

## Análisis y simulación de cargas de viento en un concentrador solar de canal parabólico mediante la aplicación de software

AZUARA-JIMÉNEZ, Jorge†\*, GARCÍA-DOMÍNGUEZ, Jairo, RAMÍREZ-ROJO, Alexis y DE JESÚS-VEGA, César Omar

*División de Ingeniería en Energías Renovables Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Conocido S/N El Saucillo, Huichapan, Hgo., Méx. 42411*

Recibido 6 de Octubre, 2017; Aceptado 5 de Diciembre, 2017

### Resumen

La aplicación de software de dinámica de fluidos computacionales (CFD) permite realizar simulaciones para calcular las fuerzas e impactos que provocan los fluidos en cualquier elemento, eliminando la complejidad del análisis de flujo y reduciendo la creación de prototipos para pruebas, ya que en ocasiones este proceso suele ser lento y costoso. El objetivo del presente trabajo es analizar y simular cargas de viento en un concentrador solar de canal parabólico (CCP) mediante el uso de dinámica de fluidos computacionales, utilizando el software Solidworks Flow Simulation para determinar las cargas provocadas en el dispositivo por éstas ráfagas. Se realizó la medición de la velocidad del viento en una ubicación geográfica específica, obteniendo valores que oscilan entre 0.2 km/hr y 47 km/hr. Se llevó a cabo el análisis considerando la velocidad máxima originada en esa zona, la cual alcanzó un valor de 47 km/h. Las simulaciones desarrolladas en el software indicaron las trayectorias de flujo del viento normales al área de apertura del CCP, así como las cargas de presión ocasionadas por éstas ráfagas en la superficie del colector.

**Concentrador solar de canal parabólico, dinámica de fluidos computacionales, elemento finito, energía solar, velocidad del viento**

### Abstract

The computational fluid dynamics (CFD) software application allows simulations to calculate the forces and impacts caused by fluids on any element, eliminating the complexity of the flow analysis and reducing the creation of prototypes for testing. Process is often slow and costly. The objective of the present work is to analyze and simulate wind loads in a parabolic trough solar collector (PTC) by using computational fluid dynamics, using Solidworks Flow Simulation software to determine the loads caused in the device by these bursts. The wind velocity was measured in a specific geographical location, obtaining values ranging from 0.2 km/hr to 47 km/hr. The analysis was carried out considering the maximum speed originated in that zone, which raised a value of 47 km/h. The simulations developed in the software indicated the normal wind flow paths to the PTC opening area, as well as the pressure loads caused by these bursts at the collector surface.

**Parabolic trough solar collector, computational fluid dynamics, finite element, solar energy, wind speed**

**Citación:** AZUARA-JIMÉNEZ, Jorge, GARCÍA-DOMÍNGUEZ, Jairo, RAMÍREZ-ROJO, Alexis y DE JESÚS-VEGA, César Omar. Análisis y simulación de cargas de viento en un concentrador solar de canal parabólico mediante la aplicación de software. Revista de Energías Renovables 2017. 1-3:34-42

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jazuara@iteshu.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La utilización de software para realizar simulaciones numéricas es una alternativa importante para simular y evaluar dispositivos de concentración en condiciones de funcionamiento semejantes a la realidad.

Lizardi *et al.* (2016) mencionan que las expresiones matemáticas que describen el comportamiento dinámico del flujo parten de las ecuaciones de Navier- Stokes, en las cuales la no linealidad y el acoplamiento de sus términos hacen que sus soluciones sean complejas, por lo que la simulación numérica ha sido desarrollada ampliamente al paso del tiempo.

Los trabajos desarrollados implementan variedad de software de dinámica de fluidos computacionales (CFD) para determinar las cargas de viento en concentradores de canal parabólico. La consideración de variables climáticas, configuración, orientación y materiales de construcción son parámetros importantes en este tipo de análisis. La CFD es una herramienta valiosa para evaluar el comportamiento de CCPs, reduciendo tiempos, costos y modificaciones de geometría en el análisis. Paetzold *et al.* (2015) afirman que en plantas de concentración de energía solar que están ubicadas en áreas abiertas los CCPs son afectados por el viento tanto a nivel estructural como en rendimiento, teniendo que resistir las fuerzas aerodinámicas causadas por las corrientes de aire. Un CCP consiste en un espejo cilindro-parabólico que refleja la radiación solar directa, concentrándola sobre un tubo receptor, situado sobre la línea focal de la parábola (Duffie y Beckman, 2013).

