

Diseño y análisis por medio de volumen finito y elementos finitos de un seguidor solar

Luis Álvarez Romero, Víctor Herrera Jiménez

Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Industrial,
Rosales y Blvd. Luis Encinas S/N CP. 83000, Hermosillo, Sonora, México.
luisbealvarez@gmail.com, victor.herrera@unison.mx

Resumen. Una de las principales fuentes de energía alternativa es la solar, ya que es la más abundante y permanente. Para su aprovechamiento, se cuenta con los campos de concentración, conformados de una torre central y una serie de heliostatos concentradores de radiación. La estructura de estos últimos se ve afectada en gran medida por el viento, viéndose afectado su comportamiento mecánico. el método de volumen y elementos finito permite conocer los esfuerzos y deformaciones presentadas en las estructuras y a predecir su comportamiento en diferentes condiciones de trabajo. En este estudio se hace una revisión general de los principales aspectos involucrados en este tipo de generación de energía solar, así como de los factores de diseño y las cargas de viento a los que se ven sometidos los heliostatos.

Palabras clave: Heliostato, elementos finitos, cargas de viento, energía solar.

1 Introducción

El consumo de energía a nivel global ha ido aumentando cada vez más en los últimos años, esto debido a la demanda de energía que se tiene con el desarrollo industrial, el crecimiento de la población y el incremento de los estándares de vida en el mundo. Para satisfacer esta demanda, a nivel global se tiene que aproximadamente un 87% de la energía es generada a partir de combustibles fósiles. Estos recursos, además de ser limitados, al ser consumidos generan gases contaminantes, que provocan problemas como la contaminación urbana o el calentamiento global [1]. En nuestro país se tiene como objetivo que para el año 2024, el 35% de la energía sea producida por fuentes alternativas como la hidroeléctrica, geotérmica, eólica o solar [2]. Dentro de esta última, México tiene una ventaja geográfica importante, ya que está ubicado en el llamado cinturón solar, que se refiere al grupo de países que reciben mayor cantidad de radiación solar en el mundo. Esta fuente de energía es la más abundante y permanente, puesto que la radiación recibida por la superficie de la tierra por minuto es mayor que la utilización de la energía de la población mundial en un año[3].

Para el aprovechamiento de la energía solar, podemos encontrar la energía solar fotovoltaica y los campos de concentración solar. Estos últimos están conformados por una

Álvarez Romero L, Herrera Jiménez V (2018) Diseño y análisis por medio de volumen finito y elementos finitos de un seguidor solar Avances de Investigación en Ingeniería en el Estado de Sonora 4 (1):253-259

torre receptora capaz de acumular la radiación, en donde se realiza un proceso de evaporación de sal y agua para poner en marcha una turbina generadora, transformando la energía mecánica en energía eléctrica. Para esto, se colocan un número determinado de seguidores solares denominados heliostatos, los cuales, están compuestos de una estructura que soporta varios espejos planos o ligeramente curvados que enfocan y acompañan la irradiación solar para redireccionarla hacia un receptor colocado en la parte superior de la torre [4].

Esta estructura debe ser capaz de soportar su propio peso y cargas de viento externo, así como mantener su deformación por debajo de un cierto umbral de tal manera que la pérdida del ángulo de aceptación de sus módulos permanezca dentro de límites tolerables. Para sustentar de una manera sólida el diseño de los concentradores solares, se debe definir las especificaciones geométricas de los materiales a utilizar y predecir con precisión su comportamiento bajo diferentes condiciones de trabajo.

2 Marco teórico

A continuación, se presentan los diferentes aspectos involucrados en el diseño de los seguidores solares.

2.1 Estructura de los heliostatos

La estructura de estos seguidores, esta acoplada a un sistema de accionamiento mecánico de dos ejes, además de un dispositivo de control de movimiento en el que se instala una rutina de seguimiento solar, que opera el sistema mecánico y mantiene un apuntamiento dentro de un rango angular hacia la superficie colectora de la torre[5].

La parte reflejante está conformada por espejos de vidrio de segunda superficie denominadas facetas, las cuales cuentan con tres o cuatro puntos de sujeción a los soportes de la estructura de metal. Esta conexión está dada por medio de celosías ajustadas por fijación roscada. A su vez, las celosías están sujetas a un eje cilíndrico horizontal llamado tubo estructural de torque. Dicho tubo, a través de un mecanismo altamente reductor, está unido al sistema que proporciona el movimiento al heliostato. Todas estas estructuras se encuentran fijas a un pedestal. El conjunto de los mecanismos reductores y la estructura que los une al pedestal y al tubo de torque, se conoce como cabezal [6].

