

Análisis dinámico estructural de un heliostato concentrador de energía solar

LEDESMA-JAIME, Reynaldo†, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marcos, FERRER-ALMARÁZ, Miguel Ángel y RAMOS-LÓPEZ, Humberto

Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato

Recibido Agosto 05, 2016; Aceptado Septiembre 25, 2016

Resumen

Un heliostato es un dispositivo utilizado para la recepción y reflexión de rayos solares con el propósito de canalizarlos a un concentrador ubicado en una torre. Como parte de una investigación sobre una planta solar de torre central, el diseño de un heliostato forma parte de un proyecto de desarrollo en la Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, de manera que se logre un aprendizaje de esta tecnología que servirá de base para un desarrollo regional en fuentes renovables de energía. Se pretende contar con una plataforma solar que permita, además de probar la tecnología de torre central, usar y evaluar otras formas de concentración solar y aplicaciones específicas; principalmente, orientado al sector industrial, de generación de energía eléctrica, de refrigeración, y de secadores solares. En el presente trabajo se documenta el análisis estático estructural y dinámico mediante el Método de Elemento Finito (MEF), con el objetivo de determinar los esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad, así como el análisis modal, las frecuencias naturales y modos de respuesta de la estructura de un heliostato. Finalmente se pretende demostrar si la estructura propuesta para el equipo es segura durante su operación.

Heliostato, análisis, método, energía, solar

Citación: LEDESMA-JAIME, Reynaldo, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Marcos, FERRER-ALMARÁZ, Miguel Ángel y RAMOS-LÓPEZ, Humberto. Análisis dinámico estructural de un heliostato concentrador de energía solar. Revista de Energía Química y Física. 2016, 3-8: 1-11.

Abstract

A heliostat is a device used for the reception and reflection of sunlight in order to channel them to a hub located in a tower. As part of an investigation into a solar plant central tower, the design of a heliostat is part of a development project at the Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato, so learning this technology as a basis is achieved for regional development in renewable energy sources. It is intended to have a solar platform that also allows to test the central tower technology, use and evaluate other forms of solar concentration and specific applications; mainly oriented industrial sector, power generation, cooling, and solar dryers. In this paper the structural and dynamic static analysis using the Finite Element Method (FEM), with the objective of determining the stresses, displacement, the safety factor and modal analysis, natural frequencies and modes of response is documented for the structure of a heliostat. Finally it is intended to show whether the proposed structure of the team is safe during operation.

Short circuit CC IEC Standards - NOM

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: rledesma@utsoe.edu.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La gran demanda de los combustibles fósiles a nivel mundial con el paso de los años se ha convertido en un grave problema, debido a que estos generan contaminación y tienen impacto en directo el medio ambiente.

Desde ya hace algunos años se han buscado alternativas para poner un alto a los diversos problemas que se han generado. Una de estas posibles soluciones que ha tomado fuerza y en la cual se ha trabajado es en el desarrollo y aprovechamiento de otro tipo de energías, tales como la eólica, la solar, celdas de combustible, entre otras.

El uso de energías renovables ha tomado una importancia significativa frente a combustibles fósiles. En particular la energía solar que tiene la característica de ser una energía limpia y renovable, y que ha demostrado múltiples beneficios en una amplia variedad de usos, tales como; el calentamiento de agua industrial y doméstico y la generación de energía eléctrica.

En México, en el año 2003 se tenían instalados más de 570,000 m² de calentadores solares, y para el 2012 y 2013 se alcanzaron 600 000 m² en todo el territorio nacional. A pesar de ser un país privilegiado en cuanto a incidencia de radiación solar, lo cual conlleva a tener mejores oportunidades de aprovechamiento, en México no se ha desarrollado tecnología al respecto.

Se conocen diversas aplicaciones directas de la energía solar:

1. Fotoquímicas
2. Fotovoltaicas
3. Fototérmicas
4. Híbridas

Dentro de las tecnologías térmicas se encuentran dos grupos generales: sin concentración y con concentración, que se basan en dispositivos que amplifican la intensidad de la radiación sobre una superficie absorbadora. (Hernandez, 2013). De estos últimos se conocen los sistemas de alta temperatura, que operan a temperaturas mayores a los 300°C y su uso más común es para generar electricidad, y que se diferencian como de torre central y hornos solares.

