



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

---

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
Y METALURGIA

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS  
CARGAS DEL VIENTO SOBRE LOS  
ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE  
UN HELIOSTATO DE UNA FACETA  
UTILIZANDO DINÁMICA DE  
FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Tesis

Para obtener el título de:

**INGENIERO EN ENERGÍAS  
RENOVABLES**

Presentan

**HINOJOSA TRUJILLO MARÍA ELIZABETH  
PADILLA GUCHO EMILIANO**

**DIRECTOR: Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox**

**Hermosillo, Sonora**

**Junio 2023**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

---

---

**VOTOS APROBATORIOS DEL JURADO**

---

---

## DEDICATORIA

*De María Elizabeth Hinojosa Trujillo*

*A mi mamá, quien, aunque no está presente para presenciar este logro, sigue siendo una inspiración para mí cada día, dándome fuerza para seguir mejorando.*

*Con mucho cariño a mi papá, quien me ha apoyado de todas las formas posibles, por su amor, dedicación y esfuerzo, ha sido mi mayor motivación para lograr mis metas.*

*A mis hermanos, Diana, Laura y Luis por estar conmigo en cada etapa de mi vida, protegiéndome, brindándome cariño y consejo.*

*A toda mi familia que me ha apoyado con amor durante mi vida y que me impulsaron a convertirme en la persona que soy ahora.*

*A mis amigos, por darme su amistad y me dieron ayuda cuando la necesitara.*

*A todos los que estuvieron junto a mi durante estos años académicos y en su desenlace, .*

*De Emiliano Padilla Gucho*

*Dedico con todo mi corazón este logro a mis padres, pues sin ellos no lo habría logrado. Su trabajo y esfuerzos diarios a lo largo de mi vida me han protegido y me han ayudado a formar a la persona que soy ahora.*

*A mi mamá, la cual siempre ha creído en mí y quien con su amor me ha impulsado en todo momento rebasando todas mis dudas. A mi papá, quien con todos los esfuerzos que ha hecho por mí y su amor me ha motivado a cumplir todas mis metas. Por eso y más les doy mi trabajo como ofrenda, los amo.*

*A mis hermanos Arleth y Martín que siempre han visto por mí, me han dado apoyo y cariño a lo largo de los años.*

*Por último, a mis amigos que me han acompañado estos últimos años, con los que he compartido muchas experiencias que me han impulsado como persona y me han apoyado en mi trayectoria académica.*

---

---



---

---

## AGRADECIMIENTO

*Agradecemos a la Universidad de Sonora que nos recibió como parte de su comunidad y brindarnos los recursos para obtener este título profesional.*

*A todos nuestros profesores por su dedicación y sus enseñanzas, que nos dieron las herramientas y nos guiaron por nuestro camino universitario.*

*Un agradecimiento especial al cDr. Resty Levy Durán Montaña, quién sembró los cimientos de esta investigación y nos ofreció sus conocimientos con paciencia y dedicación.*

*Al Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox por transmitirnos su experiencia, orientación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.*

*También a los miembros del jurado, Dr. Víctor Manuel Maytorena Soria y Dr. Irving Osiris Hernández López, por su dedicación y tiempo al revisar este trabajo.*

*Estamos muy agradecidos con nuestra familia y amigos, quienes sin importar donde se encuentren, siguen brindándonos amor y apoyo.*

*A todos los que hicieron posible el desarrollo y conclusión de este trabajo.*

*¡MUCHAS GRACIAS!*

*-Elizabeth & Emiliano*

## RESUMEN

En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio computacional de las cargas aerodinámicas en un heliostato de una sola faceta para diferentes ángulos de azimut ( $\beta$ ) y elevación ( $\alpha$ ). Se analizaron los coeficientes aerodinámicos generados por el flujo del aire atmosférico en dos heliostatos concentradores con distinta curvatura de canteo esférico.

Mediante el uso de Dinámica de Fluidos Computacional, se planteó un sistema semejante al de un túnel de viento utilizado en estudios experimentales con un heliostato en su interior. Se compararon los resultados obtenidos con los disponibles en la literatura para un heliostato de superficie plana a distintas elevaciones. Se consideró estado estable, número Mach menor al 3% (fluido incompresible) y alta intensidad turbulenta.

Se encontró una disminución en los coeficientes de arrastre y volcamiento conforme el heliostato se orienta de una posición vertical a una horizontal, debido a la disminución en las diferencias de presión en las superficies delantera y trasera del heliostato. Obteniendo los valores máximos de los coeficientes de arrastre y volcamiento en  $\alpha < 15^\circ$ . En  $45^\circ < \alpha < 60^\circ$  se observaron los mayores valores en los coeficientes de sustentación, debido a la separación del flujo en el borde del heliostato cuando éste se coloca en ángulo al flujo, lo que causa el momento de sustentación.

Se compararon los estudios de dos heliostatos concentradores, obteniendo que a mayor curvatura se tiene una disminución de los coeficientes de arrastre y sustentación y un aumento en el momento de volcamiento.

---

---

## ABSTRACT

The present work describes a theoretical study of the aerodynamic loads in a single-facet heliostat in different angles of azimuth ( $\beta$ ) and elevation ( $\alpha$ ). Analyzing the aerodynamic coefficients generated by the atmospheric airflow in two concentrator heliostats with different spherical edging curvatures.

