. De todos los elementos, el mecanismo de accionamiento es el más sensible en coste al área del helióstato.

La tecnología actual de helióstatos de vidrio/metal que se puede considerar más comercial se centra en unidades entre 70 y 100 m<sup>2</sup>, como es el caso del helióstato Colón desarrollado por Inabensa en colaboración con Ciemat y especialmente diseña-

do para un emplazamiento con fuertes restricciones [7], el GM-100 de 105 m<sup>2</sup> desarrollado por Ciemat [5], y el helióstato de 150 m<sup>2</sup> realizado por ATS en EEUU [1]. Los precios se mueven, según los escenarios de producción, entre las 18.000 y las 35.000 pta/m<sup>2</sup>. En cuanto al concepto de membrana tensiionada, el mayor hito logrado hasta el momento actual, es el helióstato de Steinmüller (ASM-150), con 150 m<sup>2</sup> y una calidad de imagen de 2 mrad [9]. A pesar de estos resultados, el helióstato de membrana no ha conseguido mejorar, por el momento, las expectativas de cos-

tes de los más probados helióstatos de vidrio/metal.

## 2. Especificaciones técnicas del helióstato Colón 70

Durante el diseño preliminar de la planta solar, que tomó como punto de partida el helióstato SOLGAS de 66 m<sup>2</sup> [2], se pudo comprobar la dificultad física para introducir en el recinto de la parcela un número superior a 500 helióstatos. Por encima de la mencionada cifra la única forma de conseguir aproximarse al punto de diseño (21 MW térmicos) era incrementar sustancialmente la altura de la torre para facilitar la visión del receptor por un campo tan compacto, y aún así el límite estaba en unos 540 helióstatos (Tabla I). Las limitaciones venían claramente marcadas por la existencia de un terreno máximo disponible y por la asimetría del mismo.

Estudios anteriores [8] demostraban el mayor aprovechamiento de suelos escasos o caros cuando se utilizaban helióstatos compactos donde la totalidad de la superficie de interceptación de la radiación solar incidente es reflectante y no existe un hueco central de abatimiento con superficie reflectante separada en

Tabla I. Comparación entre helióstato SOLGAS y helióstato COLON

HELIOSTATO SOLGAS 66 m <sup>2</sup> CON HUECO CENTRAL						
Potencia diseño MW	Altura torre (m)	Número Helióstatos	Dist. focal (m)	Cavidad Apert. H. (m)	Cavidad Apert. V. (m)	Cavidad Prof. (m)
17,3	93,7	459	380	7,8	6,5	5,0
17,7	98,3	471	380	6,8	6,4	3,7
18,1	103,3	482	380	7,0	6,6	3,8
18,6	108	494	380	6,8	6,4	3,8
19,3	120	515	380	8,6	6,2	4,3
20,1	132,2	538	380	8,0	6,7	4,2
HELIOSTATO COLON 70 m <sup>2</sup> SUPERFICIE COMPACTA						
21,8	109	489	380	7	6,6	4,4

Tabla II. Principales características técnicas del heliostato Colón 70

HELIOSTATO INABENSA-COLON 70	
Fecha de diseño:.....	1997
Configuración:.....	Heliostato en configuración "T" doblemente simétrico
Superficie reflectante: .....	69,3 m <sup>2</sup>
Geometría:.....	Rectangular doblemente simétrica
Dimensiones [altura, anchura]: ....	9.060 x 7.825 mm
Altura rótula sobre el suelo: .....	4.152,45 mm
Nº de Facetas: .....	21
Tamaño facetas:.....	3.010 x 1.105 mm
Superficie especular por faceta: ..	3,3 m <sup>2</sup>
Peso Facetas:.....	67 kg
Movimientos angulares: .....	Acimut: ±105° (±1°) Elevación: 90° (±1°)
Velocidad: .....	540°/h
Posición de descanso: .....	Espejos verticales
Período de abatimiento:.....	10 min. (desde posición más desfavorable)
Potencia eléctrica máxima:.....	2x187,5 W
Cadena cinemática: .....	Ratio 1:18.400

dos pétalos. Con esta nueva filosofía se ha modificado la configuración del heliostato, consiguiéndose alcanzar la energía anual requerida mediante un nuevo diseño más compacto de 21 facetas y 70 m<sup>2</sup>.

