



NOMBRE DEL SIMPOSIO O TALLER
IV Conferencia Internacional de Desarrollo Energético Sostenible

Título

Análisis de la carga del viento en un concentrador solar cilindro parabólico mediante el método de los elementos finitos.

Title

Analysis of the wind load in a parabolic trough solar concentrator using the finite element method.

Dr. Yamill S. Campos Pérez¹

¹Centro de Estudios Energéticos y de Tecnologías Ambientales (CEETA). Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba. E--mail: ycampos2525@gmail.com

Resumen:

Debido al aumento del costo de los combustibles fósiles y los efectos ambientales de explotarlos, ha motivado a investigadores y gobiernos a emplear diversas formas de hacer uso de energías renovables. La energía solar es una categoría de energías renovables que se puede aprovechar a través de varias tecnologías, entre las que se destacan el uso de concentradores solares cilíndricos parabólicos. Estos tipos de concentradores solares están sometidos a condiciones climáticas adversas ya que se encuentran ubicados en espacios abiertos y planos, y por lo tanto están expuestos a la combinación de fuertes viento, polvo y tormentas de arenas, que afectan su estructura, su rendimiento, etc. La aplicación del método de los elementos finitos en la dinámica de fluidos computacionales (CFD) permite realizar análisis para determinar las fuerzas e impactos que provocan los fluidos sobre un cuerpo, eliminando la necesidad de realizar análisis mediante la creación de prototipos, incurriendo en gastos de materiales y tiempo. El objetivo del presente trabajo es investigar características aerodinámicas sobre un concentrador solar parabólico (CSP) mediante el uso del método de los elementos finitos a un modelo en dos dimensiones del concentrador utilizando las ecuaciones



Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS). Las simulaciones se realizaron considerando una velocidad del viento igual a 15 m/s y para inclinaciones del concentrador de 0°, 30°, 60° y 90°. Como resultados se obtuvieron las trayectorias de flujo aerodinámico y valores de velocidades.

Abstract:

Due to the increasing cost of fossil fuels and the environmental effects of exploiting them, it has motivated researchers and governments to employ various ways of making use of renewable energy. Solar energy is a category of renewable energy that can be harnessed through various technologies, among which the use of parabolic cylindrical solar concentrators stands out. These types of solar concentrators are subjected to adverse climatic conditions since they are located in open and flat spaces, and therefore they are exposed to the combination of strong wind, dust and sand storms, which affect their structure, their performance, etc. . The application of the finite element method in computational fluid dynamics (CFD) allows analysis to determine the forces and impacts caused by fluids on a body, eliminating the need for analysis through prototyping, incurring costs of materials and time. The objective of this work is to investigate aerodynamic characteristics on a parabolic solar concentrator (CSP) by using the finite element method to a two-dimensional model of the concentrator using the Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations. The simulations were carried out considering a wind speed equal to 15 m/s and for concentrator inclinations of 0°, 30°, 60° and 90°. As results, aerodynamic flow trajectories and speed.

Palabras Clave: Concentrador Solar Cilindro Parabólico; Método de los Elementos Finitos; Energía Solar; Simulación

Keywords: Parabolic Trough Solar Concentrator; Finite Element Method; Solar Energy; Simulation.

1. Introducción

Debido a la crisis energética que existe en la actualidad y los efectos de la contaminación de los combustibles fósiles, ha motivado a un gran número de países



desarrollen y empleen la energía renovable para la generación de electricidad, calentamiento del agua y otras aplicaciones industriales. Sin embargo, el alto costo de la producción de estos tipos de energías en comparación con los combustibles fósiles sigue siendo un motivo de preocupación. Una de las energías potenciales, que será rentable en un futuro próximo es la energía solar.

Para el aprovechamiento de la energía solar o térmica se han desarrollado concentradores o colectores solares. Basado en los métodos de concentración de la energía solar y el diseño de los concentradores, las plantas de energía solar se clasifican en cilindros parabólicos lineales (concentradores solares de canal parabólicos), reflectores Fresnel lineales, receptores de torre central o colectores de plato parabólico, etc. Los concentradores solares de canal parabólicos, CSP, son uno de los mejores y más extendidos, debido a su alta eficiencia en comparación con otros tipos de concentradores [1].