Using Computational Fluid Dynamics, a system like that of a wind tunnel used in experimental studies with a heliostat inside was proposed. Comparing the results with those in the literature for a flat surface heliostat at different elevations. Considering stable state, Mach number less than 3% (incompressible fluid) and high turbulent intensity.

A decrease in the drag and overturning coefficients was found, due to a reduction in the pressure gradients on the front and rear of the heliostat, as it turned from a vertical to a horizontal position. Resulting in maximum drag and overturning coefficients at  $\alpha < 15^\circ$ . At  $45^\circ < \alpha < 60^\circ$  a maximum on the lift force was seen, caused by the flow separation at the edge of the heliostat when at an angle with the flow.

Analyzing velocity and pressure fields, as well as atmospheric air flow lines in the computational domain. Comparing the studies of two concentrator heliostats, we obtained that the higher the curvature there is the decrease in the drag and lift coefficients and the increase in the overturning moment.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| RESUMEN .....   | v   |
| ABSTRACT .....  | vi  |
| LISTA DE FIGURAS.....   | x   |
| LISTA DE TABLAS .....   | xv  |
| NOMENCLATURA .....  | xvi |
| CAPÍTULO 1.....   | 1   |
| INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....  | 1   |
| 1.1. Introducción .....   | 1   |
| 1.2. Justificación .....  | 5   |
| 1.3. Objetivo General .....   | 7   |
| 1.4. Objetivos Específicos.....   | 7   |
| CAPÍTULO 2.....   | 8   |
| ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....  | 8   |
| 2.1. Estudios hidrodinámicos de la capa límite atmosférica .....  | 8   |
| 2.2. Estudios para resolver el comportamiento de no equilibrio de la<br>capa límite atmosférica en el dominio computacional ..... | 10  |
| 2.3. Estudios experimentales sobre cargas aerodinámicas en heliostatos<br>.....   | 11  |
| 2.4. Estudios teóricos sobre cargas aerodinámicas en heliostatos.....   | 12  |
| 2.5. Estudios sobre cargas aerodinámicas en heliostatos<br>concentradores .....   | 13  |
| CAPÍTULO 3.....   | 14  |
| METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN .....   | 14  |
| 3.1. Descripción del problema a estudiar .....  | 14  |
| 3.2. Modelo matemático, consideraciones y condiciones de frontera ....  | 19  |
| 3.2.1. Modelo matemático .....  | 19  |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.2. Consideraciones en un dominio vacío por Durbin y Pettersson-Reif.....                                 | 20        |
| 3.2.3. Acoplamiento de perfiles .....  | 25        |
| 3.2.4. Fuerzas y momentos aerodinámicos.....   | 26        |
| 3.2.5. Transformación del sistema coordenado.....  | 28        |
| 3.2.6. Perfiles de entrada.....  | 30        |
| 3.2.7. Condiciones de frontera .....   | 30        |
| 3.3 Solución numérica.....   | 34        |
| 3.3.1. Metodología numérica.....   | 34        |
| 3.3.2. Metodología computacional .....   | 35        |
| 3.3.3. Propiedades del fluido, constantes y valores de referencia utilizados .....                           | 39        |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>41</b> |
| 4.1. Estudios sobre la capa límite atmosférica .....   | 41        |
| 4.1.1. Estudio sobre la capa límite atmosférica bidimensional .....  | 41        |
| 4.1.2. Estudio sobre la capa límite atmosférica tridimensional .....   | 43        |
| 4.2. Estudios sobre cargas aerodinámicas .....   | 47        |
| 4.2.1. Validación con datos reportados en la literatura.....   | 47        |
| 4.3. Resultados numéricos .....  | 52        |
| 4.3.1. Contornos de velocidad adimensional .....   | 52        |
| 4.3.2. Contornos de presión total adimensional .....   | 59        |
| 4.3.3. Líneas de flujo relativas a la velocidad de referencia .....  | 65        |
| 4.4 Estudio de heliostatos con curvatura de canteo esférico.....   | 68        |
| 4.4.2 Estudios sobre cargas aerodinámicas .....  | 68        |
| 4.4.3. Contornos de velocidad adimensional .....   | 73        |
| 4.4.4. Contornos de presión total adimensional .....   | 80        |
| 4.4.4. Líneas de flujo relativas a la velocidad de referencia .....  | 85        |
| 4.5 Comparación de resultados del heliostato concentrador a mayor distancia focal y el heliostato plano..... | 90        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 5.....</b>  | <b>92</b>  |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>                              | <b>92</b>  |
| <b>CAPÍTULO 6.....</b>  | <b>94</b>  |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>   | <b>94</b>  |
| <b>APÉNDICE. Constancias de presentación en Congreso Nacional. ....</b> | <b>100</b> |