Los sistemas solares de torre central están formados por espejos planos o levemente convexos, denominados heliostatos, los cuales se encuentran distribuidos de forma que reflejen la radiación solar hacia la parte superior de la torre, donde generalmente se coloca el receptor. Ver figura 1. El principio de funcionamiento es relativamente simple, aunque requiere que el equipo de recepción o el heliostato, siempre reciba los rayos del sol y los dirija de forma precisa a la torre central, lo cual representa cierta complejidad en el sistema de orientación. Ver Figura 2.



Figura 1 Sistema de torre central

Los factores de concentración en los sistemas de este tipo son muy elevados, tomando valores entre 200 y 1000. El rango de potencias unitarias abarca de 10 a 200 MW.

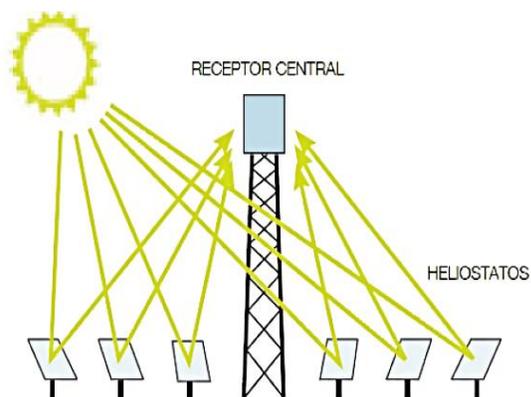


Figura 2 Principio de funcionamiento

Respecto de investigaciones relativas al tema, en México se presenta la misma tendencia, son pocos los esfuerzos para el desarrollo de tecnología que permita aprovechar de manera satisfactoria la energía solar, tanto para calentadores solares, como para la producción de electricidad.

Existe un desarrollo tecnológico importante para mejorar el rendimiento, la calidad, durabilidad y costo de los equipos y sistemas, además de poder abarcar aplicaciones térmicas donde se requieran niveles de temperatura comprendidos entre 200°C y 350 °C.

Actualmente se cuenta con instalaciones de investigación y desarrollo para el aprovechamiento de la energía solar en México. Entre las que se destacan: el horno solar de alto flujo en el estado de Morelos y el campo de pruebas de heliostatos en Sonora.

Refiriéndose a investigaciones sobre el tema de interés, se han reportado diversos estudios relativos al diseño y análisis sistemas similares, así como del estudio y análisis de esfuerzos en sistemas se soporte se heliostatos, abordando distintas situaciones de trabajo y configuraciones.

En un estudio realizado por Griffith (2012), se reportó un análisis modal para un heliostato con condiciones muy concretas de operación, en el que realizan un análisis por el MEF para la estructura principal y se validan resultados mediante un sistema de adquisición de datos experimentales. La estructura bajo análisis cuenta con un sistema de paneles independientes en cuanto a la rotación. En otro artículo se documenta la metodología para el diseño de un heliostato empleando técnicas computacionales que muestra el diseño de algunos componentes por medio de uso de software de CAD y que incluye el análisis mediante elementos finitos de un componente crítico, el soporte del cristal reflectante (Chacón, 2011).

Kribus (2004), reporta resultados de su trabajo desarrollado para el diseño de heliostatos y principalmente enfocando esfuerzos en el apartado de sistemas de control para el posicionamiento y seguimiento de trayectorias precisas.

Por otro lado, en Torres (2015) tras una revisión de la evolución de los heliostatos, sus fundamentos físicos y geométricos y sus aplicaciones, propuso en su artículo el desarrollo e implementación un nuevo sistema heliostático polar simple de polígono deformable con un grado de libertad, que se regula mediante una sola variable en función del tiempo.

Mientras que en Behar (2013), se presentó un estudio amplio respecto del uso y aplicaciones de sistemas de concentración de energía solar, así como de sus propósitos, brindando un panorama muy completo sobre la evolución y la importancia de uso de este tipo de sistemas de aprovechamiento de energía.

Métodología

El MEF ha adquirido una gran importancia en el diseño y análisis de elementos y/o sistemas mecánicos sometidos a cargas, en el campo de la ingeniería, de la física, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales.

Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos virtuales, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado costo tanto económico como en tiempo de desarrollo.

La técnica tradicionalmente utilizada por Solidworks® para el análisis por medio del MEF es de acuerdo a lo siguiente: pre-procesamiento, análisis, post-procesamiento y análisis de resultados.