2.2 Cargas de viento

Los vientos son movimientos horizontales de masas de aire provocados por diferencias de presión en las distintas zonas de la atmósfera y a la rotación terrestre. En el diseño estructural, esto se toma como una acción accidental desde el punto de vista de las combinaciones de carga en que interviene y de los factores de carga que se deben adoptar. cuando el libre flujo del viento se ve obstaculizado por un objeto fijo, tiene que desviarse para rodearlo, lo que provoca presiones sobre el objeto. Las partículas de aire golpean la

cara expuesta directamente al efecto del viento, ejerciendo sobre ella un empuje. En la cara opuesta, las estelas de flujo se separan del objeto provocando una succión. Estas dos fuerzas dan lugar a una fuerza de arrastre sobre el objeto [7].

La presencia de cargas de viento afecta en gran medida el comportamiento y la integridad física del heliostato, ya que su estructura debe ser lo suficientemente estable como para soportar estas fuerzas. El problema con las fuerzas del viento puede ser dividido en dos sub-problemas separados: En primer lugar, las cargas de viento deforman elásticamente la estructura de soporte de la superficie reflejante, reduciendo la calidad óptica del haz de luz reflejado, esto se le conoce como problema rígido. En segundo lugar, las cargas de viento pueden romper la estructura, ya sea debido a los fuertes vientos de ráfaga que causan sobrecarga, o a través de la fatiga debida a una carga de viento alternada, provocando que el material falle después de varios ciclos de carga. Esto se puede definir como problema de fuerza. Además, dado que la carga del viento es variable alternancia de ráfagas de viento causa vibraciones que pueden degradar el control de seguimiento del heliostato [8].

Los efectos de la carga debida al viento en la estructura del seguidor se analizan de manera vectorial en los ejes x, y, y z, teniendo como referencia la base de la estructura, con el eje x de frente a la superficie reflejante, el y de manera paralela y la z hacia arriba. Esto descompone la fuerza de arrastre del viento según la acción en cada uno de los ejes, esto está representado por la siguiente expresión (1)

$$F_i = CF_i * \frac{1}{2} * \rho * U^2 * A \quad (1)$$

En donde F_i es la fuerza de arrastre en la dirección del eje i, CF_i es la constante de la fuerza a lo largo del eje i, U es la velocidad del viento, ρ es la densidad del viento y A es el área de la superficie[9].

2.3 Esfuerzos y deformaciones

La acción de la fuerza de la gravedad afecta la estructura del heliostato, reflejándose como deformación. Para realizar un análisis estático, se cuenta con el método de elementos finitos, en donde se establecen las propiedades del material, sujeciones del modelo y las fuerzas actuantes sobre la estructura, como es su propio peso y carga debida a la acción del viento. Estas deformaciones se representan por (2), en donde K es la matriz de rigidez global, la cual contiene principalmente los grados de libertad de cada elemento; F es la matriz que contiene las magnitudes de fuerzas localizadas en cada nodo de los elementos y Q es el vector que contienen los desplazamientos de todos los nodos de un elemento.

$$KQ = F \quad (2)$$

El cálculo de esfuerzo en los elementos del estudio estático se genera una vez obtenidas las deformaciones, mediante (3), donde σ es la matriz que contiene los esfuerzos de cada elemento, D es la matriz dada por las propiedades del material (Modulo elástico y relación de Poisson), B es la matriz de deformación unitaria y q es el vector de desplazamiento de los nodos de un elemento.

$$\sigma = DBq \quad (3)$$

Una vez obtenidos los resultados de esfuerzo y deformación es importante calcular el factor de seguridad en la estructura del Heliostato. En (4) se muestra la expresión para el cálculo del factor de seguridad, donde σ_{limite} es el esfuerzo límite permisible y σ es el esfuerzo obtenido en los elementos de la estructura. Se busca encontrar una relación mayor a 1 [10].

$$FOS = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma} \quad (4)$$

Para realizar este análisis de forma rápida y precisa, se cuenta con el uso de ingeniería asistida por computadora, o CAE, en donde se hace uso de tecnologías y herramientas de software para realizar evaluaciones como análisis estructural, fatiga y fractura, dinámica y cinemática, predicción de probabilidad de falla o análisis de fiabilidad [11].