---

---

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Irradiación solar directa mundial (Global Solar Atlas, 2019).....  | 1  |
| <b>Figura 2.</b> Irradiación solar directa en México (SENER, 2017). .....   | 2  |
| <b>Figura 3.</b> Concentrador Solar de Torre Central (IEA, 2014). .....   | 3  |
| <b>Figura 4.</b> Alineación de facetas, vista frontal (Rosales, 2014).....  | 4  |
| <b>Figura 5.</b> Sistema de sujeción y canteo de espejo del helióstato UNISON-TX-H36 (Rosales, 2014).....   | 5  |
| <b>Figura 6.</b> Daños a la estructura de un heliostato por el viento en el CEToC. ....   | 7  |
| <b>Figura 7.</b> Esquema del sistema a estudiar. ....   | 15 |
| <b>Figura 8.</b> Acercamiento del heliostato en el dominio físico.....  | 15 |
| <b>Figura 9.</b> Dimensiones del heliostato. ....   | 16 |
| <b>Figura 10.</b> Sección transversal de heliostatos concentradores. ....   | 17 |
| <b>Figura 11.</b> Vistas a) trasera b) frontal c) perspectiva c) lateral del heliostato a $dfocal=22.50m$ en $\alpha=30^\circ$ .....  | 18 |
| <b>Figura 12.</b> Comparación vista lateral de heliostatos estudiados.....  | 18 |
| <b>Figura 13.</b> Ley de pared para superficies rugosas y suaves en función de la rugosidad en granos de arena ( $ks +$ ) adimensional, Blocken y colaboradores (2007)..... | 26 |
| <b>Figura 14.</b> Representación de las fuerzas y momentos. ....  | 27 |
| <b>Figura 15.</b> Sistema coordenado fijo en el espacio y el utilizado por Peterka (1986).....  | 29 |
| <b>Figura 16.</b> Sistema coordenado fijo en el espacio y el utilizado por Peterka (1986).....  | 30 |
| <b>Figura 17.</b> Condiciones fronteras utilizadas en el presente estudio (vista lateral). .....  | 34 |
| <b>Figura 18.</b> Vista lateral del mallado computacional. ....   | 36 |
| <b>Figura 19.</b> Vista frontal del mallado computacional. ....   | 36 |
| <b>Figura 20.</b> Acercamientos a a) la sección transversal y b) la esquina superior izquierda del heliostato. ....   | 37 |

---

---

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 21.</b> Campo de velocidad adimensional en dominio 2D.....   | 41 |
| <b>Figura 22.</b> Campo de IT en dominio 2D. ....  | 42 |
| <b>Figura 23.</b> Comparación de perfiles de velocidad 2D con Peterka (1986). ....   | 42 |
| <b>Figura 24.</b> Comparación de perfiles de intensidad turbulenta 2D con Peterka (1986).....  | 43 |
| <b>Figura 25.</b> Campo de velocidad adimensional en dominio 3D.....   | 44 |
| <b>Figura 26.</b> Campo de IT en dominio 3D. ....  | 44 |
| <b>Figura 27.</b> Vistas YZ de campos de velocidad (izq.) e intensidad turbulenta (der.) en X=0m.....  | 44 |
| <b>Figura 28.</b> Comparación de perfiles de velocidad 3D con Peterka (1986). ....   | 45 |
| <b>Figura 29.</b> Comparación de perfiles de intensidad turbulenta 3D con Peterka (1986).....  | 45 |
| <b>Figura 30.</b> Comparación de perfiles de velocidad en dominios 2D y 3D. ....   | 46 |
| <b>Figura 31.</b> Comparación de perfiles de intensidad turbulenta en dominios 2D y 3D. ....   | 47 |
| <b>Figura 32.</b> Comparación de coeficientes aerodinámicos obtenidos con el flujo de aire incidente en la cara posterior ( $\beta=0^\circ$ ) contra Peterka (1986).....                           | 48 |
| <b>Figura 33.</b> Comparación de coeficientes aerodinámicos obtenidos con el flujo de aire incidente en la cara frontal ( $\beta=180^\circ$ ) contra Peterka (1986).....                           | 49 |
| <b>Figura 34.</b> Comparación de los coeficientes aerodinámicos obtenidos con el flujo de aire incidente en la cara frontal y en la cara posterior ( $\beta=180^\circ$ vs. $\beta=0^\circ$ ). .... | 50 |
| <b>Figura 35.</b> Flujo de aire en heliostato experimental de Peterka (1987) (izq.) y teórico a $\alpha=45^\circ$ (der.). ....   | 52 |
| <b>Figura 36.</b> Contornos de velocidad $\alpha=0^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.). ....   | 53 |
| <b>Figura 37.</b> Contornos de velocidad $\alpha=15^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....   | 54 |
| <b>Figura 38.</b> Contornos de velocidad $\alpha=30^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....   | 55 |
| <b>Figura 39.</b> Contornos de velocidad $\alpha=45^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....   | 56 |
| <b>Figura 40.</b> Contornos de velocidad $\alpha=60^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....   | 56 |
| <b>Figura 41.</b> Contornos de velocidad $\alpha=75^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....   | 57 |
| <b>Figura 42.</b> Contornos de velocidad $\alpha=80^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....   | 58 |

