

Diseño de un heliostato empleando técnicas computacionales

Design of a heliostat using computational techniques

Chacón, Rubén*; Provenzano, Sebastián; Dávila, Luís y Barboza, Santiago
Escuela de Ingeniería Mecánica. Grupo DIMMA. Facultad de Ingeniería. ULA
Mérida 5101A, Venezuela
*rdchacon@ula.ve

Resumen

En el presente trabajo se explica el procedimiento empleado en el diseño de un heliostato, para ser utilizado en el Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA), en el cual se han empleado herramientas computacionales de CAD-CAE. Esto permite la interacción entre las dos disciplinas involucradas, ingeniería mecánica y astronomía y, a la vez, realizar de una manera más eficiente el diseño. En el diseño se han tomado en cuenta, como requerimientos de partida, que todos los materiales fuesen fáciles de adquirir y que sus partes no ópticas pudieran ser fabricadas en un taller de metalmecánica de nivel medio. Esto, con el objetivo de reducir el costo y aumentar la factibilidad de ser construido en zonas tecnológicamente poco desarrolladas. Los resultados obtenidos de los programas computacionales se validan por medio de comparaciones con los hallados analíticamente, obteniéndose un instrumento que cumple con todos los requerimientos planteados.

Palabras clave: Heliostato, CAD-CAE, Ingeniería Mecánica y Astronomía.

Abstract

The present work describes the procedure used to design a heliostat to be used at Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA) (Astronomy Investigation Centre), in which has been used CAD-CAE computational tools. This allows the interaction between the two disciplines involved, mechanical engineering and astronomy and, in turn, makes a more efficient design. The design has taken into account that all materials were readily available and the non-optical parts could be manufactured in mid-level metalworking workshop. This, with the aim of reducing the cost and increase the feasibility of been fabricated in areas with low technological development. The results obtained from computer programs are validated with comparisons made analytically; as a result, it was obtained an instrument that meets all the requirements proposed.

Key words: Heliostat, CAD-CAE, Mechanical Engineering and Astronomy.

1 Introducción

El nombre de Heliostato proviene de la unión de las palabras griegas helio y stato, que significan respectivamente Sol y estático. Un Heliostato consiste básicamente en una montura que sostiene a un espejo plano denominado “espejo primario”, el cual gira sobre el eje polar siguiendo el sol durante el movimiento de la tierra. El espejo refleja el haz de luz solar en una dirección fija, independientemente del movimiento aparente del sol en el cielo. Este tipo de instrumento presenta la desventaja de que la imagen proyectada rota 15 grados por hora, lo que no permite realizar fotografías de larga exposición o estudios prolongados de un punto definido, pero cuando estas actividades no son relevantes, resulta el instrumento ideal por su bajo costo y sencillez. Esta sencillez ha sido aprovechada por diversos

investigadores para utilizarlos en forma de arreglos con el fin de concentrar la luz del sol en una pequeña área, lo cual permite aprovechar la energía solar en diferentes aplicaciones (Kribus, y col., 2004 y Vázquez, y col., 2006).

Un primer requerimiento a tomar en cuenta es que el Heliostato debe ser diseñado de forma tal que la rigidez estructural minimice las deformaciones elásticas que pudieran generarse durante su operación; esto para prevenir el desvío de la imagen proyectada. El aumento de la rigidez del Heliostato debe realizarse tomando en cuenta el compromiso que existe entre la rigidez estructural y el peso del aparato, todo con el fin de no incrementar excesivamente su peso. Otro aspecto a tomar en cuenta, es que el heliostato se mueve a muy baja velocidad, 1rev/24hr (0,000694 rpm), para lo cual se requiere un sistema de transmisión que reduzca la velocidad del motor al valor mencionado. Igual-

mente se desea que el instrumento pueda ser fabricado en un pequeño taller de metalmecánica y con máquinas de precisión media, además se desea que los materiales a emplear sean de fácil adquisición. Por último, es conveniente que el diseño contemple la división del aparato en módulos desmontables (apernados), que permitan llevar a cabo el mantenimiento pertinente y el posible cambio de piezas defectuosas y/o desgastadas.