Un CSP consiste en un espejo cilindro parabólico que refleja la radiación solar directa, concentrándola sobre un tubo absorbedor, situado sobre la línea focal de la parábola. En los últimos años, se ha producido un gran crecimiento de estos tipos de concentradores para la producción de energía eléctrica, generación de vapor de agua, obtención de hidrógeno, calentamiento de agua, entre otras aplicaciones.

Los concentradores solares suelen estar ubicados en terreno abierto donde pueden ocurrir fuertes vientos, polvo y tormentas de arenas, las cuales afecta su estabilidad y rendimiento. Por tanto, las cargas de viento y su flujo desempeñan un papel importante para su diseño [1-3]. La deformación de la estructura como resultado de las posibles tensiones son aspectos importantes a tenerse en cuenta durante el diseño. Si los espejos se deforman más que el límite permitido, la eficiencia de los concentradores solares disminuye significativamente.

Para determinar las cargas de viento sobre un concentrador, es necesario conocer los coeficientes de arrastre y sustentación. Para el cálculo de las fuerzas de arrastre y sustentación, se sugiere utilizar métodos estáticos o dinámicos. En el análisis estático, se



asume que la estructura está sometido a una carga máxima del viento. Para el cálculo dinámico, se tiene en cuenta las fluctuaciones de la estructura como consecuencia de los vórtices, ya que estos crean vibraciones. [4]

Se ha realizado investigaciones experimentales sobre el efecto de la fuerza del viento en los CSP usando túneles de vientos [5-10]. A pesar que estos tipos de estudios son más precisos y dan una comprensión realista de los temas bajo investigación, generalmente son costosos y requieren tiempo. Utilizando métodos numéricos se puede reducir el costo y tiempo de análisis en gran medida, permitiendo analizar y evaluar los concentradores solares en condiciones de funcionamiento semejantes a la realidad.

Existen varios trabajos donde se aplican los métodos de los elementos finitos, aplicados a la dinámica de fluidos computacionales (CFD), para determinar las cargas debido a las fuerzas del viento en los concentradores solares parabólicos [2, 11-19]. La CFD es una herramienta valiosa para evaluar el comportamiento de un CSP, reduciendo tiempos, costos, recursos materiales y modificaciones de geometría en el análisis.

Andre et al. [2] estimaron las cargas de viento en concentradores solares parabólicos, mediante el método de Boltzman y ecuaciones de Navier-Stokes, empleando el método de los elementos finitos (FEM). Realizaron el estudio variando la posición de la estructura y el ángulo de inclinación o paso (pitch angle) del CSP.

Mier et al., Paetzold [2, 20, 21] sometieron un CSP a un túnel de viento virtual mediante un estudio de CFD analizaron diferentes ángulos de inclinación (-30° , 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° y 210°). Christian y Ho [2] modelaron y simularon un concentrador cilíndrico parabólico en posiciones con ángulos de inclinación de 0° y 90° , para determinar el impacto de las cargas de gravedad en la estructura de soporte y los desplazamientos de los espejos.

Mohmad H. Ahmed [1] estudio el efecto del viento sobre el concentrador solar, desde el punto de vista de presión estática, para diferentes ángulos de la parábola y de inclinación. Concluyendo que el flujo del viento sobre el concentrador es importante



tenerlo en cuenta a la hora de realizar el diseño de la estructura, la forma de los espejos y posición del concentrador.

Bo Gong, et al. [5] realizó un estudio de un campo de concentradores solares de canal parabólico formado una matriz de siete filas y cinco columnas en un túnel de viento y de tormenta de arena, el cual permitió obtener los coeficientes de presión de viento y coeficientes de fuerza en la superficie del concentrador, lo cuales podrán ser usados para el diseño de la estructura y sistema de accionamientos del concentrador solar. Estos estudios fueron realizados para inclinaciones del concentrador que variaron entre -30 grados a 210 grados. Como resultado se concluyó que la fuerza de arrastre bajo la acción de una tormenta de arena es mayor que su valor bajo la acción del viento solamente, entre un 10% y un 12%. A medida que aumenta la tasa de transporte de arena, la fuerza de arrastre será mayor. El estudio se realizó a baja velocidad del viento, 17 m/s, y no se pudo analizar el poder de impacto de las arenas.