---



---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 43.</b> Contornos de velocidad $\alpha=84^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                         | 58 |
| <b>Figura 44.</b> Contornos de presión $\alpha=0^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                            | 60 |
| <b>Figura 45.</b> Contornos de presión $\alpha=15^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                           | 60 |
| <b>Figura 46.</b> Contornos de presión $\alpha=30^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                           | 61 |
| <b>Figura 47.</b> Contornos de presión $\alpha=45^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                           | 62 |
| <b>Figura 48.</b> Contornos de presión $\alpha=60^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                           | 62 |
| <b>Figura 49.</b> Contornos de presión $\alpha=75^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                           | 63 |
| <b>Figura 50.</b> Contorno de presión $\alpha=80^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                            | 64 |
| <b>Figura 51.</b> Contornos de presión $\alpha=84^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).....                           | 64 |
| <b>Figura 52.</b> Líneas de flujo con $\alpha=0^\circ$ y $\beta=0^\circ$ .....   | 65 |
| <b>Figura 53.</b> Líneas de flujo con $\alpha=30^\circ$ y $\beta=0^\circ$ .....  | 66 |
| <b>Figura 54.</b> Líneas de flujo con $\alpha=45^\circ$ y $\beta=0^\circ$ .....  | 66 |
| <b>Figura 55.</b> Líneas de flujo con $\alpha=84^\circ$ y $\beta=0^\circ$ .....  | 66 |
| <b>Figura 56.</b> Líneas de flujo con $\alpha=0^\circ$ y $\beta=180^\circ$ .....   | 67 |
| <b>Figura 57.</b> Líneas de flujo con $\alpha=30^\circ$ y $\beta=180^\circ$ .....  | 67 |
| <b>Figura 58.</b> Líneas de flujo con $\alpha=45^\circ$ y $\beta=180^\circ$ .....  | 68 |
| <b>Figura 59.</b> Líneas de flujo con $\alpha=84^\circ$ y $\beta=180^\circ$ .....  | 68 |
| <b>Figura 60.</b> Comparación de los coeficientes aerodinámicos de los heliostatos concentradores en $\beta=0^\circ$ .....                   | 70 |
| <b>Figura 61.</b> Comparación de los coeficientes aerodinámicos de los heliostatos concentradores en $\beta=180^\circ$ .....                 | 70 |
| <b>Figura 62.</b> Comparación de azimuth $\beta=0^\circ$ y $\beta=180^\circ$ en $d_{focal}=22.50$ m.....                                     | 71 |
| <b>Figura 63.</b> Comparación de azimuth $\beta=0^\circ$ y $\beta=180^\circ$ en $d_{focal}=59.52$ m.....                                     | 71 |
| <b>Figura 64.</b> Contornos de velocidad $\alpha=0^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.). ( $d_{focal}=22.50$ m).....  | 74 |
| <b>Figura 65.</b> Contornos de velocidad $\alpha=15^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.). ( $d_{focal}=22.50$ m)..... | 75 |
| <b>Figura 66.</b> Contornos de velocidad $\alpha=30^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.). ( $d_{focal}=22.50$ m)..... | 76 |

---

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 67.</b> Contornos de velocidad $\alpha=45^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).<br>( $d_{focal}=22.50$ m)..... | 77 |
| <b>Figura 68.</b> Contornos de velocidad $\alpha=60^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).<br>( $d_{focal}=22.50$ m)..... | 77 |
| <b>Figura 69.</b> Contornos de velocidad $\alpha=75^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).<br>( $d_{focal}=22.50$ m)..... | 78 |
| <b>Figura 70.</b> Contornos de velocidad $\alpha=80^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.).<br>( $d_{focal}=22.50$ m)..... | 79 |
| <b>Figura 71.</b> Contornos de velocidad $\alpha=84^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....  | 79 |
| <b>Figura 72.</b> Contornos de presión $\alpha=0^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.) ( $d_{focal}=22.50$<br>m).....     | 80 |
| <b>Figura 73.</b> Contornos de presión $\alpha=15^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....    | 81 |
| <b>Figura 74.</b> Contornos de presión $\alpha=30^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....    | 82 |
| <b>Figura 75.</b> Contornos de presión $\alpha=45^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....    | 82 |
| <b>Figura 76.</b> Contornos de presión $\alpha=60^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....    | 83 |
| <b>Figura 77.</b> Contornos de presión $\alpha=75^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....    | 84 |
| <b>Figura 78.</b> Contornos de presión $\alpha=80^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....    | 84 |
| <b>Figura 79.</b> Contornos de presión $\alpha=84^\circ$ en $\beta=0^\circ$ (izq.) y $\beta=180^\circ$ (der.)<br>( $d_{focal}=22.50$ m).....    | 85 |
| <b>Figura 80.</b> Líneas de flujo a $\alpha=0^\circ$ y $\beta=0^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....  | 86 |
| <b>Figura 81.</b> Líneas de flujo a $\alpha=30^\circ$ y $\beta=0^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....   | 86 |

---

---

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 82.</b> Líneas de flujo a $\alpha=45^\circ$ y $\beta=0^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....   | 87 |
| <b>Figura 83.</b> Líneas de flujo a $\alpha=84^\circ$ y $\beta=0^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....   | 87 |
| <b>Figura 84.</b> Líneas de flujo a $\alpha=0^\circ$ y $\beta=180^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....  | 88 |
| <b>Figura 85.</b> Líneas de flujo a $\alpha=30^\circ$ y $\beta=180^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....   | 88 |
| <b>Figura 86.</b> Líneas de flujo a $\alpha=45^\circ$ y $\beta=180^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....   | 89 |
| <b>Figura 87.</b> Líneas de flujo a $\alpha=84^\circ$ y $\beta=180^\circ$ ( $d_{focal}=22.50$ m).....   | 89 |
| <b>Figura 88.</b> Comparación de los coeficientes aerodinámicos del heliostato plano y el heliostato concentrador en $d_{focal}=22.50$ m para $\beta=0^\circ$ . .....   | 90 |
| <b>Figura 89.</b> Comparación de los coeficientes aerodinámicos del heliostato plano y el heliostato concentrador en $d_{focal}=22.50$ m para $\beta=180^\circ$ . ..... | 91 |