2 Metodología

Para el diseño del Helióstato se emplea el software CAD/CAE, específicamente los programas Autodesk Inventor y Visual Nastran 4D. El uso de estos programas permite una interacción entre las fases del diseño: definición del problema, generación de alternativas de solución y desarrollo de la mejor alternativa, empleándose el software como una herramienta de apoyo, tal y como marcan las tendencias de diseño computacional en la actualidad (Bernal, 2004). El programa Autodesk Inventor se emplea para realizar el modelado geométrico del instrumento, permitiendo la interacción con los astrónomos, lo cual permite mejorar el diseño de manera interactiva, igualmente, la utilización de este programa permite emplear herramientas para el modelado geométrico y cálculo de elementos de máquinas, tales como engranajes, tornillos sinfín, pernos, etc. Por otro lado, el programa Visual Nastran 4D se emplea para hacer los cálculos numéricos, mediante el método de elementos finitos, los cuales facilitan el procedimiento de hallar las formas y dimensiones de las diferentes partes del instrumento, cumpliendo con los requerimientos de rigidez que se plantearon al inicio del proyecto. Los resultados de este programa numérico se mejoran y perfeccionan por medio de técnicas de convergencia h-adaptativa, los cuales luego han sido comparados con resultados teóricos en puntos cuidadosamente seleccionados. Este programa interactúa con el programa Autodesk Inventor, ya que las geometrías generadas en este último, son leídas sin problemas, lo cual facilita el proceso iterativo de diseño.

Las herramientas computacionales CAD y CAE permiten el modelado y simulación de sistemas mecánicos, reduciendo enormemente la realización de modelos reales a escala y prototipos para pruebas. Esto se traduce directamente en la disminución de los tiempos de diseño y costos. Existe una buena conexión entre los programas de modelado y de simulación, permitiendo realizar el modelo lo más real posible, utilizando todas las virtudes de un programa especial de modelado para luego ser transportado al programa de simulación y realizar los estudios deseados.

El Autodesk Inventor es una solución de modelado de sólidos en 3D basado en la innovadora tecnología de Diseño Adaptativo, un nuevo concepto exclusivo de Inventor, que le proporciona un excelente rendimiento en grandes ensamblajes y la posibilidad de ser muy productivo. Este contiene una gran variedad de herramientas para modelar y diseñar elementos de máquinas. En este proyecto fue utilizada

la versión Inventor Professional 10. Específicamente puede realizar las siguientes acciones: modelar geometrías de piezas en 3D, mediante la herramienta Design Accelerator se pueden generar elementos de máquinas, bien sea provenientes de librerías o creados a partir de datos suministrados por el usuario, permite manejar ensambles grandes y subensambles, permite la interfaz con otros programas de aplicación, genera planos a partir de la geometría sólida y permite realizar animaciones.

VisualNastran 4D es una poderosa herramienta para el ingeniero mecánico que combina la simulación dinámica con el análisis de esfuerzos bajo un único ambiente de modelación. Le permite al diseñador probar el movimiento de sus ensambles antes de ser manufacturados y determinar si las piezas resistirán las condiciones operativas, sin necesidad de probar prototipos físicos. Visual Nastran permite la creación de un modelo virtual del mecanismo a estudiar o la integración del modelo a partir de otros programas como el Autodesk Inventor. Una vez obtenida la geometría del sistema se pueden ensamblar las piezas tal como se haría en la realidad, utilizando las restricciones de movimiento. Al realizar la simulación de movimiento del mecanismo, se pueden tomar en consideración infinidad de aspectos y variables importantes para el análisis como son: el movimiento relativo entre piezas, características del elemento motriz (velocidad angular y torque), interferencia entre partes del mecanismo, velocidades, aceleraciones y fuerzas en puntos de interés para el diseño.