En el pre-procesamiento se elabora el modelo de la estructura del heliostato, se le asignan materiales, se pasa al ambiente de análisis, se asignan cargas, condiciones de frontera y malla.

Una vez hecho esto, se procede a ejecutar el análisis, no sin antes parametrizar las condiciones en base a las cuales el software lo va a ejecutar, tipo de solver, tipo de elementos, entre otros.

Posteriormente en el post-procesamiento, Solidworks® devuelve imágenes de la estructura en forma de mapas de colores, mostrando también la escala de valores de resultados, para esfuerzos de Von Mises, desplazamientos, deformaciones unitarias (strains) y factor de seguridad.

Por último, en la fase de análisis de resultados corresponde al encargado del proyecto analizar los resultados obtenidos y determinar si son satisfactorios de acuerdo a las condiciones de operación, de los materiales y de los requerimientos de los equipos durante el funcionamiento, y el cual requiere de la experiencia, habilidad y tiempo del especialista.

Modelo

Para propósitos de análisis se utilizó el modelo mostrado en la Figura 3, el cual está formado por un pedestal con soportes anclados al piso, un sistema de posicionamiento que incluye un mecanismo de biela manivela con un sistema de corona sin fin y un actuador lineal, y por último, la estructura de soporte del cristal formada a partir de perfiles estructurales en acero ASTM A-36. El marco principal de la estructura soporte se propuso de PTR de 1.5" x 1.5" en cédula de 1/8", y para las divisiones de refuerzo en el interior de cada sección se utilizó PTR de 1" x 1" en cédula de 1/8". El brazo de soporte central para la rotación de la estructura es de tubo industrial de 4" de diámetro nominal y cedula 80. Las placas laterales de soporte para fijar el brazo de soporte a la estructura son de placa de 1/2".

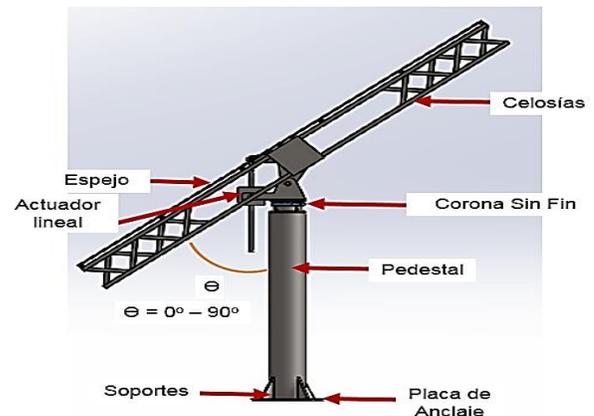


Figura 3 Propuesta de diseño conceptual

En la Figura 4 se muestra un modelo sólido de la estructura superior, que será sujeto de estudio. Para propósitos de simplificación se tomó por separado del heliostato considerando que dada la propuesta de su configuración y de la función a desarrollar, será el componente crítico. En la parte central inferior se corta para poder posicionar de manera vertical y que no interfiera con el mecanismo de posicionamiento de biela manivela.

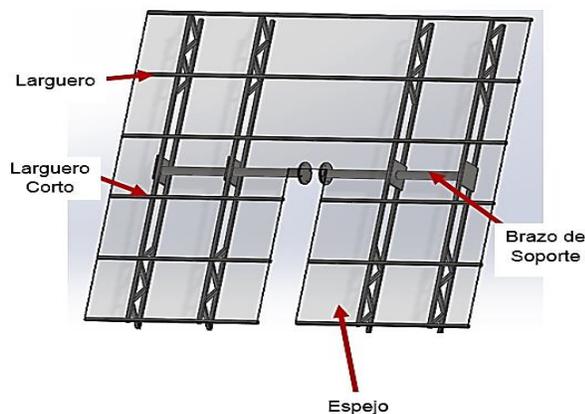


Figura 4 Descripción de la estructura soporte de espejos

Consideraciones iniciales

Las propiedades del acero estructural ASTM A 36 son: esfuerzo de fluencia: 248 MPa, resistencia última a la tensión: 400 – 551 MPa, % de elongación en 8" min: 20, módulo de elasticidad de 200 MPa y una densidad de $0.00000785 \text{ kg/cm}^3$.

Todas las uniones son soldadas con soldadura E7018.