---

---

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Valor de $y_0$ para distintos tipos de zonas (Aguilar y Brunet, 2003). .....           | 9  |
| <b>Tabla 2.</b> Medidas de heliostatos concentradores.....   | 17 |
| <b>Tabla 3.</b> Condiciones de frontera en el sistema aerodinámico estudiado. ....                     | 32 |
| <b>Tabla 4.</b> Configuración de Malla 1. ....   | 38 |
| <b>Tabla 5.</b> Configuración de malla 2 y diferencia porcentual con malla 1. ....                     | 38 |
| <b>Tabla 6.</b> Configuración de malla 3 y diferencia porcentual con malla 2. ....                     | 39 |
| <b>Tabla 7.</b> Propiedades del fluido, constantes del modelo turbulento y valores de referencia. .... | 39 |
| <b>Tabla 8.</b> Errores porcentuales absolutos medios (MAPE) de los coeficientes aerodinámicos.....    | 49 |
| <b>Tabla 9.</b> Coeficientes aerodinámicos de $\alpha$ en $\beta = 0^\circ$ . ....                     | 51 |
| <b>Tabla 10.</b> Coeficientes aerodinámicos de $\alpha$ en $\beta = 180^\circ$ . ....                  | 51 |
| <b>Tabla 11.</b> Coeficientes aerodinámicos para $\beta = 0^\circ$ y $d_{focal}=22.50$ m. ....         | 72 |
| <b>Tabla 12.</b> Coeficientes aerodinámicos para $\beta = 0^\circ$ y $d_{focal}=59.52$ m. ....         | 72 |
| <b>Tabla 13.</b> Coeficientes aerodinámicos para $\beta = 180^\circ$ y $d_{focal}=22.50$ m. ....       | 73 |
| <b>Tabla 14.</b> Coeficientes aerodinámicos para $\beta = 180^\circ$ y $d_{focal}=59.52$ m. ....       | 73 |

---

---

## NOMENCLATURA

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $y_0$                 | Altura de rugosidad aerodinámica. (m)  |
| $k_s$                 | Altura de rugosidad aerodinámica en granos de arena. (m)   |
| $k_s^+$               | Altura de rugosidad aerodinámica en granos de arena adimensional. (-)  |
| $y^+$                 | Altura adimensional en las funciones de pared. (-)   |
| $\theta$              | Ángulo de apertura. (°)  |
| $\beta$               | Ángulo de azimut. (°)  |
| $\alpha$              | Ángulo de elevación. (°)   |
| $A$                   | Área. (m <sup>2</sup> )  |
| <i>Drag</i>           | Coefficiente de arrastre. (-)  |
| <i>Lift</i>           | Coefficiente de sustentación. (-)  |
| <i>Overturning</i>    | Coefficiente de volcamiento. (-)   |
| $\bar{u}_i$           | Componentes del vector $U$ , para $i=x, y, z$ . (m·s <sup>-1</sup> )   |
| $C_{\varepsilon 1,2}$ | Constantes de ecuaciones de transporte de disipación turbulenta. (-)   |
| $E$                   | Constante de las funciones de pared $\approx 9.793$ . (-)  |
| $c_s$                 | Constante de Smagorinsky. (-)  |
| $\kappa$              | Constante de Von Kármán. (-)   |
| $c_\mu$               | Constante modelo turbulencia k-. (-)   |
| $x, y, z$             | Coordenadas de un sistema cartesiano fijo en el espacio. Escrito de forma compacta como $x$ , para $i=x, y, z$ (m) |
| $x', y', z'$          | Coordenadas del sistema de referencia utilizado por Peterka (1986). (m)  |

---

---

---

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $\rho$                      | Densidad. ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )   |
| $\varepsilon$               | Disipación de energía cinética turbulenta. ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ )   |
| $d_{focal}$                 | Distancia focal del heliostato al receptor solar. (m)   |
| $k$                         | Energía cinética turbulenta. ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ )   |
| $\tau$                      | Esfuerzo viscoso. ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )  |
| $u, v, w$                   | Forma simplificada de los componentes $u$ , para $i=x, y, z$ . ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )                       |
| $L$                         | Longitud. (m)   |
| $l$                         | Longitud de referencia. (m)   |
| $g$                         | Magnitud del vector aceleración debido a la gravedad $\approx 9.81$ .<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )             |
| $q_{\infty}$                | Presión dinámica del flujo libre  |
| $\bar{p}$                   | Presión media. ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )   |
| $P^{(k)}$                   | Producción de energía cinética turbulenta. ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ )   |
| $r$                         | Radio. (m)  |
| $\eta$                      | Rugosidad de superficie. (-)  |
| $S$                         | Superficie de referencia. ( $\text{m}^2$ )  |
| $\bar{\tau}_{ij}$           | Tensor de esfuerzos viscosos, para $i=x, y, z$ . ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )                                     |
| $\overline{\rho u'_i u'_j}$ | Tensor de esfuerzos de Reynolds, para $i=x, y, z$ . ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )                                  |
| $\vec{X}$                   | Vector posición respecto a un sistema coordenado cartesiano. (m)  |
| $\vec{X}'$                  | Vector de posición respecto al sistema utilizado por Peterka (1986). (m)  |
| $\vec{U}$                   | Vector de velocidad media. ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )   |
| $\vec{F}$                   | Vector fuerza respecto al sistema cartesiano fijo. Con componentes $\vec{F}_i$ , para $i=x, y, z$ . (N)               |
| $\vec{F}'$                  | Vector fuerza respecto al sistema de referencia utilizado por Peterka (1986). Con componentes, para $i=x, y, z$ . (N) |