Anexamente el programa Visual Nastran cuenta con un módulo FEA (análisis por elementos finitos), que permite realizar el estudio del estado de esfuerzos al que están sometidos las piezas que conforman el mecanismo. El programa viene dotado de una herramienta de refinado de malla, la cual automáticamente incrementa el número de elementos en las zonas de concentración de esfuerzos y geometría compleja, esto constituye una técnica que tiene como finalidad la disminución del error o discrepancia entre el resultado del método de elementos finitos y el estado real de esfuerzos. Una gran ventaja de este software es que permite hacer un análisis tanto estático como dinámico, es decir permite estudiar el estado de esfuerzos en las piezas del sistema en reposo y/o durante el movimiento, lo que no es posible en la mayoría de los programas de elementos finitos.

El utilizar todas estas herramientas en un software de diseño asistido por computadora permite: mejorar en poco tiempo el movimiento y el comportamiento estructural del sistema mecánico a partir de las simulaciones obtenidas, mejorar el diseño de las piezas del mecanismo implementando nuevas ideas y realizando cambios rápidamente, a partir de los modelos virtuales, todo antes de la fabricación, reducir los costos asociados al diseño y fabricación obteniéndose piezas de mejor calidad en menor tiempo.

El diseño se inicia con la búsqueda de información sobre helióstatos existentes con el fin de obtener una idea base sobre geometría, dimensiones, materiales y alternativas

de configuraciones. Para posteriormente tomar las directrices y lineamientos a seguir en nuestro diseño, seleccionando la alternativa que más se acerque a las necesidades del CIDA.

Con las referencias obtenidas se realiza un bosquejo preliminar (Autocad) para definir la geometría y distribución de sus partes, basándose en la utilización de materiales disponibles en Venezuela y la facilidad de fabricación de sus piezas. Esto con la intención de que pueda ser construido en los talleres del CIDA o en algún taller de mediana precisión de la ciudad de Mérida, en un futuro cercano.

El modelado del diseño preliminar se realiza mediante la utilización del Autodesk Inventor, lo cual permite visualizar en tres dimensiones el modelo preliminar del Heliostato. Este modelo virtual nos permite observar la geometría, dimensiones y el funcionamiento del mecanismo, logrando hacer correcciones antes de continuar con el diseño del instrumento.

El sistema de transmisión es uno de los aspectos más importantes del diseño del Heliostato debido a la baja velocidad de rotación requerida para el seguimiento del sol durante el día (1 rev/24 hr). Se realizará tomando en cuenta principalmente esta velocidad de rotación del eje y la velocidad de operación de motores disponibles para esta aplicación.

Una vez definida la geometría del prototipo tomando en cuenta las correcciones y sugerencias aportadas por el personal del CIDA, se utiliza el programa Visual Nastran 4D y su módulo de elementos finitos para el estudio de esfuerzos y deformaciones. De esta manera se puede observar el estado de carga al que están sometidas las piezas y verificar que las deformaciones se mantengan dentro de un rango aceptable para el buen funcionamiento del Heliostato desde el punto de vista óptico.

Para verificar los resultados obtenidos con el Visual Nastran se realizaron cálculos analíticos de los componentes más críticos del Heliostato, tales como: el pasador de inclinación, el eje principal, el soporte del espejo, el pasador largo del espejo y el soporte de la transmisión, los factores de seguridad, los esfuerzos a los que están sometidos y la cantidad de nodos de cada uno de estos elementos, según el programa, se pueden observar en la tabla 1. Esto con la finalidad de asegurar que el procedimiento realizado en el análisis por elementos finitos es el correcto, este procedimiento involucra las restricciones de movimiento, el mallado de las piezas y el porcentaje de error que arroja el programa, entre otros aspectos importantes que influyen en los resultados obtenidos del programa.

Una vez obtenido el diseño definitivo del Heliostato, se procede a la elaboración de los planos de construcción mediante el programa Autodesk Inventor, en los cuales se expone la información necesaria para la construcción de cada pieza. En la Fig. 1 se esquematiza el proceso de modelado virtual y análisis de esfuerzos seguido durante el diseño del Heliostato.