Las cargas de trabajo se determinaron en base al peso de los componentes de trabajo, del cristal, y de la carga de trabajo máxima durante la operación.

Condiciones de frontera

Al modelo bajo análisis se le asignarán dos condiciones de apoyo, ver Figuras 4 y 5: la primera en los extremos de los brazos de soporte del balancín o del sistema de biela manivela en la parte inferior donde se une al pedestal por medio de bujes de bronce prelubricado, está se consideró del tipo articulación o de bisagra rígida. La otra unión se ubicó en el orificio en el extremo de la biela, del tipo articulación o bisagra rígida. Cabe mencionar que las partes mencionadas para los apoyos o condiciones de frontera, forman parte del sistema de orientación y posicionamiento, ver Figura 5, y por propósitos explicativos se muestran por separado. En el modelo a utilizar en el análisis si se integraron en un solo modelo.

Mallado

La malla generada para poder realizar el análisis por MEF se asignó primero por default, posteriormente se hicieron refinamientos en algunas zonas de interés donde se tenía una concentración crítica de esfuerzos y tomando en consideración la curvatura en los vértices de los elementos constructivos propuestos.

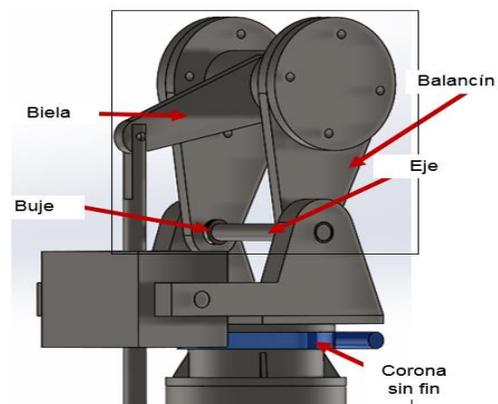


Figura 5 Sistema de orientación y posicionamiento

Solidworks® genera la malla utilizando como elementos base los tetraedros, para elementos en 3D. La malla generada presentó un total de 1720488 nodos y 883326 elementos, con un tamaño mínimo de 0.22 in por lado en la zona de interés. Ver Figura 6.

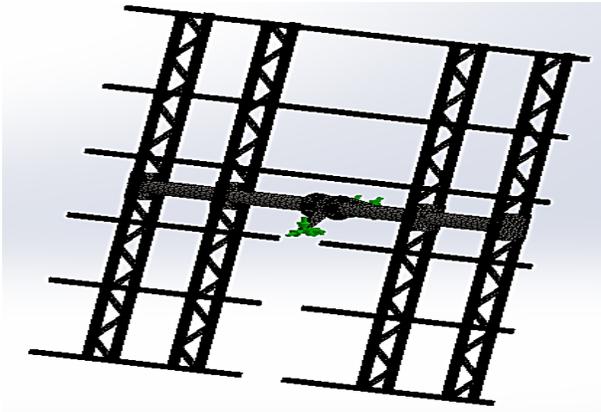


Figura 6 Malla asignada en Solidworks

Análisis estático

Primeramente se realizó un cálculo estático de la estructura, considerando que las cargas se aplican a una velocidad relativamente baja, de tal forma que no influya en los resultados finales. Un análisis lineal asume que las deformaciones debidas a las cargas aplicadas son despreciables por que los esfuerzos y las deformaciones están dentro del límite elástico del material. Por lo tanto se eligió un análisis lineal. Todos los contactos son del tipo unión rígida con una tolerancia de 0.1 mm, tomados de forma automática simulando las uniones soldadas entre elementos.

Para efectos de análisis se consideraron dos posiciones críticas, en base a las magnitudes de las cargas; la primera con la estructura de forma horizontal y la segunda en posición vertical.

Posición horizontal

Esta posición del heliostato no se presentará durante la operación de orientación hacia la torre central, y siguiendo la trayectoria del sol, sin embargo se analizó como primera opción para cuantificar los efectos de la carga de los espejos sobre la estructura (1100 N), tomando en cuenta también que si se presentará de esta manera cuando se realicen labores de mantenimiento e instalación, incluso suponiendo que una persona se puede encontrar sobre o debajo de la superficie de soporte de los cristales. También cuando se presente una velocidad del viento excesiva, de más de 45 km/h, en cuyo caso, se contempla un sistema de plegado rápido como parte del sistema de control y posicionamiento.