Según W. Fu, [2, 22] realizó la simulación de la carga de viento en los espejos reflectores del concentrador solar, así como la interacción viento-estructura del concentrador. Se determinaron los valores de deformación máxima de los espejos. También se definieron las dimensiones de las vigas que forma la estructura, optimizando su diseño. Los resultados de la simulación muestran que la deformación máxima de los espejos reflectantes se reduce en un 4.6% y el peso del concentrador se reduce en un 5.8% en comparación con el modelo inicial.

Andrea Gilioli [17] desarrollo un modelo de elementos finitos para el análisis de un CSP. Se analizaron varias condiciones de carga con vista a evaluar el comportamiento de la estructural. Comparando lo datos experimentales con los resultados numéricos, llegando a la conclusión que el método de los elementos finitos es una herramienta para que los diseñadores evalúen la idoneidad de las modificaciones de diseño, reemplazando y reduciendo la cantidad de pruebas experimentales comúnmente necesarias, reduciendo el tiempo y costos.

N. Hosoya and J.A. Peterka et al. [6] realizaron un estudio donde se midió las presiones locales sobre la superficie frontal y posterior de un concentrador solar en un túnel de viento. El estudio permitió determinar los coeficientes medios de carga de viento para un concentrador de canal parabólico aislado y dentro de un campo formado por varios concentradores.

Duane E. Randall [24] realizaron dos pruebas para determinar la fuerza y momento sobre los concentradores en un túnel de viento para diferentes configuraciones. Fue analizado un solo concentrador aislado y varios concentradores formando un campo de concentradores. Las dos pruebas se realizaron en diferentes entornos de campo de flujo. Los datos indican que las fuerzas y los momentos sobre los concentradores aumentan con la altura de montaje y con la relación de longitud / apertura del canal parabólico.

El objetivo del presente trabajo es simular el comportamiento de variables aerodinámicas sobre un prototipo de concentrador solar de canal parabólico en dos dimensiones, mediante el método de los elementos finitos aplicando la dinámica de fluidos. El estudio consiste en realizar el análisis de la velocidad del viento, flujo del aire y la presión estática del viento sobre la parábola del concentrador, para una velocidad del viento de 15 m/s y ángulos de inclinación del concentrador de 0° , 30° , 60° y 90° . Como resultado se obtienen los contornos de velocidad y líneas de flujo sobre el concentrador para diferentes ángulos de inclinación.

2. Metodología

El modelo geométrico del canal parabólico del concentrador solar fue creado usando la modelación de sólido. En la figura 1 se muestra el modelo tridimensional y dimensiones generales.

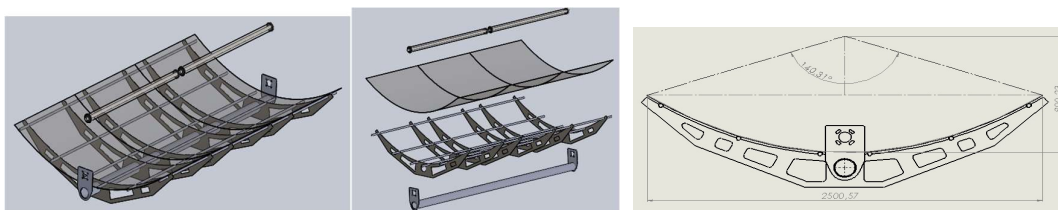


Figura 1. Modelo tridimensional y dimensiones del canal parabólico del concentrador

El concentrador está formado por un tubo de torque, donde en sus extremos son colocadas dos chapas laterales usadas para fijar el canal a la base del concentrador y transmitir la rotación al mismo. Sobre el tubo torsor se colocan 6 nervios unidos por 6 tubos, sobre los cuales se colocan los reflectores. El ángulo de abertura de la parábola es de 140.31° y la distancia focal de 860.23 mm. El ancho de la parábola es de 2500.57 mm y longitud de 3900 mm. A partir del modelo tridimensional, se obtuvo el modelo en dos dimensiones, figura 2, el cual está formado por el tubo absorbedor, la parábola y el tubo torsor.