Las condiciones reales de trabajo de un CCP están relacionadas con las cargas de viento sobre la estructura en términos de resistencia mecánica, un análisis de flujo de viento desempeña un papel importante para su diseño, que puede conducir a una mejor comprensión de la carga aerodinámica alrededor del reflector parabólico. (Hachicha *et al.*, 2014) Zhao *et al.* (2017) utilizaron el software CFD Fluent para simular un concentrador de canal parabólico usando como referencia la presión del viento a una altura de 10 m. Mediante el modelo de mezcla de FLUENT y el método de tiempo de Reynolds simularon la distribución de los coeficientes de presión del viento. Considerando un ángulo de dirección del viento constante y un campo de flujo simétrico obtuvieron resultados que predicen el comportamiento en diferentes ángulos a sotavento y barlovento, así como la variación del aumento de la resistencia y el coeficiente de presión del viento en la simulación. Andre *et al.* (2015) estimaron cargas de viento en colectores solares de canal parabólico mediante métodos de Boltzmann y ecuaciones de Navier-Stokes de Modelado de Elemento Finito (FEM), simulando grandes remolinos y variando la posición de la estructura así como el ángulo de inclinación o paso (pitch angle) del CCP. Los resultados señalan la importancia de variar la velocidad a la entrada y la modificación de éste ángulo en el concentrador. Mier *et al.* (2014) sometieron un CCP a un túnel de viento virtual mediante un estudio de CFD analizando diferentes ángulos de inclinación ( $-30^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $210^\circ$ ), Ver Figura 1.



**Figura 1** Ángulos de inclinación del CCP simulados

Fuente: (Mier *et al.*, 2014)

Los resultados de la comparación de los valores medios cuadráticos (RMS) obtenidos en la simulación CFD con los obtenidos experimentalmente demuestran que existe una diferencia menor al 10% en las cargas de viento en ambos análisis. Christian y Ho (2010) modelaron y simularon un colector cilíndrico parabólico utilizando SolidWorks Simulation en posiciones con ángulos de inclinación de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , para determinar el impacto de las cargas de gravedad en la estructura de soporte y desplazamientos de las facetas de los espejos. Los errores de pendiente de las superficies reflectantes de la cara del espejo se encontraron evaluando desplazamientos angulares de segmentos conectados a los nodos a lo largo de la superficie reflectora. La comparación entre los errores de pendiente de la superficie deformada y no deformada del espejo fue de 2 mrad. Paetzold *et al.* (2015) presentaron en su trabajo un análisis de un CCP mediante el paquete de CFD, ANSYS CFX 15.0, variando la longitud focal de la parábola de tres diferentes geometrías de canal. Los resultados indican que una reducción de la longitud focal crea un aumento en las fuerzas aerodinámicas del canal parabólico, sin embargo se reducen las pérdidas térmicas creando un efecto protector sobre el tubo receptor debido a la convección forzada. Las fuerzas más elevadas se observan a  $0^\circ$  de ángulo de incidencia del viento y ángulos de inclinación positivos mayores de  $15^\circ$ , cuando el lado cóncavo de los colectores hace frente al viento. Bootello *et al.* (2016) propusieron dos tipos de captadores paramétricos simétricos (PmTC) con receptores evacuados circulares compuestos, integrados con un concentrador secundario para reducir cargas de viento.