En las Figuras 7 a 9 se indican la distribución de esfuerzos de en base al criterio de falla de Von Misses, los valores críticos obtenidos para esfuerzos en la zona crítica o más cargada, y factor de seguridad respectivamente.

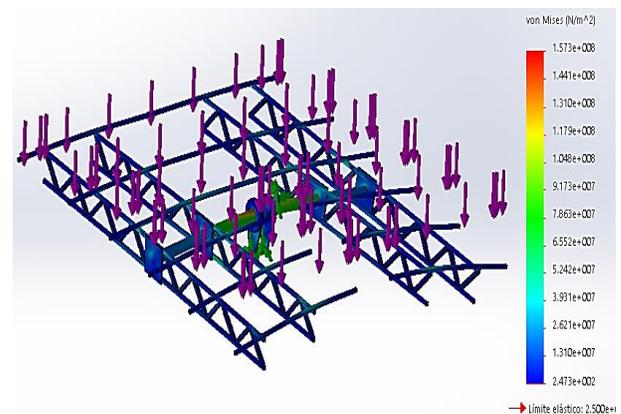
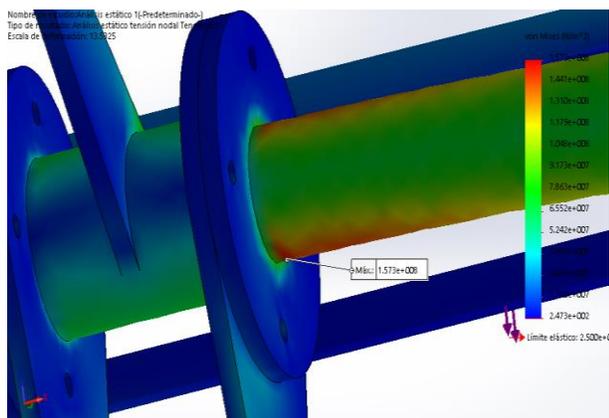
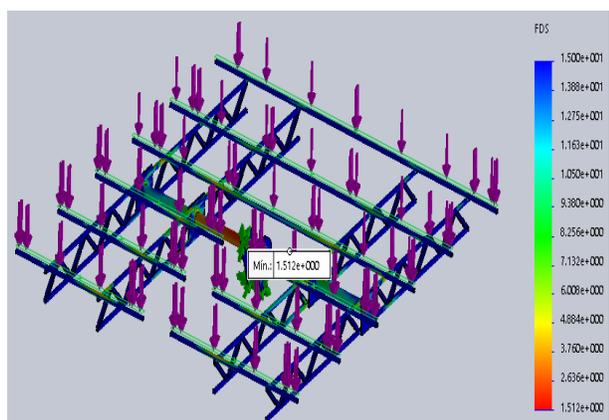


Figura 7 Esfuerzos de Von Misses


Figura 8 Zona crítica con esfuerzos máximos

Figura 9 Factor de seguridad en la configuración

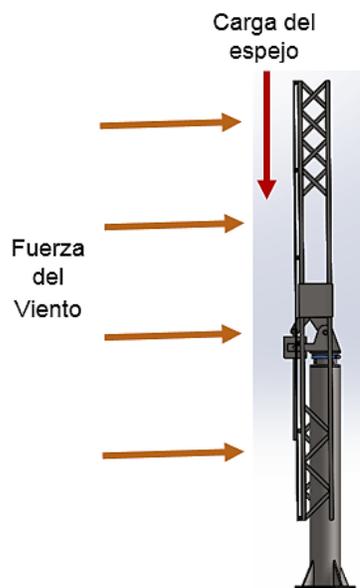
Para esta posición el factor de seguridad es de 1.5, lo cual permite incluso compensar excesos de carga temporales que pueden ser producto de condiciones inestables de operación.

Posición vertical

Con base en el funcionamiento del heliostato, una de las posiciones críticas se presenta cuando la estructura principal se encuentra en posición vertical con referencia al suelo.