---

---

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $\vec{M}$                      | Vector Momento respecto al sistema cartesiano fijo. Con componentes $\vec{M}_i$ , para $i=x, y, z$ . (N·m)               |
| $\vec{M}'$                     | Vector Momento respecto al sistema de referencia utilizado por Peterka (1986). Con componentes, para $i=x, y, z$ . (N·m) |
| $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$    | Vectores unitarios del vector posición $\vec{X}$ . (-)   |
| $\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}'$ | Vectores unitarios del sistema de referencia utilizado por Peterka.  |
| $u^+$                          | Velocidad adimensional en las funciones de pared. (-)  |
| $u^*$                          | Velocidad de fricción. ( $m \cdot s^{-1}$ )  |
| $\Gamma^{(k)}$                 | Viscosidad efectiva de la energía cinética turbulenta. ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )                                |
| $\Gamma^{(\varepsilon)}$       | Viscosidad efectiva de la disipación de energía cinética turbulenta. ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )                  |
| $\mu$                          | Viscosidad dinámica. ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )  |
| $\mu_t$                        | Viscosidad turbulenta. ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )  |

---

## Subíndices

|          |  |
|----------|--|
| $p$      | Cantidad medida en el centroide de la primera adyacente al piso. |
| $\infty$ | Cantidad medida en el seno del fluido.                           |
| $w$      | Debido a una superficie rugosa.                                  |
| $LCH$    | Línea central del heliostato $y=0.0654\text{m}$ .                |
| $LCHC$   | Línea central de heliostatos con curvatura $y=0.08\text{m}$ .    |
| $ref$    | Medido a una altura $y=0.167\text{m}$ .                          |
| $ABL$    | Medido a una altura $y=1.13538\text{m}$ .                        |
| $\tau$   | Medido en la zona donde gobiernan las funciones de pared.        |
| $rms$    | Raíz cuadrada media.   |
| $x$      | Respecto al eje $x$ .  |
| $y$      | Respecto al eje $y$ .  |
| $z$      | Respecto al eje $z$ .  |



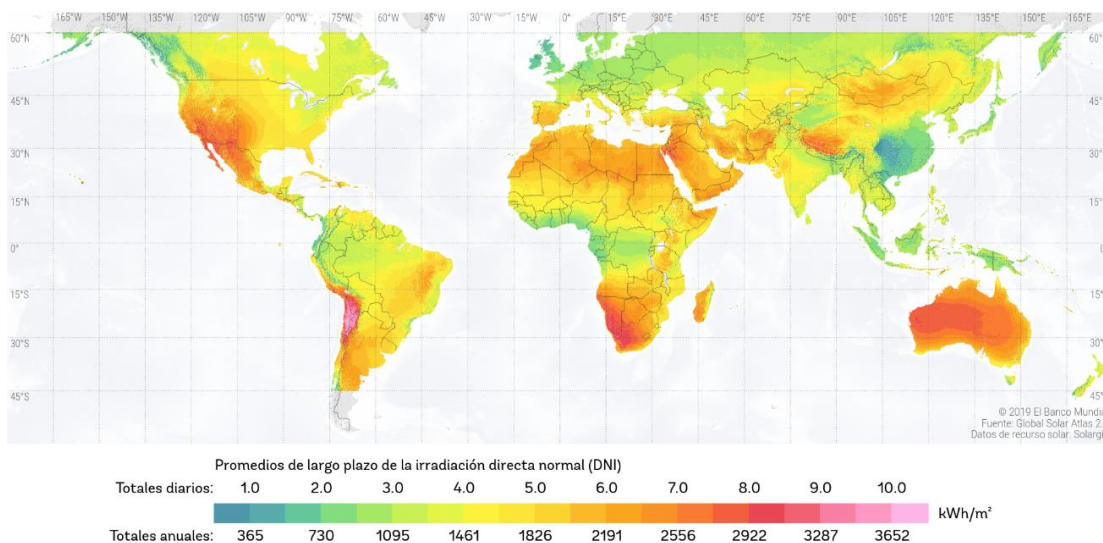
## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