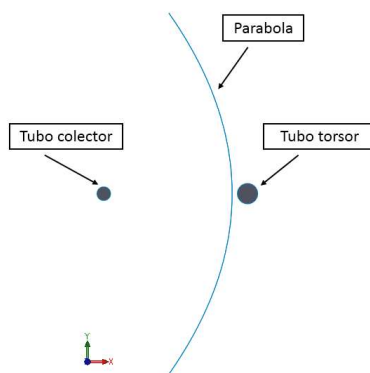


Figura 2. Modelo en dos dimensiones.

El estudio fue realizado para los ángulos de inclinación del concentrador de 0° , 30° , 60° , y 90° , figura 3, y una velocidad constante del viento de 15 m/s (54 km/h) perpendicular al eje de rotación del concentrador.

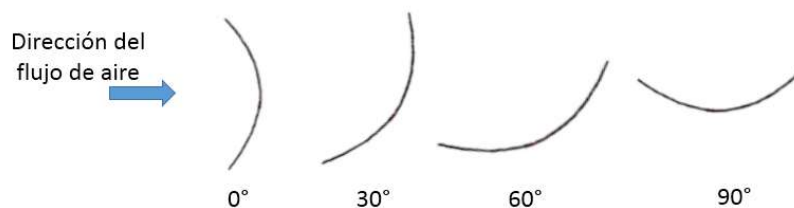


Figura 3. Ángulos de inclinación del canal parabólico.

En la figura 4, se muestra el volumen de control o dominio computacional que envuelve al concentrador. Sus dimensiones se determinaron teniendo en cuenta la apertura del

canal parabólico (D) de 2500 mm [21], y tomando como referencia el centro de rotación del concentrador. La entrada de flujo de aire, se colocó a una distancia tres veces la apertura de la parábola ($3D = 7500$ mm), la salida del flujo del dominio se situó a una distancia de $15D$ (37 500 mm) y la superficie superior a $8D$ (20 000 mm) de la superficie inferior. El centro del concentrador se encuentra a una altura (H) de 2340 mm desde el terreno. El flujo del viento fue asumido uniforme sobre la superficie de estrada del dominio.

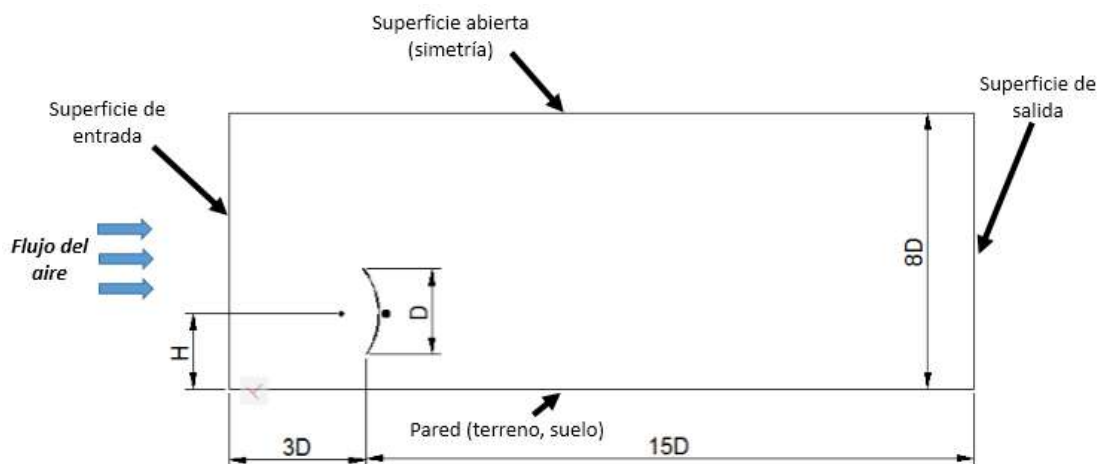


Figura 4. Volumen de control o dominio computacional para la simulación.

Para la simulación se usaron varios tipos de mallas para garantizar resultados precisos. Se empleó un mallado grueso, en la región (R1) del dominio de control formada por elementos de tipo cuadrático. Una segunda, región (R2), de forma rectangular que envuelve al concentrador con una malla más fina, figura 5, con elementos cuadrático. Y una tercera región (R3) de forma circular que encierra todos los elementos del concentrador con una malla más fina, con elementos triangulares. Cerca de la superficie de la parábola, del tubo absorbedor y torsor fue refinada la malla aún más. Finalmente, la malla quedó definida por 212 869 nodos y 261 181 elementos.