Si bien es cierto que durante la operación difícilmente se alcanzará esta posición para el seguimiento de los rayos solares, si se puede presentar durante otro tipo de actividades como lo son: montaje y desmontaje, limpieza, mantenimiento y con el efecto de las fuerzas del viento. Para esta posición, las cargas de trabajo que se presentan son, ver Figura 10:

1. Las debidas a la masa de los espejos reflectores, que en conjunto proporcionan 1100 N en dirección vertical y aplicadas sobre los elementos transversales de la estructura, donde se ubican los soportes de los espejos.
2. Las ocasionadas por la aceleración de la gravedad, en función del material y la masa de la estructura.
3. Las fuerzas de viento, mismas que se tomaran para una velocidad crítica de operación máxima de 45 km/h. Después de este valor de velocidad, deberá entrar en operación un sistema de plegado automático, el cual mandará la estructura a una posición horizontal.


Figura 10 Segunda configuración de análisis

Los resultados para esta configuración se muestran en las figuras 11, 12 y 13. La distribución de los esfuerzos de Von Mises es muy discreta, ubicándose una zona crítica muy próxima a los apoyos de la estructura.

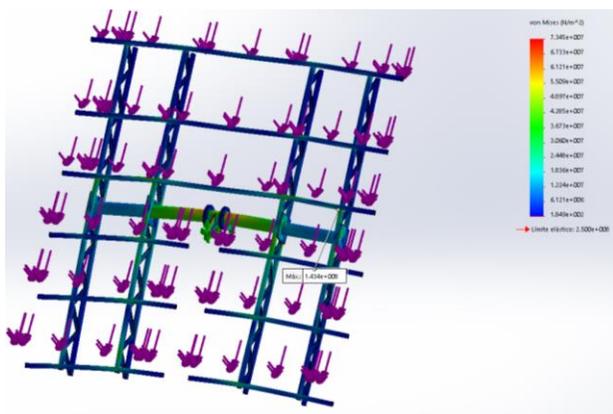


Figura 11 Esfuerzos de Von Mises

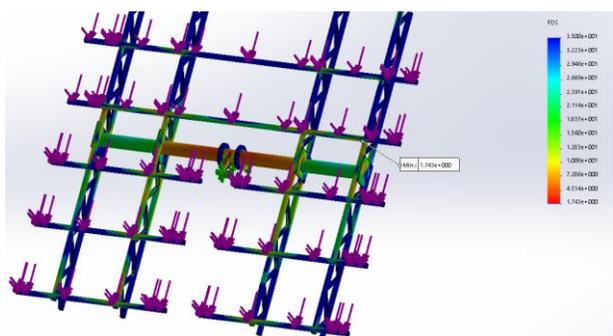


Figura 12 Factor de seguridad

El factor de seguridad también se muestra de manera uniforme, indicándose en la figura 12, que la mayor parte de la estructura trabaja y que la carga se transfiere desde el lugar de aplicación hasta una zona muy próxima a los apoyos, lo que disminuye también de manera significativa el efecto de rigidización.

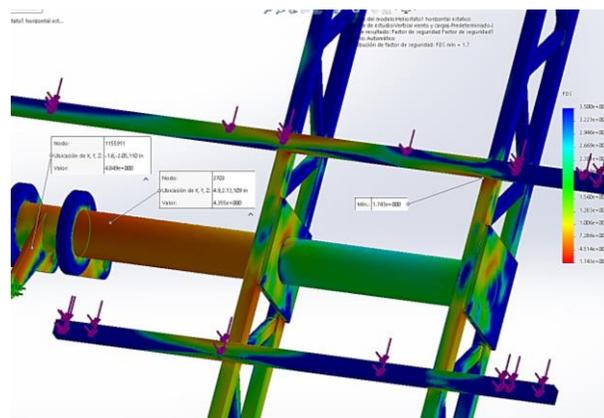


Figura 13 Detalle de zona crítica con factor de seguridad mínimo de 1.7

Los resultados nos indican que la estructura es segura desde el punto de vista de aplicación de carga estática. Un factor de seguridad de 1.7 indica que los componentes van a estar trabajando por debajo de su esfuerzo de fluencia.

Análisis modal

El análisis modal consiste en la determinación de las características dinámicas inherentes de un sistema en forma de frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y las formas de modos, y se formula un modelo matemático para este comportamiento dinámico.

Durante el funcionamiento del heliostato en el cual se presentan movimientos de rotación alrededor de dos ejes, y con los cuales se sigue la trayectoria del sol para maximizar la eficiencia de captación, la estructura estará sometida a fuerzas ocasionadas por la gravedad, por la interacción entre componentes (partes y motores), y por factores climáticos, principalmente las ocasionadas por el viento.