Compararon mediante CFD ambos colectores con dos CCP comerciales a diferentes ángulos de inclinación en simulaciones 2D y 3D sin contemplar la intensidad de turbulencia del viento. Calcularon campos de velocidades, coeficientes de elevación, momentos, patrones de flujo y valores medios de resistencia aerodinámica. El concentrador PmTC con amortiguador plano muestra el peor desempeño en términos de arrastre y momento con más de 25% de penalización. Identificaron que el estudio de caso 2D muestra peores coeficientes cuando se compara con la simulación 3D. Zou *et al.* (2015) sometieron a un CCP compuesto por 96 pequeños espejos a experimentos en un túnel de viento de capa límite con baja velocidad (0.5 a 20 m/s), ubicado en la Universidad de Hunan. El área de análisis era de 3m con altura de 2.5m. Estudiaron la distribución media del coeficiente y los espectros de potencia de la presión fluctuante del viento. A medida que aumentaba el ángulo de inclinación del colector y el ángulo de incidencia del viento el coeficiente de presión máxima (altas presiones) se movía al borde de la superficie del espejo cuando el ángulo de inclinación es de  $90^\circ$ . Fu *et al.* (2015) desarrollaron un modelo geométrico de un CCP en el software Solidworks y le simularon cargas de viento en el software ANSYS CFX Workbench con dimensión de campo de fluido de 20 m y a una velocidad de 13.8 m/s. Los resultados de la simulación demuestran que la deformación máxima de los espejos reflectantes se reduce alrededor del 4.6% y que el peso del colector se reduce 5.8% con respecto al modelo inicial. Optimizaron la caja de torsión y la viga en voladizo reduciendo la tensión máxima alrededor de un 15.4%. Zemler *et al.* (2013) simulon numéricamente flujo turbulento bidimensional en CCPs mediante ANSYS CFX 13.0 a velocidades de entre 8.9 m/s y 49.2 m/s.

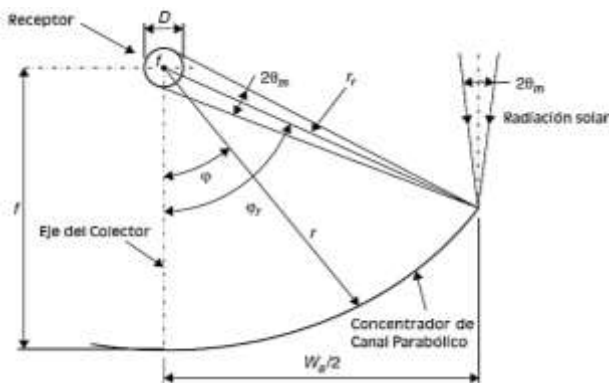
Aplicaron varios tamaños de malla para determinar la fuerza del viento sobre las estructuras. Realizaron una comprobación para validar el modelo numérico comparando la fuerza de arrastre teórica para dos geometrías similares, el porcentaje máximo de diferencia entre las dos geometrías fue del 15%.

El objetivo del presente trabajo es analizar y simular cargas de viento en un CCP para verificar su comportamiento aerodinámico mediante software de dinámica de fluidos computacionales.

Los resultados conseguidos del comportamiento del flujo del viento en el dispositivo son importantes para definir parámetros de diseño en concentradores solares de canal parabólico.

**Diseño del concentrador de canal parabólico**

Se realizó el diseño del CCP con una distancia focal de 0.305 m, y se utilizó como parámetro de entrada un ángulo de borde ( $\phi$ ) de  $90^\circ$ . El ángulo de borde es el ángulo formado por el radio máximo del concentrador parabólico  $r_r$ , con la línea central del colector, ver Figura 2.



**Figura 2** Sección transversal de un Concentrador de Canal Parabólico

Fuente: (Kalogirou, 2009)

Algunas características importantes que se consideraron para el modelado del CCP en SolidWorks se muestran en la Tabla 1:

Base estructural	Perfil tubular rectangular (0.0381 m)
Concentrador (Reflector)	Lámina de aluminio de alta reflectividad (95%)
Tubo Receptor	Tubo de acero inoxidable (0.032 m) y tubo de vidrio evacuado (0.08 m)
Área de apertura	4 m <sup>2</sup>
Longitud	4 m

**Tabla 1** Características para el modelado del CCP en el software

Fuente: Elaboración propia

**Recopilación de velocidades del viento de la zona**

Se obtuvo la base de datos de velocidades máximas del viento de la estación meteorológica perteneciente a la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas del Instituto Nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias (INIFAP), ubicada en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Figura 3.