Las condiciones de operación que el heliostato Colón-70 debe cumplir dependen de algunos factores externos, tal y como se puede comprobar en los siguientes cuatro puntos:

#### - Operación Normal

El heliostato operará de forma continua con el 100% de rendimiento, bajo las siguientes condiciones:

- Viento: hasta 18 km/h.
- Temperatura: 0-50°C.
- Angulo de elevación: 0-90°.
- Actividad sísmica: Nula.

#### - Operación Reducida

El heliostato operará de forma continua con rendimiento reducido (<100%) bajo las siguientes condiciones:

- Viento: 18-36 km/h.

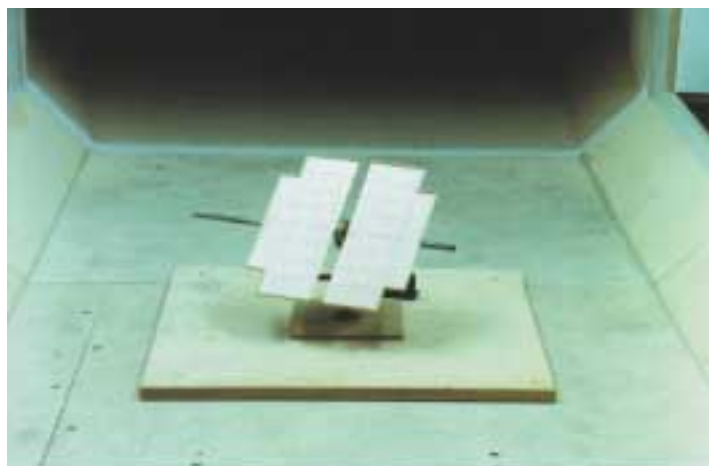
- Temperatura: 0-50°C.
- Angulo de elevación: 0-90°.
- Actividad sísmica: Nula.

#### - Estado de Reposo

El heliostato permanecerá en esta posición bajo las siguientes condiciones:

- Viento: hasta 36 km/h.
- Temperatura: -10-50°C.
- Angulo de elevación: 90°.
- Actividad sísmica: 0,6 m/s<sup>2</sup>.
- Granizo: de 20 mm con velocidad de impacto de 20 m/s en cualquier dirección.

Figura 2.  
Vista de uno de los modelos a escala utilizados en el ensayo aerodinámico



#### - Estado de Supervivencia

El heliostato se mantendrá sin deformaciones permanentes bajo las siguientes condiciones:

- Viento: 0-120 km/h.
- Temperatura: -10-50°C.
- Angulo de elevación: 0°.
- Actividad sísmica: 0,6 m/s<sup>2</sup>.
- Granizo: de 20 mm con velocidad de impacto de 20 m/s en cualquier dirección.
- Tormentas eléctricas, lluvia, arena y nieve.

### 3. Estudio aerodinámico

El diseño del heliostato comienza con el estudio aerodinámico general de las diferentes posibilidades que se proponen para dar cobertura a las necesidades propias de una planta concreta. Así, un estudio básico de una propuesta de aplicación solar servirá para marcar las restricciones que deben imponerse en el diseño de los heliostatos a utilizar.

Un estudio aerodinámico en túnel de viento ayuda a determinar las cargas que debidas al viento aparecen en las diferentes geometrías de heliostatos que se ensayan. Las configuraciones que se consideren podrán contemplar las mas diversas formas y tamaños, incluyendo por ejemplo posibilidades

con y sin hueco central, y para ambas la presencia o ausencia de suplementos laterales.

En la figura 2 puede verse a modo de ejemplo, un modelo de helióstato con hueco central y suplementos laterales ensayado para la Planta Colón Solar. En concreto se trata del helióstato de 66 m<sup>2</sup> SOLGAS con hueco central mencionado en la Tabla I.

Para la realización de estos ensayos, Inabensa ha contado con la colaboración de la Universidad Politécnica de Madrid, utilizando el túnel aerodinámico T4V que esta institución posee en la sede de la E.T.S.I. Aero-náuticos. Este túnel es de sección de ensayos cerrada y circuito fluido abierto. Está equipado con cuatro ventiladores de 7,5 kW de potencia cada uno y velocidad regulable. Las dimensiones de la cámara son de 1,2 m de alto por 1,2 m de ancho, pudiéndose alcanzar velocidades de viento de 126 km/h.

El túnel está dotado de los elementos de medida apropiados para el tipo de ensayos que se realizan, transductores de presión, unidades de lectura secuencial de presiones, sistema de adquisición de datos y ordenador. Además consta de una balanza de tres grados de libertad que permite medir la resistencia, la sustentación y el momento de picado. También se dispone de anemometría de hilo caliente y de una serie de tubos Pitot y captadores de presión que se apoyan sobre un sistema informático de adquisición de datos que permiten estudiar el campo fluido alrededor de cualquier modelo.