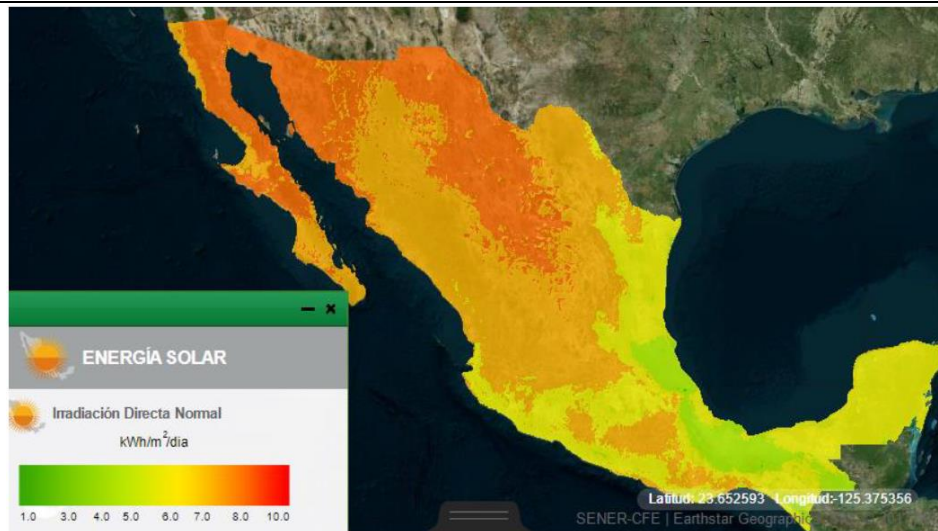
#### 1.1. Introducción

Uno de los objetivos prioritarios de la Secretaría de Energía es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Con el fin de lograr este objetivo, se busca disminuir el uso de hidrocarburos, y a su vez, alcanzar en un 35 por ciento la generación de energía eléctrica proveniente de energías limpias para el año 2024.

La energía solar es la fuente de energía más abundante sobre la tierra, con alrededor de 885 millones de TWh que caen sobre la superficie del planeta cada año (IEA, 2011). México es uno de los países con mayor recurso solar debido a su ubicación geográfica, con una irradiación global media diaria de alrededor de 5.5 kWh/m<sup>2</sup> al día (Figuras 1 y 2), destacando un promedio de 6.2 kWh/m<sup>2</sup> diarios en los territorios de Sonora y Baja California Sur, de acuerdo con González (2019).



**Figura 1.** Irradiación solar directa mundial (Global Solar Atlas, 2019).



**Figura 2.** Irradiación solar directa en México (SENER, 2017).

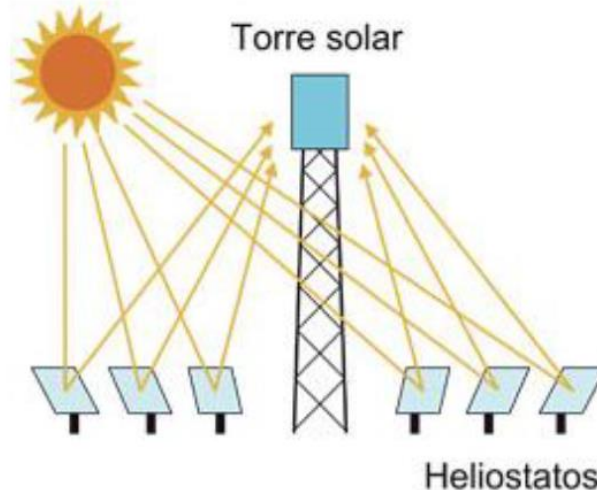
Los sistemas termo solares para generación de calor de proceso se dividen en sistemas sin concentración, en donde se encuentran los captadores planos, de tubos evacuados y de concentración, en donde se ubican los sistemas de concentrador parabólico compuesto, canal parabólico, concentrador tipo Fresnel, receptor de torre central y plato parabólico. La característica más distintiva de estas tecnologías puede ser la temperatura que logran generar. (IMP, 2018)

La energía solar de concentradores de torre central es una de las energías renovables más prometedoras, ya que es capaz de producir energía a gran escala (Hinkley *et al.*, 2013). Además de ofrecer almacenamiento de energía solar térmica y es capaz de integrarse con relativa facilidad a plantas existentes de combustible fósil (Kolb *et al.*, 2011).

Luna (2016) define las plantas o los sistemas termo solares de concentración como un sistema que transforma la radiación solar en energía térmica de alta temperatura y ésta en electricidad o calor. Los Concentradores Solares de Torre Central (Figura 3) están compuestos por un sistema colector concentrador o campo de helióstatos, los cuales cuentan con sistemas de seguimiento solar que

---

redireccionan y concentran la radiación solar sobre un receptor instalado en la parte superior de una torre (Jürgens, *et al.*, 2011).