**Figura 3** Instituto Tecnológico Superior de Huichapan

Fuente: Google Maps, 2016.

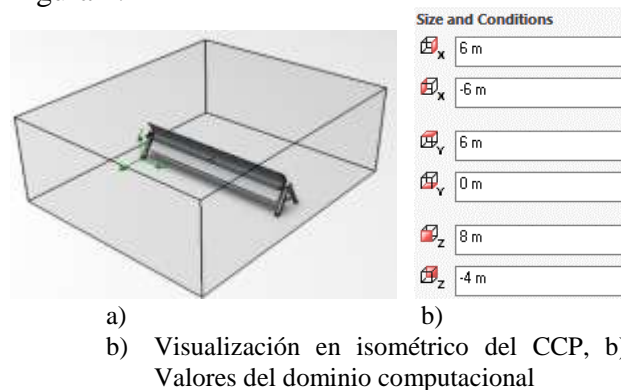
Para conocer la dirección predominante del viento en la zona se utilizó la aplicación Windnavigator, ingresando como parámetro de entrada las coordenadas geográficas del lugar, 20.31869° latitud Norte y 99.70816° de longitud Oeste, así como la altura mínima de 10 m para el análisis.

### Dinámica de fluidos computacionales

Considerando las características y materiales del CCP, así como la velocidad y dirección del viento, se configuró el análisis transitorio externo de CFD en el software Solidworks Flow Simulation 2016. Se utilizó el Sistema Internacional de unidades, con las unidades básicas: metro, kilogramo y segundo, aplicando también la característica física de gravedad ( $-9.81 \text{ m/s}^2$ ), se excluyeron cavidades sin condiciones de flujo, eligiendo al aire como fluido del proyecto con característica de flujo turbulento en el CCP.

Se aplicaron condiciones de la zona: presión de una atmósfera, temperatura promedio de  $16^\circ\text{C}$  y una velocidad máxima de 47 km/h.

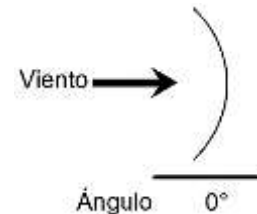
Para obtener un análisis representativo del modelo se creó un dominio computacional 3D de 12m x 12m x 6m, como se observa en la Figura 4.



**Figura 4** Isométrico del CCP en el dominio computacional

Fuente: Elaboración propia

El flujo del viento se simuló alrededor del modelo tridimensional en dirección perpendicular al área de abertura del colector, posicionando al CCP con un ángulo de inclinación de  $0^\circ$ , Figura 5.



**Figura 5** Ángulo de inclinación del CCP

Fuente: Elaboración propia

### Resultados

Considerando los parámetros de diseño de la tabla 1, se realizó el modelado 3D del concentrador en el software Solidworks 2016, con una abertura de canal ( $W_a$ ) de 1 m, una longitud de 4 m y un ángulo de borde de  $90^\circ$ . Mentado *et al.* (2016), analizaron el efecto del ángulo de borde en concentradores de canal parabólico, utilizaron el software Soltrace para evaluar éste parámetro en un CCP y determinaron que con un valor de  $\phi = 90^\circ$  se obtiene un mejor desempeño óptico.

Se editó la configuración de materiales, aplicándolos a cada elemento del CCP: acero inoxidable, acero ASTM A36, aluminio pulido y vidrio, Figura 6.