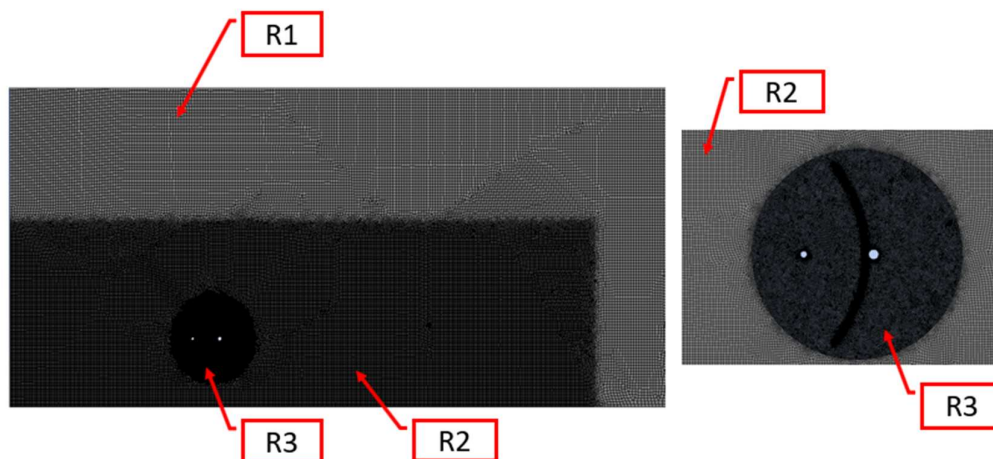


Figura 5. Mallado del dominio de control.

Modelo de turbulencia

Debido a la naturaleza del flujo es necesario especificar un modelo de turbulencia, basado en estudios similares previos se eligió el Acoplamiento SIMPLE de presión-velocidad, ecuación de energía y modelo RNG k-epsilon (2 ecuaciones) [20, 23]. Este modelo se deriva de la ecuación Navier-Stokes utilizando una técnica matemática conocida como método de Re-Normalization Group, de ahí la abreviatura RNG. El modelo RNG es similar en forma a otros modelos k-epsilon y tiene características que lo hacen más preciso y confiable para una clase más amplia de flujos que los modelos k-epsilon estándar y se ha utilizado ampliamente para estudios de flujo de viento [25].

Condiciones de fronteras

El fluido de trabajo es aire, con una densidad de 1.225 Kg/m^3 y una viscosidad constante de $1.789 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$. Las condiciones de fronteras se definieron de la siguiente forma, figura 4:

- Superficie de entrada: Se especificó el valor de la velocidad del viento a la entrada de 15 m/s . También se definió la intensidad de turbulencia de 5% y una razón de viscosidad de 0 .
- Superficie de salida: Se estableció una presión a la salida de 0 Pa (manométrica).
- Superficie abierta: Se estableció una presión sobre la superficie abierta de 0 Pa (manométrica).

- Fronteras sólidas o paredes. como paredes solidas fueron definidas cuatros, la superficie del tubo colector, la superficie de la parábola, la superficie del tubo torsor y el lado inferior del dominio computacional, que representa el terreno. En los cuatros casos se estableció una condición de no deslizamiento.

3. Resultados y discusión

En las figuras 6 y 7 se muestran los valores de velocidades y líneas de flujo para los diferentes ángulos de inclinación del concentrador respectivamente. Para una inclinación de 0° , figura 6a), el flujo es perpendicular al plano de apertura, incidiendo directamente sobre el tubo colector y la superficie cóncava de la parábola.