La validez de los resultados que se obtienen ensayando modelos en un túnel aerodinámico está refrendada por el principio de la mecánica de fluidos conocido como semejanza dinámica, que establece que en régimen incompresible, a bajas velocidades en relación con la velocidad del sonido, como es el caso en consideración, los coeficientes

adimensionales de fuerzas y momentos aerodinámicos medidos sobre un modelo y los que aparecen sobre el obstáculo real serán los mismos siempre que en modelo a ensayar se reproduzcan a escala aquellos detalles de la realidad que sean aerodinámicamente significativos y siempre que o bien se conserve el llamado número de Reynolds o bien se demuestre la independencia de los resultados respecto de este parámetro. El número de Reynolds se define como  $Re = UL/v$ , donde  $U$  es la velocidad de la corriente incidente,  $L$  una longitud característica y  $v$  la viscosidad cinemática de la corriente fluida.

Este segundo supuesto, es decir, el de la independencia de los resultados respecto al número de Reynolds, es en general de aplicación en la mayoría de los obstáculos no aeronáuticos. Si el objeto expuesto a la corriente incidente no está adecuadamente fuselado, la corriente se desprende en las aristas o donde las superficies cambian rápidamente de pendiente, produciéndose una situación que no cambia al aumentar el valor del número de Reynolds con el incremento del valor de la dimensión característica  $L$ , una vez superado un cierto valor de este parámetro denominado valor crítico.

En el caso que nos ocupa, debido a que los helióstatos no tienen forma fuselada el desprendimiento de la corriente se produce siempre de la misma manera, y aunque el valor del nu-

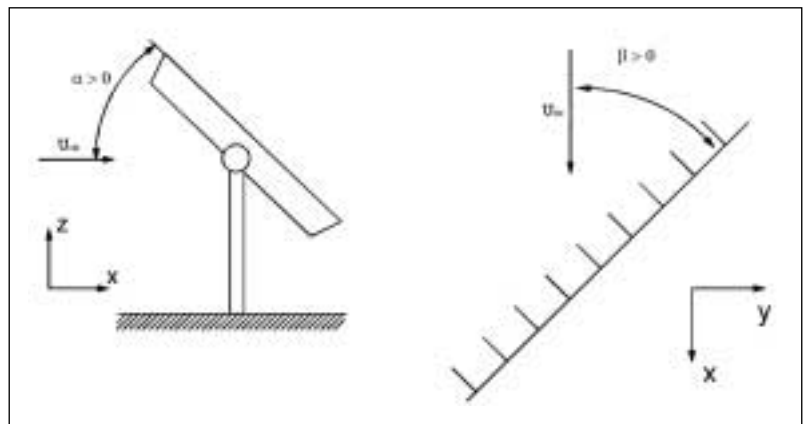
mero de Reynolds en los ensayos sea menor que en la realidad, es en todo caso muy superior al valor crítico, por lo que los resultados medidos en las simulaciones a escala se pueden extrapolar a los tamaños mayores del helióstato real.

El sistema de referencia que se adopta para realizar este tipo de estudios es el llamado de ejes viento. El viento se supone horizontal y paralelo al suelo. El eje  $x$  se hace coincidir con la dirección y sentido del viento. El eje  $z$  lleva la dirección de la vertical y finalmente el eje  $y$  lleva la dirección y sentido adecuado para formar un triedro a derechas.

Con el sistema adoptado, la posición del helióstato queda determinada por dos ángulos: el de ataque  $\alpha$ , que es el formado por el plano del helióstato con el suelo y el de guiñada,  $\beta$ , que es el que forma el eje horizontal del helióstato con el viento. Para una aclaración sobre estos ángulos y el criterio seguido para sus signos véase la figura 3.