2.4 Casos de investigación

Gran cantidad de estudios se han realizado sobre las cargas provocadas por la fuerza del viento y su efecto sobre la los heliostatos. Como ejemplo, tenemos a Zang [12], que analiza la respuesta mecánica de la estructura de los seguidores solares bajo cargas de viento por medio de software de elemento finito, en donde realiza un estudio estático describir la intensidad y rigidez, y uno dinámico para presentar las órdenes de frecuencia natural y modo de vibración. Además, Vázquez [13] establece en su disertación doctoral, una metodología para determinar las corrientes de viento dinámicas y predecir la respuesta de la estructura en condiciones atmosféricas turbulentas.

3 Diseño de la estructura

La estructura se basará en el diseño convencional, el cual consiste en espejos rectangulares denominados facetas, las cuales presentan una dimensión que va desde 1 a 3 metros cuadrados. Estos a su vez, son montados sobre una estructura de soporte principal con áreas de entre 1 hasta los 120 metros cuadrados. Esta estructura, permite el ajuste de la orientación de los espejos a través de tornillos, lo que puede permitir darle al concentrador

una forma parabólica para que la radiación proyectada se ajuste mejor a un mismo punto focal.

Las facetas de estos concentradores, requieren el uso de superficies con alta reflectancia especular, generalmente, se utilizan metales con un buen pulido o metales cubiertos con materiales reflectantes. Los tipos de metales más comunes que se utilizan se tienen aleaciones de plata o de aluminio pulido, los cuales presentan valores de reflectancia de entre 85 hasta un 98% [14].

Para definir la estructura de soporte principal, de una manera que mantenga su forma y funcionamiento, se cuenta con el uso del diseño estructural, en donde se define, modela, prueba y se documenta una propuesta de diseño. Con esto, se obtiene un aprovechamiento eficiente de los materiales y de las técnicas constructivas disponibles, con el fin de lograr un buen comportamiento de la estructura en condiciones normales de funcionamiento y una seguridad contra la ocurrencia de alguna eventualidad. Esta la estructura debe de resistir su propio peso y las fuerzas presentadas por la carga del viento, que lo afectan en gran medida [7].

4 Análisis

El análisis de las estructuras se realizará el método de volumen y elementos finito, el cual, reduce el problema a un número determinado de incógnitas, divide el dominio en elementos e interpola los resultados en los puntos entre cada uno de ellos. Estos puntos son denominados nodos y su densidad en relación al total del modelo, se le denomina malla.[15]. Para realizar este análisis de forma rápida y precisa, se cuenta con el uso de ingeniería asistida por computadora, o CAE, en donde se hace uso de tecnologías y herramientas de software para realizar evaluaciones como análisis estructural, fatiga y fractura, dinámica y cinemática, predicción de probabilidad de falla o análisis de fiabilidad [11].

Con este método, es posible conocer las deformaciones presentadas en la estructura debido a su propio peso y a fuerzas externas, esto depende de las propiedades del material y de las fuerzas presentadas en cada nodo. Además de las deformaciones, también es posible determinar el esfuerzo en los elementos del estudio. Estos dos factores son los que determinan el factor de seguridad de la estructura, que relaciona la capacidad de refuerzo máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido[10].

4.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Para conocer con precisión las fuerzas que actúan sobre un objeto o estructura en particular, se puede hacer uso de la dinámica de fluidos computacional, o CFD por sus siglas en inglés. Este método abarca la simulación de sistemas de ingeniería de fluidos mediante el modelado, formulación de problemas matemáticos físicos, y métodos numéricos, como métodos de discretización, solucionadores, parámetros numéricos y generaciones de cuadrículas, entre otros [16].

De manera general, que la estrategia de la CFD es reemplazar el dominio de problema continuo con un dominio discreto mediante una cuadrícula. Con esta discretización, cada variable de estudio se resuelve solo en los puntos de la cuadrícula y los puntos fuera de esta se determinan por medio de interpolación de los puntos más cercanos.