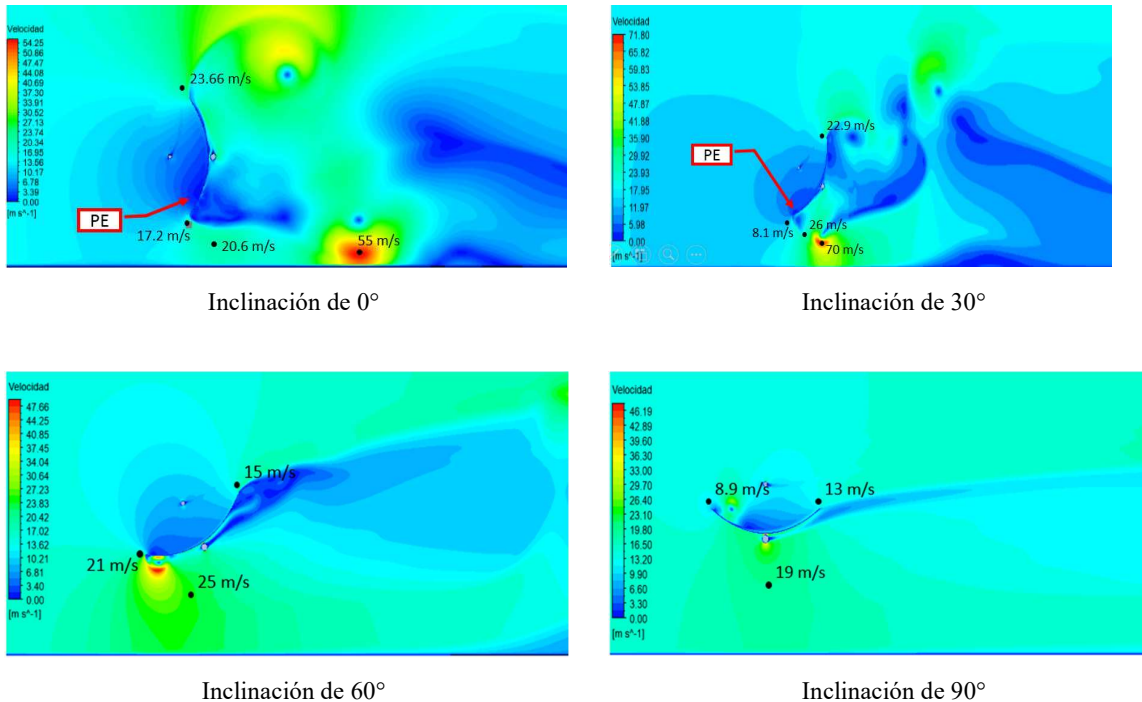


Figura 6. Contornos de velocidades para diferentes ángulos de inclinación.

La velocidad del viento a medida que se acerca a la superficie del concentrador va disminuyendo y se mueve hacia una condición de estancamiento, observándose un punto de estancamiento cerca del extremo inferior de la parábola, punto PE, figura 6a). Sin otro lugar hacia donde desplazarse el viento, es empujado hacia arriba y abajo, figura 7a), saliendo por los extremos de la parábola a una velocidad superior a los 15 m/s . Para la inclinación de 30° , figura 6b), la velocidad tiene un comportamiento muy

similar al caso anterior. En esta posición el punto de estancamiento se desplaza más hacia el extremo y se reduce al área que define la condición de estancamiento, figura 7b). Como resultado la orientación del flujo, en su mayoría, es hacia arriba.

En el caso de la parábola con inclinación de 60° , figura 6c), todo el flujo de aire al tocar la superficie de la parábola asciende, no apreciándose el punto de estancamiento sobre la superficie cóncava, esto se debe a que la inclinación de la parábola se encuentra más alineada a la dirección del flujo del viento. En el caso de la parábola con inclinación de 90° , figura 6d), la parte cóncava queda hacia arriba formándose en dicha cavidad una zona de baja velocidades y la formación de un vórtice cerca del extremo de la parábola por donde incide el viento.

Vorticidad.

Para inclinación de 0° , figura 7a), en la parte posterior de la parábola se generan cuatro vórtices de recirculación, uno de gran diámetro en la parte superior (V1) y otro pequeño en la parte inferior (V2). Los otros dos más alejados de la parábola de pequeñas dimensiones (V3 y V4). Estos vórtices provocan zonas con velocidades del viento variadas detrás de la parábola.