Para medir los momentos en los diferentes modelos de helióstatos se realiza un montaje con una doble articulación, de forma que sea posible cambiar el ángulo de ataque y el de guiñada. La forma de operar es dejar uno de los dos movimientos bloqueado con el ángulo en el valor deseado, mientras que el eje alrededor del que es posible el otro movimiento se conecta a un sistema de palancas que permite la medida del momento

Figura 3.  
Sistema de referencia empleado y criterio de signos de los ángulos de ataque y guiñada



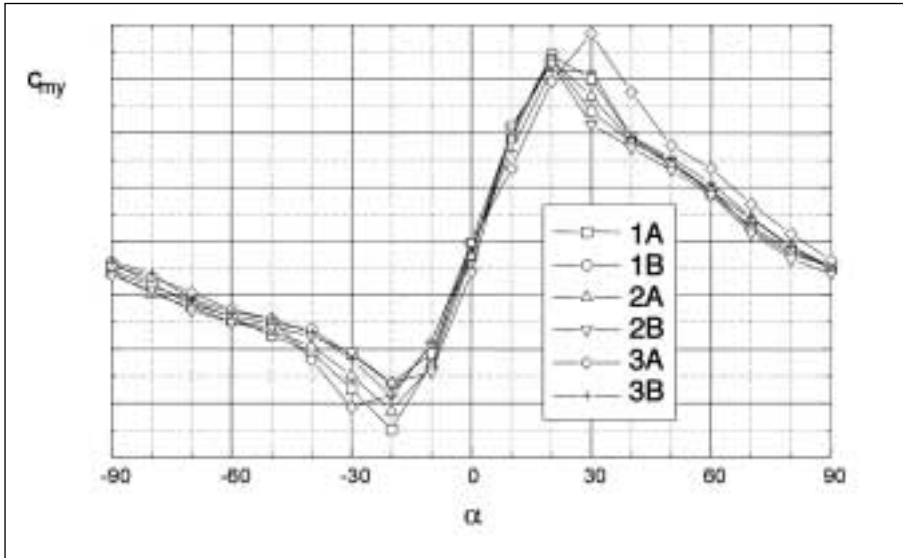


Figura 4. Momento de cabeceo de las diferentes configuraciones ensayadas

que ejerce la fuerza del viento cuando se mantiene también su posición fija.

A continuación se presenta un extracto de los resultados que son importantes para Inabensa en el diseño de heliostatos.

### 3.1. Momentos

En el caso del coeficiente de momento de cabeceo se observa que los valores máximo y mínimo son muy parecidos en valor absoluto. Hay una zona en torno a  $\alpha = 0$  en la que el comportamiento del coeficiente de momento es lineal con el ángulo, hasta que el extradós del heliostato entra en pérdida, este fenómeno se produce para ángulos algo mayores de  $20^\circ$  en valor absoluto. No se obtiene

para  $\alpha = +90^\circ$  y  $\alpha = -90^\circ$  un valor cero del coeficiente como ocurriría si el heliostato estuviese situado a una altura infinita del suelo, ya que en este caso el efecto del suelo se traduce en una zona de depresiones en la parte inferior y por tanto en un valor negativo del coeficiente.

Hay que hacer constar que, debido a la forma elegida para adimensionalizar los momentos, los valores de los coeficientes de momento son muy similares para todas las geometrías ensayadas que se muestran como ejemplo.

Se pueden hacer comentarios muy similares a los referidos al coeficiente de momento de cabeceo respecto al coeficiente de momento de guiñada. Se puede observar la dependencia lineal

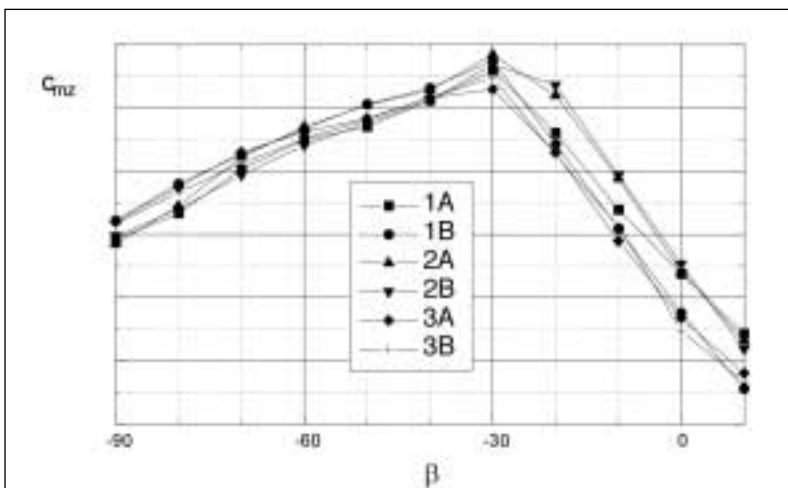


Figura 5. Momento de guiñada de las diferentes configuraciones ensayadas

de este valor respecto al ángulo, en torno a  $\beta = 0$ , comportamiento que se conserva hasta un determinado ángulo de guiñada en el que se genera la pérdida, en torno a  $-30^\circ$ , valor en el que se produce la caída del coeficiente. Cabe reseñar que para  $\beta = 0$  el coeficiente alcanza un valor ligeramente distinto de cero debido a la pequeña resistencia que producen al viento las celosías.