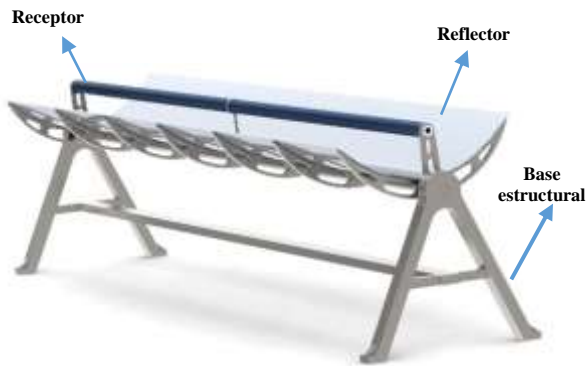


Figura 6 Modelado en 3D del CCP

Fuente: Elaboración propia

Se generó un historial de velocidades máximas del viento de los dos últimos años (2015 y 2016) en El Saucillo, Huichapan, la máxima registrada se produjo en el mes de agosto de 2015 con un valor de aproximadamente 47 km/h (INIFAP, 2016), la cual se utilizará para la simulación del CCP, Gráfico 1.

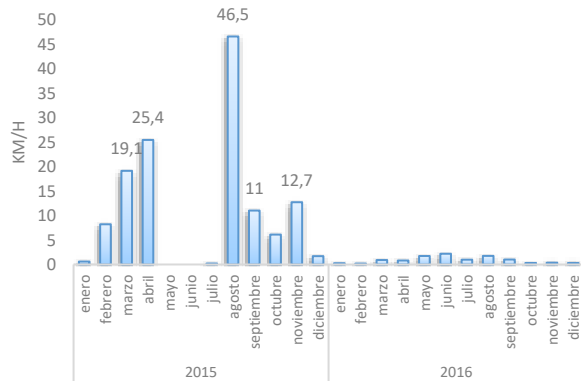


Gráfico 1 Historial de velocidades máximas del viento en El Saucillo, Huichapan. Hgo.

Fuente: Elaboración propia

De la aplicación Windnavigator se consiguieron datos característicos del lugar, como la elevación: 2168.8 m y densidad del aire: 0.947 kg/m<sup>3</sup>.

El informe del sitio permitió obtener la rosa de vientos dividida en 16 sectores, mostrando las direcciones predominantes del viento ENE (Este-Noreste) comprendidos desde 56.25° hasta 78.75° para orientar el CCP, Figura 7.

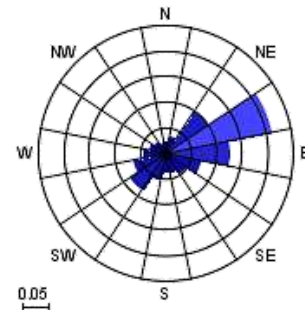


Figura 7 Rosa de vientos en El Saucillo, Huichapan, Hgo.

Fuente: AWS TRUEPOWER, Windnavigator. Recuperado el 06 de febrero de 2017 de: <https://dashboards.awstruepower.com/wsa>

Utilizando la configuración de la simulación, la posición del CCP y la velocidad del viento como parámetro de entrada, fue posible resolver el modelado numérico mediante CFD de Flow Simulation.

Se realizó la discretización considerando la configuración del CCP, se definió la malla como se muestra en la figura 8.

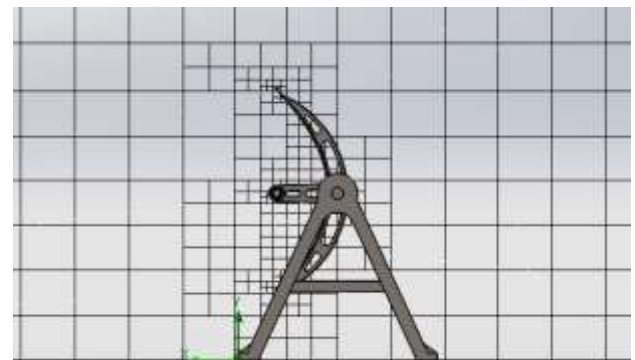
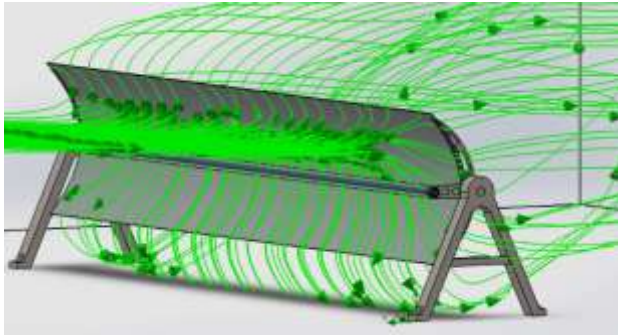