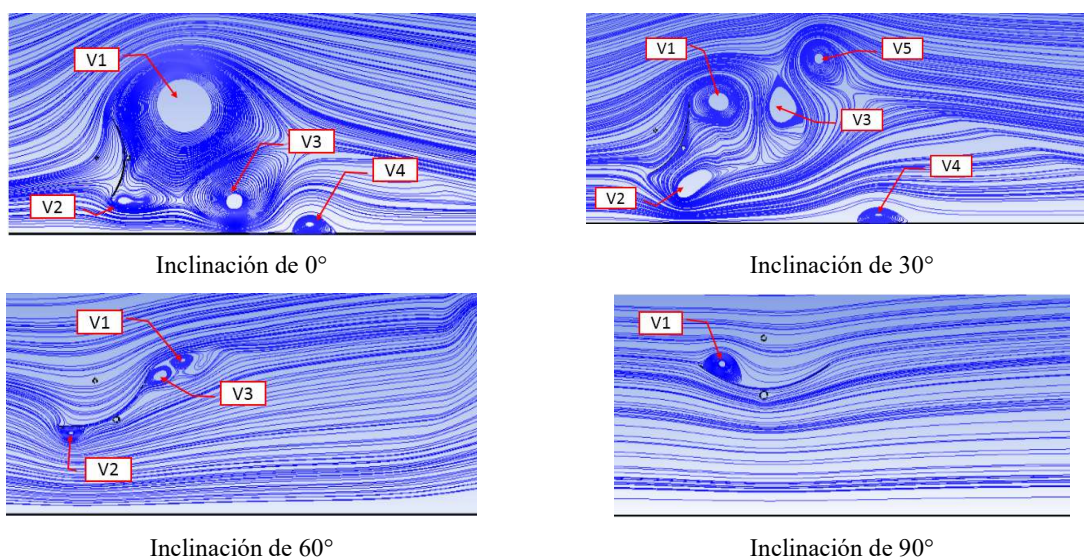


Figura 8. Líneas de flujo y vorticidad para diferentes ángulos de inclinación.



Para inclinación de 30° , se observa un aumento del número de vórtices con respecto a 0° de inclinación. Se forman dos pequeños cerca de la superficie posterior de la parábola (V1 y V2), y otros tres más alejados (V3, V4 y V5), provocando turbulencias detrás de la parábola. Para 60° de inclinación, figura 8c), se reduce el número de vórtices y el tamaño. Uno pequeño en el extremo inferior (V2) y otros dos cerca del extremo superior (V1 y V3). Para 90° de inclinación, figura 7d), se forma un solo vórtice en la cavidad cóncava de la parábola y cerca del extremo por donde incide el viento (V1). La cantidad de vórtices y recirculación del viento detrás del concentrador va disminuyendo a medida que cambia la inclinación del concentrador y se vaya alineando con la dirección del viento. Al igual sucede con la longitud y el tamaño del área de recirculación del viento detrás del concentrador.

4. Conclusiones

Este estudio proporciona una evaluación de los campos de velocidad, presión y la formación de vórtices alrededor de un concentrador de canal parabólico en dos dimensiones. A partir de estos resultados se concluyó que:

- La velocidad del viento a medida que se acerca a la superficie del concentrador va disminuyendo. Se observa un punto de estancamiento cerca del extremo inferior de la parábola, para ángulos de 0° y 30° . Sin otro lugar hacia donde desplazarse el viento, es empujado hacia arriba y abajo, saliendo por los extremos superior e inferior a una velocidad superior a los 15 m/s. Para ángulos de 60° de inclinación, el punto de estancamiento no se aprecia, debido a que la superficie parábola del concentrador se encuentra más alineada con la dirección del viento.
- En el espacio entre la parábola y el terreno se observa un flujo de aire con velocidades superior a los 15 m/s. Para inclinación de 0° , se aprecia una región con altos valores de velocidad alejada del concentrador y a nivel del terreno, a medida que aumenta la inclinación de la parábola se va reduciendo dicha región y acercando al extremo inferior de la parábola. Para una inclinación de 30° , se aprecia un flujo de viento con valores muy superior a los 15 m/s.



- Para los ángulos de inclinación entre de 0° hasta 30° se forman varios vórtices los cuales varia en cantidad y tamaño. A partir de los 30° de inclinación comienza a reducirse la cantidad de vórtices y el tamaño de los mismos.

De las conclusiones anteriores, es importante señalar que el flujo de aire sobre el concentrador solar es un aspecto importante para diseñar la estructura del concentrador y las posiciones del concentrador con respecto a la dirección del viento, en caso de fuertes vientos y tormentas. Otro elemento importante a estudiar, en trabajos futuros, es el efecto de viento en la generación de las fuerzas y momentos sobre el concentrador.