Para realizar la simulación de las cargas de viento, se debe de seleccionar un dominio alrededor del heliostato que permita delimitar el espacio con el cual se trabaja. Para esto, existen algunas consideraciones y recomendaciones para lograr que el volumen con el cual se trabaja sea el indicado y cumpla con los requerimientos de continuidad. Para definir el volumen de una manera adecuada, es necesario que las líneas de flujo no se compriman cerca de los límites de la región. De igual manera, resalta la importancia de definir correctamente las condiciones de frontera, por las cuales el flujo entra y sale del sistema.

Franke [17] en su manual de lineamientos para simulación CFD, presenta un método para determinar el dominio de control basado en la altura de la estructura a analizar, definiendo como H_n la distancia desde el piso hasta el punto más alto de la estructura. Como límite vertical, se concreta que el punto más alto del dominio debe de estar a una altura de $5H$, por lo tanto, la altura total de la región es de $6H$. En cuanto a la extensión longitudinal, recomendando una distancia de $5H$ frente a la estructura y una de $15H$ después de ella. Para las regiones laterales, se aconseja una distancia de por lo menos $2.3H$ entre la región lateral de la estructura y los límites transversales de la región.

5 Conclusiones

Una de las fuentes de energía renovables más importantes con las que contamos es el sol, por lo tanto, crear tecnologías e investigación para aprovechar esta energía resulta de gran beneficio para humanidad, generando además el impacto económico que podría llegar a generar estabilidad, bienestar y calidad de vida.

Uno de los métodos para aprovechar esta energía son los campos de concentración solar, conformados por una torre receptora y un número de seguidores solares. Para sustentar la inversión en este tipo de proyectos, la estructura de los seguidores debe ser capaz de soportar su propio peso y cargas de viento externo. Además, de mantener su deformación por debajo de un cierto umbral de tal manera que la pérdida del ángulo de aceptación de sus módulos permanezca dentro de límites tolerables. Para predecir con precisión estos efectos, se cuenta con el método de volumen finito y elemento finito y de los sistemas CAE.

Referencias

1. Bose B Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics . IEEE Ind Electron Mag 4:6–17. <https://doi.org/10.1109/MIE.2010.935860> (2010)
2. Alemán-Nava GS, Casiano-Flores VH, Cárdenas-Chávez DL, et al Renewable energy research progress in Mexico: A review . Renew Sustain Energy Rev 32:140–153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004> (2014)
3. Sen Z Solar Energy Fundamentals and Modeling Technique, 1st ed . Springer (2008)
4. Pavlović TM, Radonjić IS, Milosavljević DD, et al Assessment and potential use of concentrating solar power plants in Serbia and Republic of SRPSKA . Therm Sci 16:931–945. <https://doi.org/10.2298/TSCI111027100P> (2012)
5. Luque-Heredia I, Quéméré G, Cervantes R, et al The Sun Tracker in Concentrator Photovoltaics . Next Gener Photovoltaics New Concepts 165:61- (2012)
6. Rosales M Diseño, puesta en operación y evaluación de un heliostato con facetas deformables . UNAM (2016)
7. Piralla RM Diseño Estructural . 596 (2000)
8. Björkman N Heliostat Design . 1–156 (2014)
9. Peterka JA, Derickson Fort Collins, CO (United States). Fluid Dynamics and Diffusion Lab.] RG [Colorado SU Wind load design methods for ground-based heliostats and parabolic dish collectors . United States (1992)
10. Nieblas moroyoqui C, Herrera Jiménez V, García Gutierrez R, Benitez Baltazar V Modelación de la deformación de un heliostato sometido a cargas de viento mediante análisis de elemento y volumen finito (2012)
11. Chnag K-H e-Design, Computer Aided Engineering Design . Elsevier (2015)
12. Zang C, Wang Z, Liu X Design and analysis of a novel heliostat structure . 1st Int Conf Sustain Power Gener Supply, SUPERGEN '09 1–4. <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348182> (2009)
13. Vázquez JF Dynamic Wind Loads on Heliostats Dynamische Windlasten auf Heliostaten (2016)
14. Hernandez M Diseño De Un Microhorno Solar Y Campo De Heliostatos Para Diversas Aplicaciones. (2013)
15. Madenci E, Guven I The finite element method and applications in engineering using ANSYS, 2nd ed . Springer (2015)
16. Zuo W Introduction of computational fluid dynamics . JASS 05 81--1 (2005)
17. Franke J, Hellsten A, Schlünzen H, Carissimo B Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment (2007)