El coeficiente de momento  $cm_x$  no ha sido medido, pero en cualquier caso será menor que los otros dos y no producirá cargas sobre los mecanismos.

### 3.2. Fuerzas

El caso crítico para la resistencia corresponde a  $\alpha = 90$  y  $\alpha = -90$ . En cuanto al coeficiente de sustentación, el máximo se obtendrá cuando, no estando todavía en pérdida el heliostato, el coeficiente de momento de cabeceo medido sea máximo. No se ha considerado el valor del coeficiente de fuerza lateral  $c_y$  ya que, además de ser en general más pequeño que los coeficientes de sustentación y resistencia, tiene un efecto menor sobre los requerimientos que se exigen a los mecanismos.

Del estudio aerodinámico sobre los heliostatos se obtiene como resultado que tanto las fuerzas como los momentos provocados por el viento son proporcionales a la superficie y dependen fundamentalmente del factor de forma del heliostato.

### 3.3. Cálculo de cargas

A partir de los coeficientes aerodinámicos y de la geometría del heliostato, se calculan los esfuerzos siguientes:

- $F_x$ : fuerza en la dirección del eje X, aplicada en el centro de la superficie especular.
- $F_z$ : fuerza en la dirección del eje Z, aplicada en el centro de la superficie especular.

- $M_{y_{viento}}$ : componente del momento de elevación debida al viento con una velocidad de 45 km/h.
- $M_{y_{peso}}$ : componente del momento de elevación debida al peso propio de la estructura.
- $M_{y_{descentrado}}$ : componente del momento de elevación debida al descentramiento de las fuerzas  $F_x$  y  $F_z$ .
- $M_{y_{total}}$ : resultante total del momento de elevación cuando el viento es delantero.
- $M_{y_{total}}$ : resultante total del momento de elevación cuando el viento es trasero.
- $M_z$ : resultante total del momento de acimut debida al viento con una velocidad de 36 km/h, para un ángulo de elevación de  $90^\circ$ , heliostato en posición vertical.

Se calculan las cargas para las condiciones de funcionamiento del mecanismo con viento máximo, que es de 45 km/h para el sistema de elevación en la ope-

ración de abatimiento y de 36 km/h para el sistema de acimut, sistema que no actúa durante la operación de abatimiento.

## 4. Dimensionado, cálculo y simulación estructural del Heliostato

Una vez realizados los estudios de las cargas que van a definir de forma general las dimensiones constructivas del heliostato, se procede al dimensionado y cálculo de los diferentes elementos que conforman el mismo. Los objetivos de esta fase del desarrollo son:

- Seleccionar del mecanismo apropiado a las dimensiones y solicitudes del heliostato.
- Diseñar la estructura del heliostato.
- Cumplir las restricciones de la

tabla de desviaciones máximas permitidas en rayo reflejado para distintos casos de carga.

- Comprobar que no se alcanza el límite de fluencia en ningún punto de la estructura.
- Mediante un proceso iterativo de cálculo, minimizar costes de material, fabricación, instalación y mantenimiento del campo de heliostatos en general y, consecuentemente, del heliostato en particular.

Se procede en primer lugar a optimizar el tamaño del mecanismo de accionamiento en función de las cargas más desfavorables debidas al viento y al peso propio de la estructura móvil, que dependerán del área de la superficie reflectante que se elija.

El mecanismo de accionamiento del heliostato es el encargado de producir de forma independiente los movimientos de elevación y acimut, de forma que la superficie especular pueda

Tabla III. Errores que se han considerado como máximos admisibles en el diseño del heliostato Colón-70