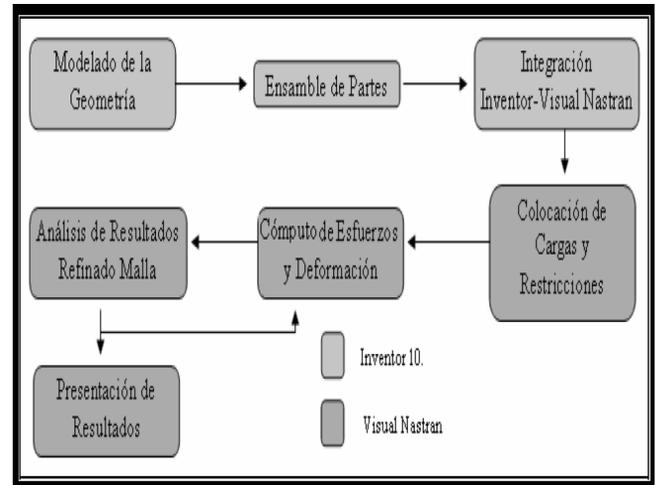


Fig. 1. Flujograma del proceso de modelado y análisis

3 Descripción general de la alternativa desarrollada

Luego de un intenso proceso de planteamiento de alternativas y selección de la más adecuada, se escogió la alternativa planteada en la Fig. 2, en total acuerdo con el personal del CIDA. Para este estudio de alternativas se realiza una revisión del estado del arte, la cual, por razones de espacio no se describe en este trabajo, sin embargo, algunos de los autores consultados son los siguientes: (Manly, 1991; Stix, 1989 y Sinnott, 1985). Es de resaltar que la alternativa seleccionada requiere del diseño de diversos mecanismos que permiten la proyección de la imagen del sol en un punto fijo a lo largo del día y durante todo el año. En la Fig. 2 se muestran los mecanismos necesarios para el funcionamiento del heliostato.

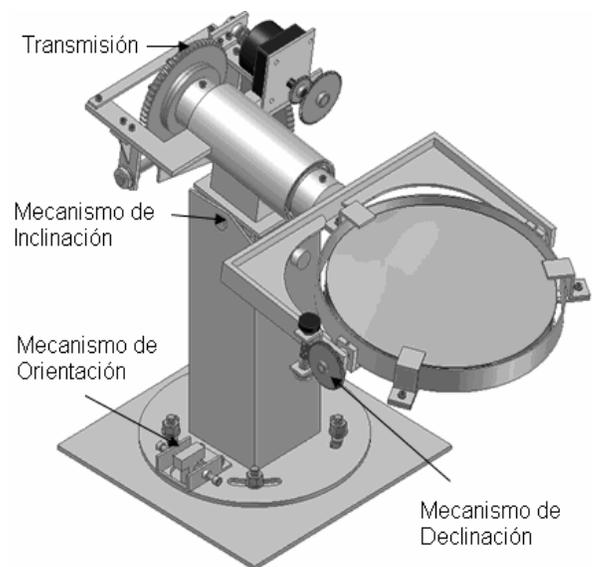


Fig. 2. Mecanismos principales del heliostato

El mecanismo de orientación que se observa en la Fig. 3, permite alinear el eje del Helióstató en la dirección Norte-Sur, lo que se consigue mediante el giro de tornillos contrapuestos sobre un pasador fijo.

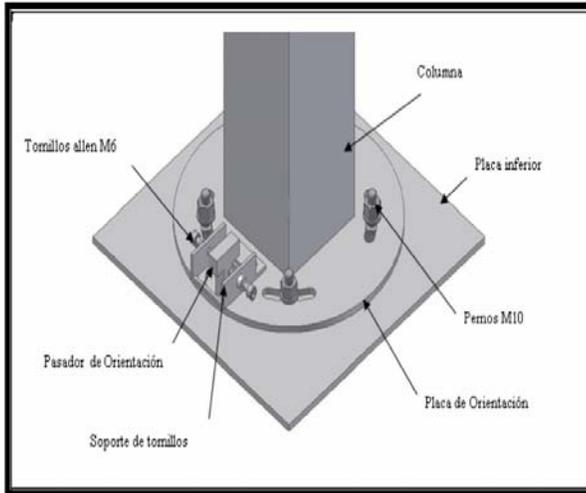


Fig. 3. Mecanismo de orientación del heliostato

El mecanismo de inclinación permite darle al eje del Helióstató el ángulo correspondiente a la latitud del lugar donde opera, ver Fig. 4, que de igual manera consiste en dos tornillos contrapuestos que empujan contra un segmento basculante.