Figura 8 Creación de la malla para la solución numérica

Fuente: Elaboración propia

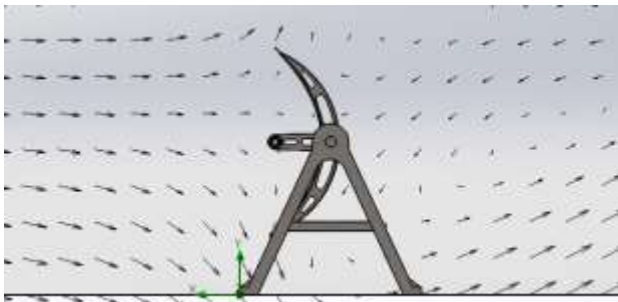
En la figura 9 se muestran los vectores de flujo del viento alrededor del CCP al ejecutar la simulación.



**Figura 9** Simulación del fluido alrededor del CCP

Fuente: Elaboración propia

En la figura 10 se visualiza la distribución del viento en el concentrador mediante vectores dirigidos.



**Figura 10** Distribución de velocidad en el CCP

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis de los puntos de mayor presión en el CCP, Figura 11. La ubicación de las cinco mayores presiones se muestra en la tabla 2.



**Figura 11** Ubicación de puntos de mayor presión en el CCP

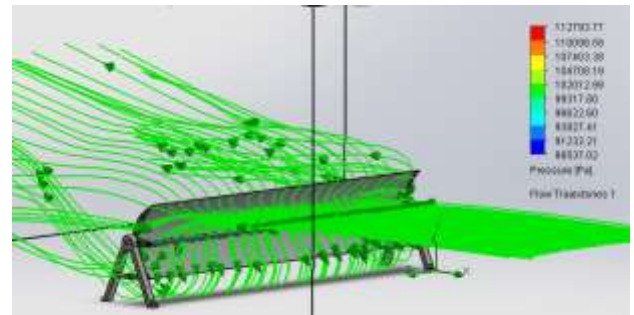
Fuente: Elaboración propia

X (m)	Y (m)	Z (m)	Presión (Pa)
-0.451	0.913	1.773	101416.68
-0.451	0.916	1.212	101415.69
-0.455	0.880	3.730	101416.65
-0.455	0.874	3.169	101417.26

**Tabla 2** Ubicación y valores de mayor presión en el CCP

Fuente: Elaboración propia

El valor de la fuerza que se encontró en la simulación fue de 422.23 N y la presión promedio de 101.409 kPa, Figura 12.



**Figura 12** Niveles de presión en la superficie reflectora

Fuente: Elaboración propia

## Discusión

De acuerdo con la figura 10 y 11, la distribución del viento se disipa a la entrada del CCP generando cargas de viento en la superficie de la lámina reflectora, incidiendo al concentrador a una velocidad de análisis máxima.

En la figura 11 se visualizan las presiones a las que se somete el concentrador debido a las cargas y velocidades del viento simuladas. La visualización y análisis de lo que ocurre en la superficie reflectora del concentrador puede ser útil para establecer si la estructura del dispositivo soporta estas cargas, considerando realizar este análisis en futuros trabajos y optimizar así el diseño.

Para la simulación se consideraron parámetros computacionales de entrada que son importantes en el análisis, Bendjebbas *et al.* (2016), mencionan que CFD es una herramienta poderosa para simular las condiciones de viento, lo que lo hace una herramienta accesible que considera la mayor parte de variables computacionales en un corto tiempo, comparado con el método experimental de túnel de viento que tarda días o semanas en el mismo análisis.

## Conclusiones

Los resultados de éste trabajo muestran cómo se comporta y distribuye el viento en el concentrador de canal parabólico considerando los materiales de cada elemento, así como su orientación e inclinación, utilizando una herramienta computacional que minimiza el esfuerzo y los costos de análisis en una prueba experimental de túnel de viento.