De acuerdo con sus condiciones de operación se ve afectado por excitaciones con una frecuencia característica, las que al coincidir con una frecuencia natural del modelo ocasionaran el fenómeno de resonancia. También es importante la comparación de estos modos de frecuencia natural del equipo, con las frecuencias ocasionadas por fenómenos tales como sismos y de ráfagas de viento.

En Solidworks se utilizó la siguiente configuración para el análisis: 9 modos, de 0 a 50 Hz como rango de frecuencia, la estructura solo se consideró con apoyos y sin cargas de operación, y todos los contactos del tipo “rígido” para simular uniones soldadas.

Las frecuencias naturales y algunos de los modos propios son mostrados en la Tabla 1 y en las Figuras 14 a 17. En estas imágenes también se muestran los valores de los desplazamientos totales de acuerdo a los modos correspondientes, que si bien están exagerados, muestran el comportamiento de la estructura.

No	Frecuencia, Hz	Periodo, s
F1	8.5857	0.11647
F2	17.016	0.05877
F3	18.826	0.053118
F4	20.293	0.049278
F5	21.691	0.046103
F6	25.028	0.039955
F7	28.526	0.035056
F8	31.167	0.032086
F9	40.101	0.024937

Tabla 1 Valores de frecuencias de la estructura

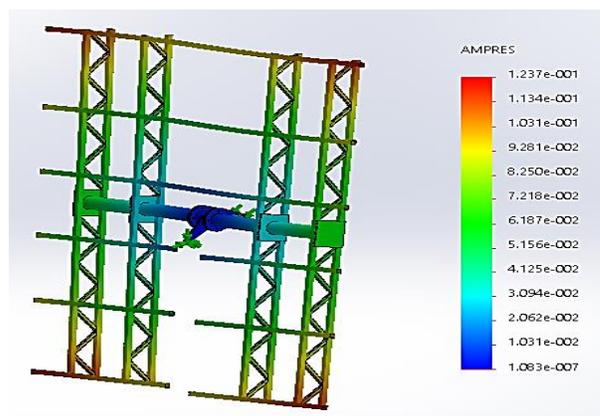


Figura 14 Primer modo a 8.58 Hz

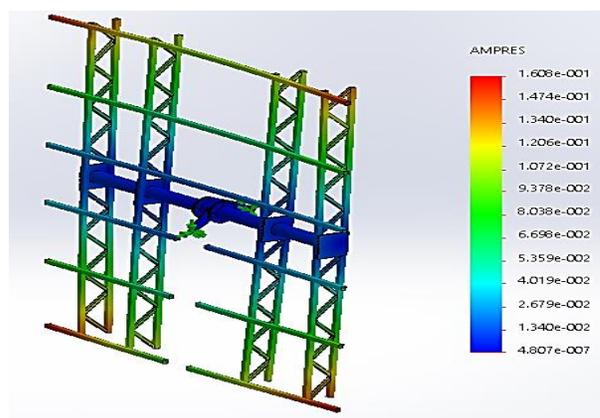


Figura 15 Segundo modo a 17.016 Hz

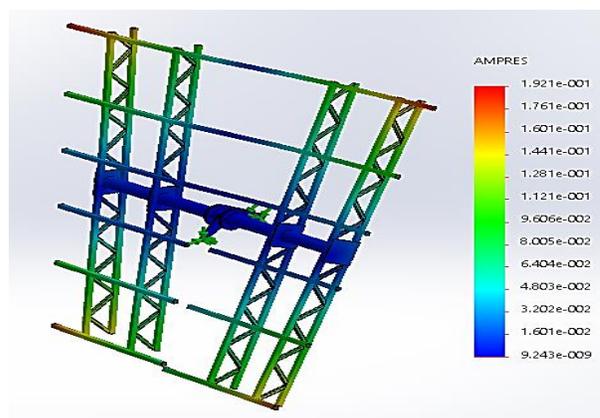


Figura 16 Tercer modo a 18.82

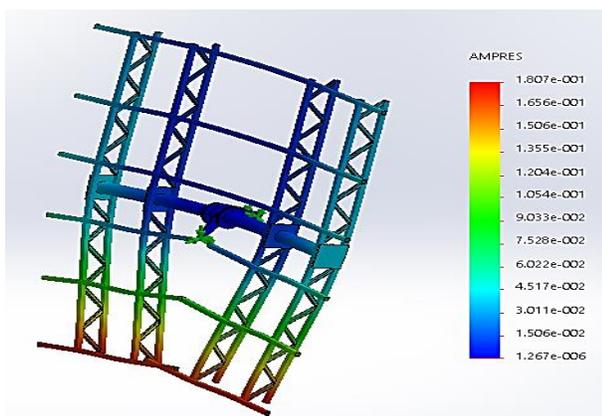


Figura 17 Cuarto modo a 20.29 Hz

Resultados y discusión

De los resultados obtenidos para las distintas condiciones de carga incluyendo la aplicación de carga estática y análisis modal permiten afirmar que la estructura propuesta puede ser segura para su operación. Bajo condiciones de carga estática se obtuvieron factores de seguridad superiores a 1.5 en las posiciones críticas, esto brinda un factor de seguridad adicional, ya que en cualquiera de las posiciones intermedias de viaje del heliostato siguiendo la trayectoria del sol se presentarán condiciones de carga inferiores.

En cuanto al análisis modal se cuantificaron las frecuencias naturales de la estructura, mismas que resultaron en valores altos, por encima de frecuencias ocasionadas por los accionamientos motorizados y por los efectos del viento al mover la estructura e incluso de sismos. Para validar los datos obtenidos en esta prueba se deja como recomendación para trabajos futuros y una vez que se construya el prototipo, la realización de una prueba experimental de medición de frecuencias naturales en base a excitaciones comunes, lo que permitirá también descartar daños en las uniones de los componentes por los efectos del fenómeno de resonancia.

También se debe poner especial atención a las secciones de la estructura más alejadas del centro o de los apoyos, son las más propensas a presentar daños por vibraciones.