Condiciones de operación	Pos.	Causa de error	Error en rayo reflejado (milirradiantes)
Errores que aparecen en cualquier situación	1	Contorno de los espejos (ondulaciones, tolerancias de curvatura, etc.) a $25^\circ\text{C}$ .	1,5
	2	Cantado en foco común.	1,2
	3	Ajuste de ejes de rotación (desplome de ejes, no ortogonalidad, horizontalidad del asiento del pedestal).	0,5
	4	Control electrónico (ancho codificadores, resolución de bordes, cálculo demanda, posicionado de ejes, efectos atmosféricos, coordenadas del Sol, etc.)	1,0
	5	Flexión del pedestal por calentamiento diferencial.	0,3
	6	Parcial de 1 a 5.	2,24
Errores debidos a fuerzas másicas al girar el eje de elevación (dif. Entre $30^\circ$ y $90^\circ$ )	7	Flexión del pedestal.	0,6
	8	Deformación de la estructura soporte.	1,55
	9	Deformación de los espejos.	0,4
	10	Elasticidad de los mecanismos.	-
	11	Parcial de 7 a 10.	1,71
Errores debidos al viento (18 km/h)	12	Flexión y Torsión del pedestal.	0,4
	13	Deformación de la estructura soporte.	0,1
	14	Deformación de las facetas.	0,2
	15	Tolerancia de los mecanismos.	0,3
	16	Elasticidad de los mecanismos.	0,4
	17	Parcial de 12 a 16.	0,68
Total			2,9



Figura 6.  
Mecanismo  
convencional  
de engranajes

so propio de la estructura para cada tipo de mecanismo considerado. Se analiza además la influencia en el momento de elevación más desfavorable, de la posición del conjunto celosías, facetas y espejos, buscando la posición que hace mínimo el momento debido al peso móvil.

Un mecanismo típico suele tener los engranajes de elevación y acimut independientes y conducidos de forma individual.

Estos engranajes de elevación y acimut son iguales unos a otros en cuanto al tipo, la forma de los dientes y el ratio de reducción. El primer paso de reducción es un sistema de engranaje planetario, mientras que el segundo paso, que es el de salida, es un engranaje del tipo tornillo sin fin. La ventaja del engranaje

planetario es que proporciona un alto ratio de reducción ocupando un espacio pequeño.

En el siguiente paso de reducción, el engranaje del tipo tornillo sin fin, proporciona también un elevado ratio de reducción de velocidad y una gran capacidad de momento. No obstante, la eficiencia de este tipo de engranaje es bastante menor, debido a los elevados esfuerzos de fricción. Esto por otra parte tiene como ventaja el hacer que el tornillo sea autoblocante siempre que el ángulo de fricción entre la rosca del tornillo y los dientes del engranaje sea mayor que el ángulo con el que se diseña el engranaje.

Además, el mecanismo va provisto de sendos rodamientos de bolas para los sistemas de eleva-

seguir la trayectoria del sol y así reflejar la radiación sobre un foco situado en un punto determinado del espacio. La relación entre el ángulo de incidencia y el de reflexión del rayo hace que los errores angulares se multipliquen por un factor de dos, por lo que es vital que el accionamiento elegido ofrezca una gran precisión de posicionamiento.

Las características que debe tener el mecanismo para cumplir la finalidad propuesta son:

- Suficiente robustez para soportar el peso propio, el de la estructura móvil y las cargas de viento, y de rigidez para evitar las vibraciones de baja frecuencia.
- Capacidad de generar movimientos extremadamente lentos.
- Gran precisión de posicionamiento y ausencia de holguras.
- Posibilidad de garantizar un retorno relativamente rápido a la posición de supervivencia en caso de acercarse grandes vientos o catástrofes naturales.
- Resistencia a la intemperie y a los agentes atmosféricos.
- Facilidad de mantenimiento.
- Reducido coste de construcción y de explotación.

Se calcula el momento de elevación más desfavorable debido a la influencia del viento y del pe-

Figura 7.  
Descripción de  
la superficie  
reflectante y  
estructura  
soporte del heliostato  
COLON-70 por  
elementos  
finitos