La simulación mediante dinámica de fluidos computacionales permitió identificar las cargas de viento a las que se somete el concentrador, logrando soportar una carga de presión máxima originada por el viento de 101.523 kPa y una fuerza normal al plano del reflector de 422.236 N.

Los datos obtenidos permiten ser utilizados en futuros trabajos donde se considere la variación de los ángulos de inclinación del concentrador, así como los ángulos de incidencia del viento. Se considerará en investigaciones posteriores el análisis estructural mediante análisis por elementos finitos (FEA) utilizando los resultados del CFD para calcular los desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes para validar el diseño del CCP y definir si el dispositivo soporta las cargas provocadas por el viento.

Cabe señalar que en este trabajo se simuló un CCP aislado, en aplicaciones prácticas los concentradores se encuentran en filas y grupos por lo que también debe contemplarse.

## Referencias

- Andre, M., Mier-Torrecilla, M., & Wüchner, R. (2015). Numerical simulation of wind loads on a parabolic trough solar collector using lattice Boltzmann and finite element methods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 146, 185-194.
- Bendjebbas, H., Abdellah-ElHadj, A., & Abbas, M. (2016). Full-scale, wind tunnel and CFD analysis methods of wind loads on heliostats: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, 452-472.



- Bootello, J. P. N., Mier-Torrecilla, M., Doblaré, M., & Pérez, M. S. (2016). Aerodynamics of new solar parametric troughs: Two dimensional and three dimensional single module numerical analysis. *Solar Energy*, Vol. 135, 742-749
- Christian, J. M., & Ho, C. K. (2010). Finite element modeling of concentrating solar collectors for evaluation of gravity loads, bending, and optical characterization. *ASME, Paper No. ES2010-90050*.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Fu, W., Yang, M. C., Zhu, Y. Z., & Yang, L. (2015). The wind-structure interaction analysis and optimization of parabolic trough collector. *Energy Procedia*, Vol. 69, 77-83.
- Hachicha, A. A., Rodríguez, I., Lehmkuhl, O., & Oliva, A. (2014). On the CFD&HT of the flow around a parabolic trough solar collector under real working conditions. *Energy Procedia*, Vol. 49, 1379-1390.
- INIFAP. (2016). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Recuperado de: <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones/ConsultaDiarios15Min?Estado=13&Estacion=10099> Consulta: 10 de enero de 2016.
- Kalogirou, S. (2009). "Solar Energy Engineering", Cyprus Univ. Of Technology. Hardbound.
- Lizardi, A., López, R., Terres, H., & Morales, J. (2016). Análisis numérico del flujo asimétrico variando la posición axial del impulsor. *Revista de aplicaciones de ingeniería*, Vol. 3, 59-71.
- Mentado, D., Elizalde, S., Jiménez, D., & Azuara, J. (2016). Simulación de un Concentrador Solar de Canal Parabólico mediante el Software SolTrace. *Revista de Prototipos Tecnológicos*, Vol. 6, 68.
- Mier-Torrecilla, M., Herrera, E., & Doblaré, M. (2014). Numerical calculation of wind loads over solar collectors. *Energy Procedia*, Vol. 49, 163-173.
- Paetzold, J., Cochard, S., Fletcher, D. F., & Vassallo, A. (2015). Wind engineering analysis of parabolic trough collectors to optimise wind loads and heat loss. *Energy Procedia*, Vol. 69, 168-177.
- Zemler, M. K., Bohl, G., Rios, O., & Boetcher, S. K. (2013). Numerical study of wind forces on parabolic solar collectors. *Renewable energy*, Vol. 60, 498-505
- Zhao, M., Zhang, X., Zhang, X., Zou, L., & Kang, X. (2017). Numerical Simulation of Wind Pressure Coefficient and Distribution Trend of the Dust Concentration for Parabolic Trough Solar Collector. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 63, No. (1), p. 012009. IOP Publishing.
- Zou, Q., Li, Z., Wu, H., Kuang, R., & Hui, Y. (2015). Wind pressure distribution on trough concentrator and fluctuating wind pressure characteristics. *Solar Energy*, Vol. 120, 464-478.