Mediante el ajuste de los mecanismos mencionados se logra el paralelismo necesario entre el eje del Helióstató y el eje polar de la tierra. Cabe destacar que una vez ajustados estos mecanismos, no es necesaria su manipulación a menos que el instrumento se traslade a otro lugar (otras latitudes y/o longitudes).

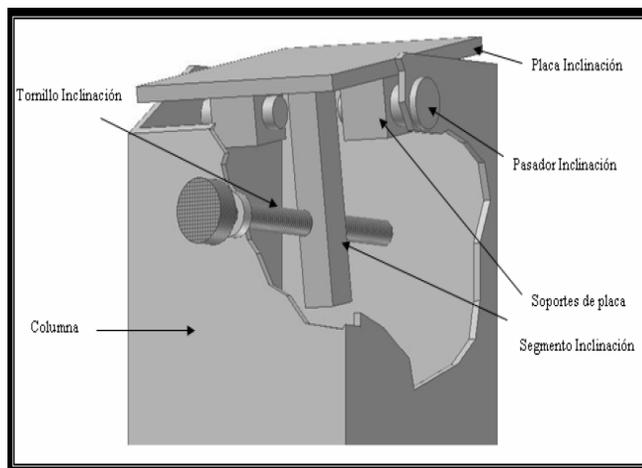


Fig. 4. Mecanismo de inclinación del Heliostato

El sistema de transmisión, que se detalla en la Fig. 5, es el principal mecanismo del Heliostato, ya que éste permite girar el eje del Heliostato a la velocidad necesaria para el

seguimiento del sol, 1rev/24hr (0,000694 rpm), reduciendo la velocidad del motor 7200 veces (5 rpm para éste caso). Para lograr esta relación de transmisión en poco espacio, se emplean dos pares de engranajes de tornillo sinfín y un par de engranajes de dientes rectos. Por último, el mecanismo de declinación permite la orientación del espejo para compensar la declinación del sol durante el año y consiste en una pareja de engranajes de tornillo sinfín.

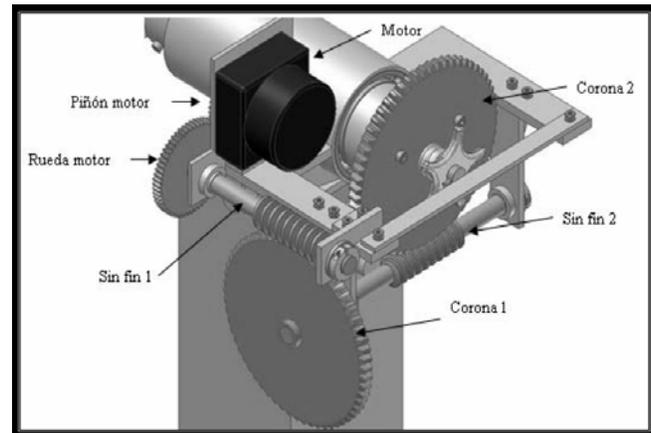


Fig. 5. Sistema de transmisión del Heliostato

Adicionalmente, el Heliostato presenta un mecanismo de desacople (embrague) que permite mover el espejo de forma manual, independientemente de la transmisión, este consiste en dos discos de fricción de acción axial que transmiten el torque necesario para mover el espejo mediante la fuerza ejercida por un resorte. Todas estas características, hacen que el Heliostato, plasmado en el presente trabajo, pueda operar en diferentes lugares del planeta adecuadamente, sin modificaciones más allá de los ajustes pertinentes a la localización geográfica. En general, los componentes estructurales del Heliostato provienen del mecanizado de perfiles comerciales de acero, tales como: tubos, barras lisas, pletinas y láminas e igualmente las coronas y los tornillos sinfín que se maquinan en bronce y el embrague, todos estos elementos están disponibles comercialmente en el país.