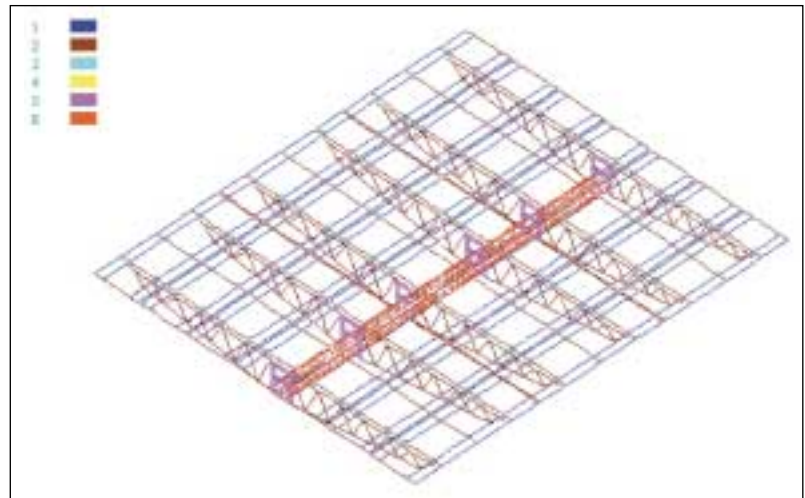
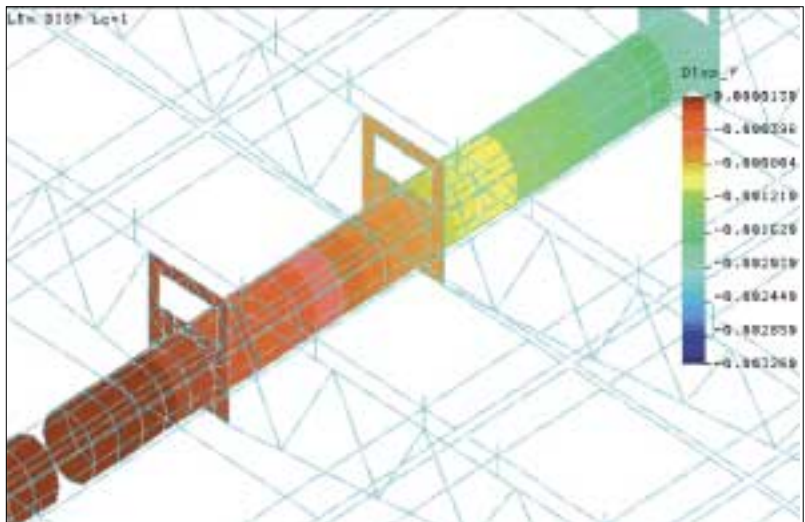


Figura 8.  
Heliostato  
Colón 70:  
Brazo  
horizontal.  
Desplazamientos  
Uy debidos  
a fuerzas  
máscas  
al girar el eje  
de elevación  
de 30° a 90°



ción y acimut, que son del tipo X con cuatro puntos de contacto. El mecanismo lleva además un circuito sellado de lubricación con aceite.

Conocida la configuración básica del helióstato en cuanto a su forma, el área de la superficie reflectante y las dimensiones del mecanismo de accionamiento, se realiza un diseño óptimo de la estructura del helióstato, desde el punto de vista de la economía y de la facilidad de ejecución y de mantenimiento. Se pretende reducir y simplificar así en la medida de lo posible el número de soldaduras, y utilizar perfiles abiertos que permiten una mejor prevención y mante-

nimiento de la estructura ante la corrosión. Con esta filosofía se diseña también la faceta que se utiliza.

Por último se procede a calcular los desplazamientos que sufre la estructura al aplicarle el estado de cargas más desfavorable, utilizando un programa de análisis de estructuras mediante el método de los elementos finitos, figura 6 y figura 7. Una vez conocidos los desplazamientos de los puntos se procede a hacer un cálculo de las desviaciones angulares que se producirán en el rayo reflejado, comprobando que estas se mantienen dentro de los límites permitidos.



Figura 9.  
Vista trasera del helióstato COLON-70 instalado en la Plataforma Solar de Almería apuntando al blanco ubicado a una distancia de 380 m y utilizado para su caracterización óptica. En la fotografía se aprecia la estructura en T formada por el pedestal y el brazo soporte. También se aprecian las fijaciones de las facetas a las celosías de la estructura



Figura 10.  
Vista frontal del helióstato Inabensa-Colón 70. Como se aprecia la optimización realizada por CIEMAT para el máximo aprovechamiento del campo disponible dio lugar a una disposición compacta de los espejos eliminando el típico hueco central para abatimiento

### 5. Fabricación y montaje en la plataforma solar de Almería

Inabensa realizó el proceso de construcción y montaje del helióstato en su totalidad. En las siguientes imágenes se observan distintos detalles de estas operaciones. El conjunto de mecanismo, brazos, celosías y facetas (conjunto móvil), fue montado en tierra. Tras la instalación y alineación del pedestal sobre la cimentación, el conjunto móvil fue izado sobre éste por medio de una grúa. Lo cual fue un avance en la reducción de costes de montaje. La instalación de facetas en su estructura, puesta sobre pedestal, supone un mayor coste de instalación por su dificultad, necesidad de grúa, trabajo de operarios sobre andamios, etc.