En general se puede mencionar que el prototipo virtual obtenido tiene buen comportamiento bajo condiciones críticas de operación.

Conclusiones

En este trabajo se puso especial atención en el análisis de las características estáticas y dinámicas de la estructura de soporte para los cristales de un heliostato. Para el caso del análisis estático lineal la distribución de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad se determinaron en base a cargas originadas por condiciones especiales de operación, sistemas auxiliares de trabajo y la carga operativa.

Es conveniente, para trabajos futuros, también realizar un proceso de optimización de material debido a que en algunas regiones de la estructura de soporte se observa que los esfuerzos están muy por debajo del valor de referencia, de fluencia de los materiales considerados, lo que daría pie a reducir materiales principalmente en cuanto a cédulas se refiere para las secciones más alejadas de los soportes. En cuanto al análisis modal se observó que es recomendable poner especial atención en el proceso de manufactura de las secciones inferiores, ya que los desplazamientos son críticos en estas zonas, y con lo cual se contribuye a disminuir movimientos de la plataforma de cristales y en los soportes principales. Inicialmente se proyectó tomando en cuenta las características de equipos ya construidos y que de alguna manera son funcionales.

Finalmente, de acuerdo a lo reportado en este artículo y a los resultados de la ingeniería de detalle, se considera que un heliostato construido bajo estas especificaciones puede ser seguro para su operación en campo, quedando pendiente el diseño del sistema de control para el posicionamiento.

Referencias

Behar O, Khellaf A, Mohammedi K. (2013), A review of studies on central receiver solar thermal power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 23, pp.12–39.

Chacón, R., Provenzano, S., Dávila, L. y Barboza, S. (2011), Diseño de un heliostato empleando técnicas computacionales, *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 32, No. 1, pp. 17-22.

Griffith, D. T., Ho, C. K., Hunter, P. S., Sment, J., Moya, A. C., & Menicucci, A. R. (2012), Modal analysis of a heliostat for concentrating solar power. In *Topics in Modal Analysis I*, Volume 5, pp. 415-423. Springer New York.

Hernandez M. I. (2013), Diseño de un microhorno solar y campo de heliostatos para diversas aplicaciones. Tesis para obtener el título de Ingeniero mecánico. Universidad Nacional Autónoma de México.

Kribus A, Vishevetsky I, Meri M, Yogev A y Sytnik A. (2004), Continuous Tracking of Heliostats, *Solar Energy Eng.* Volume 126, Issue 3, pp.842-850.

Torres M., López Luque, M. Varo. (2015), Design of an innovative and simplified polar heliostat for integration in buildings and urban environments. *Solar Energy* 119. 159-168.