4 Análisis de esfuerzos y deformaciones

Como se ha mencionado, el análisis de esfuerzos y deformaciones estructurales de las diversas piezas que componen el instrumento, se realiza con la ayuda del programa Visual Nastran 4D, empleando la geometría generada por el programa Autodesk Inventor. En la búsqueda de una simulación cercana a la realidad, se ha tenido cuidado al seleccionar las condiciones de frontera, empleando las que mejor simulan la interacción entre piezas. Igualmente se ha preferido hacer análisis separados de cada una de las piezas, sin emplear la posibilidad que ofrece el programa de análisis del ensamble, esto para reducir la complejidad del problema

a resolver, ya que el instrumento cuenta con un número relativamente grande de piezas.

Se realiza un proceso de cálculo de esfuerzos y deformaciones para cada pieza, en el cual el mallado se refina a lo largo de un proceso iterativo que busca la disminución del error estructural de la malla, haciéndose más denso en las zonas de concentración de esfuerzos y geometría compleja, empleándose para ello las facilidades del programa Visual Nastran 4D. Para observar la tendencia de los esfuerzos en el proceso h-adaptativo, se eligen puntos de control en cada una de las piezas, en base a éstos se controla la convergencia del proceso. Una gráfica de esfuerzo (en el punto de estudio) contra el número de nodos del mallado de cada iteración, representa la convergencia del valor del esfuerzo, es decir, con dicha gráfica se constata que el valor del esfuerzo, luego de un cierto grado de refinamiento de malla, es independiente de la cantidad de nodos. Igualmente se realiza un estudio de deformación en las piezas en las que se considera que la deformación ocasionada por la operación del heliostato, puede afectar la proyección de la imagen. Producto de estos análisis, se observa que la pieza que en mayor grado puede afectar el enfoque, es el soporte del espejo. Cabe destacar que los valores de deformación en la posición inicial y media del espejo no afectan la proyección de la imagen del sol; es la diferencia que existe entre ellos la que posiblemente afecte la proyección de la imagen, ya que se produce por la variación del estado de carga debido al movimiento. De la diferencia de estos valores se obtiene, que el desplazamiento que posiblemente afecte el enfoque del Heliostato, es de solo 0,31 mm. En la Fig. 6 y Fig. 7 se muestran los resultados del estudio de esfuerzos para la pieza “soporte de espejo”. Igualmente, en la Fig. 8 se muestra la gráfica de convergencia en un punto de control en la misma pieza. Por último, en la Tabla 1 se muestran el número final de nodos que se emplearon en los análisis, los esfuerzos de Von-Mises en los puntos críticos y el factor de seguridad asociado, todo ello para las piezas de mayor importancia.