Para poder realizar una correcta evaluación del helióstato, éste fue dotado de un control local que permitiera realizar un seguimiento preciso de la posición del sol a lo largo del día. El control local desarrollado en su día por el Ciemat para su helióstato denominado GM100 ha sido adaptado y puesto en servicio en el helióstato prototipo del proyecto Colón Solar. Para ello el helióstato se ha equipado con dos motorreductores de corriente alterna y dos codificadores ópticos incrementales acoplados mecánicamente en los ejes finales de movimiento.

Una de las novedades de este control es el empleo de convertidores de frecuencia comerciales de baja potencia para el control del funcionamiento de los motores y para el manejo de varias velocidades programables. Ello garantiza el correcto gobierno de los motores de AC, más robustos y baratos, mediante soluciones comerciales fiables y económicas.

La tarjeta electrónica de control empleada, modelo GA2696A, es



Figura 11.  
Caja de control  
local del  
heliostato  
Colón-70 con  
la tarjeta  
GA2696A  
desarrollada  
por Ciemat

una tarjeta multifuncional pensada para cubrir todas las necesidades de seguimiento solar de los diferentes prototipos solares de la Plataforma Solar de Almería. Esta tarjeta está especializada en la lectura de codificadores ópticos incrementales y absolutos permitiendo una resolución, en la lectura angular, de hasta 65.536 pasos por vuelta lo que supone resolver hasta 0,1 mR. Para esta aplicación la resolu-

ción empleada en ambos ejes ha sido de 14.400 pasos por vuelta (0,4mR). La tarjeta, gracias a un reloj en tiempo real con calendario y a un potente algoritmo de cálculo solar, determina cada dos segundos la posición del sol con una precisión mejor de 0,5 minutos de arco. Este hecho, unido a la alta resolución en la medida de la posición angular en los dos ejes, garantiza un preciso seguimiento solar del foco del heliostato en lazo cerrado.

## 6. Bibliografía

[1] Alpert, D.J. y Houser, R.M. "Performance evaluation of large-area glass-mirror heliostats"; Libro: Research, Development and Applications of Solar Thermal Technology, pág. 91-100, Ed. B.P. Gupta and W.H. Traugott, Editorial: Hemisphere, New York. ISBN: 1-56032-095-8 (1990).

[2] Blanco, M., Ruiz, V., Silva, M., de Lara, A. y Martín, J.G. "SOLGAS European Initiatives". Libro: Solar Thermal Concentrating Technologies, Vol. I, pág. 299-314, (Eds) M. Becker and M. Boehmer, Editorial: C.F. Müller Verlag, Heidelberg. ISBN: 3-7880-7616-X (1997).

[3] Falcone, P.K. "A handbook for solar central receiver design", SAND86-8009, Sandia Nat. Labs., diciembre (1986).

[4] Mavis, C.L. "A description and assessment of heliostat technology", SAND87-8025, Sandia Nat. Labs., enero (1989).

[5] Monterreal, R., Romero, M., García, G. y Barrera, G. "Development and testing of a 100 m<sup>2</sup> glass-metal heliostat with a new local control system". Libro: Solar Engineering 1997, pág. 251-259, Eds. D.E. Claridge and J.E. Pacheco, Editorial: ASME, New York. ISBN: 0-7918-1556-0 (1997).

[6] Romero, M., Conejero, E. y Sánchez, M. "Recent experiences on reflectant module components for innovative heliostats", Solar Energy Materials 24, 320-332 (1991).

[7] Romero, M., Fernández, V. y Sánchez, M. "Optimization and performance of an optically asymmetrical heliostat field", Journal de Physique IV, Symposium Series, Vol. 9, Pr3, 71-76 (1999).

[8] Sánchez, M., Romero y Ajona, J.I. "Sensitivity analysis of a hybrid solar tower plant for southern Spain". Libro: Solar Thermal Concentrating Technologies, Vol. I, pp. 315-331, (Eds) M. Becker and M. Boehmer, Editorial: C.F. Müller Verlag, Heidelberg. ISBN: 3-7880-7616-X (1997).

[9] Weinrebe, G., Schmitz-Goeb, M. y Schiel, W. "On the performance of the ASM150 stressed membrane heliostat", Libro: Solar Engineering 1996, pág. 113-118, Eds. J.H. Davidson and J.Chavez, Editorial: ASME, New York. ISBN: 0-7918-1765-2 (1996).