5. Referencias bibliográficas

- [1] Ahmed MH. "Wind Effect on a Parabolic Trough Concentrator for Medium Size". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2021;v: 8:p.
- [2] Azuara Jiménez J. "Análisis y simulación de cargas de viento en un concentrador solar de canal parabólico mediante la aplicación de software ". Revista de Energías Renovables. 2017;v: 1:p: 34-42.
- [3] Baniamerian Z. "A numerical investigation on aerodynamic coefficients of solar troughs considering terrain effects and vortex shedding". International Journal of Engineering. 2015;v: 28:p: 8.
- [4] Geurts CPW. "Wind loads on solar energy roofs". HERON 2007;v: 52:p.
- [5] Bo Gong ZW, Zeyu Wei. Design Wind and Sandstorm Loads on Trough Collectors in Fields AIP Conference Proceedings 1850, 020009 (2017): Published by AIP Publishing. 978-0-7354-1522-5; 2017.
- [6] Peterka NHaJA. Wind Tunnel Tests of Parabolic Trough Solar Collectors. 2008.
- [7] Peterka JA, Tan, L., Bienkiewicz, B. and Cermak, J. Mean and peak wind load reduction on heliostats. 1987.
- [8] Peterka JA, Tan, Z., Bienkiewicz, B. and Cermak, J. Wind loads on heliostats and parabolic dish collectors. 1988.
- [9] Jinny Rhee CN, Michael Grace, Aung Thu. "An effective, low-cost mechanism for direct drag force measurement on solar concentrators". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2011;v: 99:p: 4.



- [10] Pfahl A, Buselmeier, M. and Zashke, M . "Wind loads on heliostats and photovoltaic trackers of various aspect ratios". Solar Energy. 2011;v: 85:p: 16.
- [11] Yellapantula S. Aerodynamic analysis of wind loading on parabolic trough collectors using highfidelity CFD modeling. AIP Conference Proceedings 2445, 0300232022.
- [12] Bootello JPN. "Aerodynamics of new solar parametric troughs: Two dimensional and three dimensional single module numerical analysis". Solar Energy. 2016;v:p.
- [13] Naeeni N. "Analys is of wind flow around a parabolic collector (1) fluid flow". Renewable Energy. 2007;v: 32:p: 1898 – 916.
- [14] Bitsuamlak GT. "Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD ". The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) 2010;v:p.
- [15] Sartori FT. FEA study of innovative solutions for parabolic trough collector design. AIP Conference Proceedings 2126 , 1200212019.
- [16] Christian JM. Finite element modeling of concentrating solar collectors for evaluation of gravity loads, bending and optical characterization. 4th International Conference on Energy Sustainability ES2010 Phoenix, Arizona, USA 2010.
- [17] Gilioli A. "Finite Element Modelling of a Parabolic Trough Collector for Concentrated Solar Power". Energies 2021. 2021;v: 14:p.
- [18] Christo FC. "Numerical modelling of wind and dust patterns around a full-scale paraboloidal solar dish". Renewable Energy. 2012;v: 39:p: 10.
- [19] Dundage M. "Numerical Modelling of Wind Patterns around a Solar Parabolic Trough Collector". International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2013;v: 3:p: 5.
- [20] Zhang L. Numerical study and optimization of mirror gap effect on wind load on parabolic trough solar collectors International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014 Energy Procedia 69; 2015. p. 233 – 41
- [21] Paetzold J. Wind engineering analysis of parabolic trough collectors to optimise wind loads and heat loss. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014: Energy Procedia 69 2015. p. 168-77.



- [22] Fu W. The wind-structure interaction analysis and optimization of parabolic trough collector International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014 Published by Elsevier Ltd. ; 2015. p. 77 – 83
- [23] Shojaei SMN. "Numerical Investigation of Wind Flow around a Cylindrical Trough Solar Collector". Journal of Power and Energy Engineering. 2015;v: 3:p: 10.
- [24] Randall DE. "Steady-State Wind Loading on Parabolic-Trough Solar Collectors ". 1980;v:p.
- [25] Naeeni N. "Analysis of wind flow around a parabolic collector (2) heat transfer from receiver tube". Renewable Energy 32 (2007) 1259–1272. 2007;v: 32:p: 13.