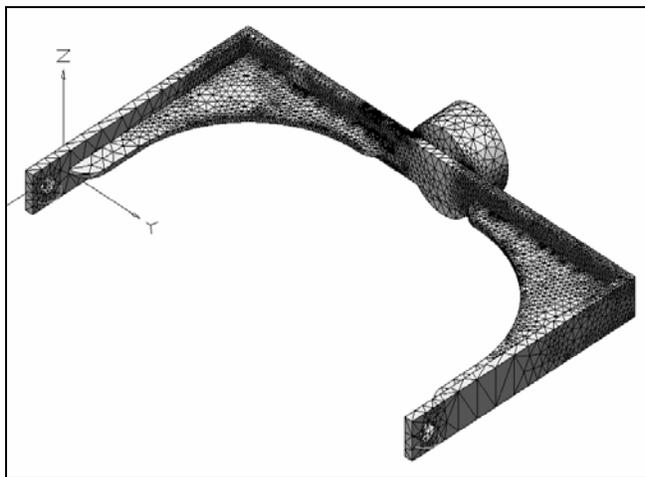


Fig. 6. Mallado final del soporte

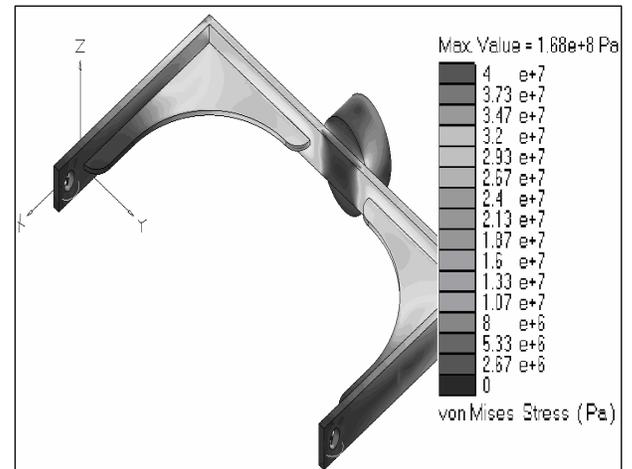


Fig. 7. Esfuerzos en el soporte

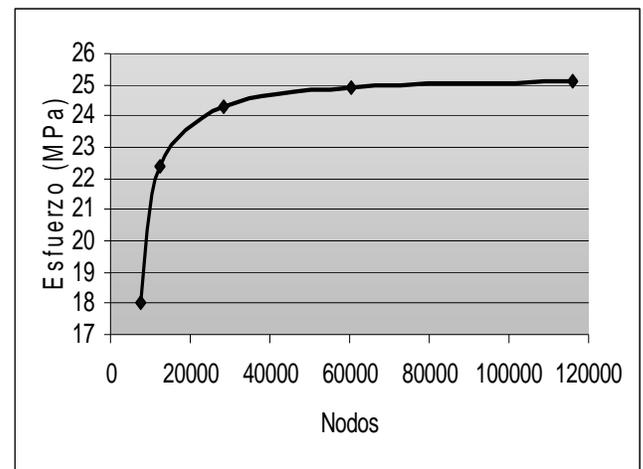


Fig. 8. Convergencia en el soporte del espejo

Tabla 1. Resultados de los componentes estudiados

Componente	Nº de Nodos	Esfuerzo (MPa)	Factor de Seguridad
Pasador de Inclinación	64260	15,4	16,23
Eje Principal	116648	3,7	54,05
Soporte del Espejo	115962	25,1	9,84
Pasador Largo del Espejo	80338	5,93	42,16
Soporte de la Transmisión	113862	5,52	45,29

5 Conclusiones

En este trabajo se muestra el procedimiento empleado para diseñar un Heliostato, el cual puede ser construido empleando materiales económicos y de fácil adquisición en el país, cumpliendo con el principal criterio de diseño plan-

teado por el CIDA al inicio del proyecto, tal como es la rigidez de la estructura (poca deformación). El diseño se realizó utilizando herramientas computacionales CAD/CAE, las cuales permitieron una excelente interacción interdisciplinaria, por medio del prototipo virtual, lo que facilitó la elección y desarrollo de la alternativa de solución planteada.

Se realizaron estudios de esfuerzos y deformaciones de los componentes que se consideran críticos, estableciendo las restricciones y estados de carga cercanos a la realidad, los cuales fueron validados al confrontarlos con resultados analíticos.

Los factores de seguridad de los elementos mostrados en la tabla 1, son relativamente altos, debido a la necesidad de darle una mayor rigidez a la estructura, para garantizar su funcionamiento. La rigidez estructural del instrumento diseñado, garantiza un desplazamiento máximo de 0,31 mm en el espejo, lo cual permite la formación de una imagen solar de excelente calidad.

El sistema de transmisión se diseñó empleando engranajes cilíndricos de dientes rectos y conjuntos tornillo sin-fín-corona, lográndose la reducción necesaria para la operación del Helióstato con una velocidad de entrada de 5 rpm.

Referencias

- Bernal JC, 2004, Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa. Tesis de Doctorado, D. de Proyectos de Ingeniería, U. Politécnica de Cataluña.
- Kribus A, Vishevetsky I, Meri M, Yogev A y Sytnik A, 2004. Continuous Tracking of Heliostats of Solar Energy Eng. Volume 126, Issue 3, pp.842-850.
- Manly P, 1991, Unusual Telescopes, Cambridge University. New York.
- Stix M, 1989, The Sun, Springer-Verlag, Berlin.
- Vázquez J, Relloso S, Domingo, M, Valverde A, Montserrat R y García G, 2006, Sener Heliostat Design and Testing. Solar PACES, A6-S4, Sevilla-España.

Recibido: 10 de octubre de 2010

Revisado: 31 de marzo de 2011