**Figura 3.** Concentrador Solar de Torre Central (IEA, 2014).

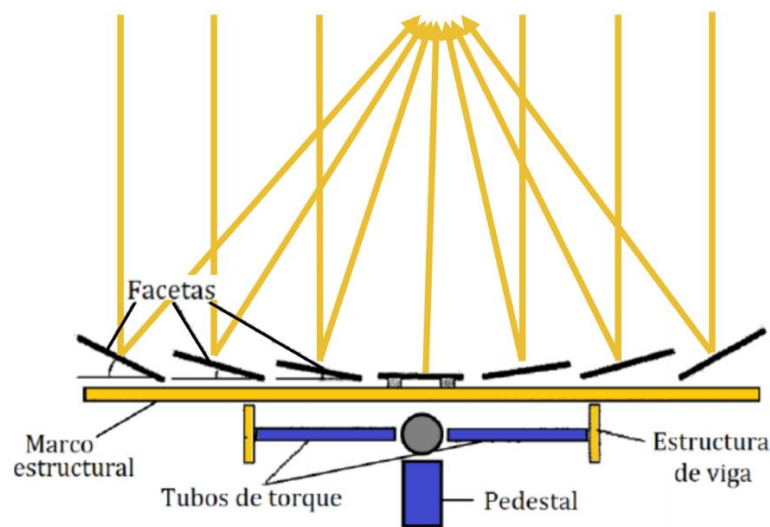
Un helióstato consiste en una superficie reflejante, comúnmente un conjunto de espejos, los cuales están montados en una estructura que sirve de soporte, cuentan con un sistema de seguimiento solar, y un pedestal que lo eleva respecto al suelo.

La fuerza del viento es generalmente medida como la fuerza ejercida por el aire en movimiento. Está influenciada por varios factores, incluidos los gradientes de presión atmosférica, los diferenciales de temperatura y las características geográficas. Mientras que el momento de viento es el efecto de torsión o giro ejercido por el viento sobre un objeto o estructura. Representa la tendencia del viento a provocar un movimiento de giro alrededor de un punto de referencia.

Debido a su localización, los heliostatos suelen estar expuestos a las fuerzas y el momento del viento, estas fuerzas pueden llegar a afectar la estructura del helióstato y el funcionamiento del sistema, por lo que es necesario su cuantificación para diferentes condiciones de operación y diseño.

Existen diferentes tipos de heliostatos, los de una sola faceta o facetas individuales montadas en una estructura (Figura 4). Una faceta es una superficie plana o curva reflectante que se encuentra en el panel del heliostato, está diseñada para reflejar la luz solar de manera precisa hacia un receptor u objeto deseado.

Se le conoce como canteo a la alineación de estas facetas hacia un punto específico. Con el canteo se busca el aumento de la concentración de los rayos solares en el receptor.



**Figura 4.** Alineación de facetas, vista frontal (Rosales, 2014).

Los heliostatos representan aproximadamente el 30% del costo de construcción de las plantas de torre central (IRENA, 2010). Los motores de elevación y azimut, el pedestal, la base y la estructura de soporte del espejo de un heliostato de elevación y azimut convencional representan hasta el 80 % del costo de capital del heliostato (Kolb *et al.*, 2011). Estos costos se pueden reducir de manera más efectiva con una estimación precisa de la carga del viento en un heliostato para mantener la integridad estructural durante los períodos de mucho viento mientras se logra un buen rendimiento óptico durante la operación del campo (Pfahl *et al.*, 2017).

---

## 1.2. Justificación

La Plataforma de Hermosillo (PSH), inicialmente llamado Campo Experimental de Torre Central (CEToC), tiene como propósito la investigación, desarrollo e innovación de tecnología de plantas solares de potencia de torre central. En la instalación se cuenta con 40 helióstatos de 1.5, 2.25, 6 y 36 metros cuadrados para un área reflejante total de 1100 metros cuadrados, una torre central de 32 m de altura, un cuarto de control, laboratorio y oficinas. Actualmente cuenta también con tecnología de concentración de disco parabólico, lineal Fresnel y canal parabólico.

Se han investigado varias tecnologías de heliostatos en el CEToC, los prototipos que involucran curvatura se mencionan a continuación:

- **Helióstato UNISON-TX-H36**

El prototipo UNISON-TX-H36 (Figura 5) cuenta con un área reflejante de aproximadamente 36 m<sup>2</sup> sin espaciamiento entre espejos, en un arreglo de 12 facetas, de 1.5m x 2m de área con 3mm de espesor cada uno. Las facetas contaban con varillas unidas mediante juntas de dilatación de policarbonato transparente resistentes al UV, las cuales tenían como propósito amoldar la curvatura del espejo permitiendo deformarlo con mayor facilidad.



**Figura 5.** Sistema de sujeción y canteo de espejo del helióstato UNISON-TX-H36 (Rosales, 2014).

- **Heliostato UNISON-TX-H36B**

Con este modelo se buscó mejorar el prototipo UNISON-TX-H36, utilizando facetas de menor área 1.2 m de cada lado cada una y con espaciamiento entre éstas para facilitar su canteo.

En Hermosillo se tiene una velocidad media del viento de 11.6 km/h durante los meses más ventosos del año (noviembre a julio). Agosto es el mes con más lluvia, alcanzando un promedio de 82 mm de lluvia. En el año 2016 durante el paso del huracán Newton con categoría 1 se registraron vientos de hasta 124 km/h, así como acumulados de lluvia de hasta 115 mm durante la noche. Se observaron árboles y postes derribados, así como deficiencias en el suministro de energía eléctrica.

Durante el huracán se perdieron 5 heliostatos y otros 3 resultaron dañados debido a las fuertes corrientes de viento presentes en la zona (Figura 6). Esto motivó el estudio del impacto de los efectos aerodinámicos en estas estructuras, especialmente el efecto que presentan las curvaturas de canteo en las fuerzas aerodinámicas, en comparación con heliostatos sin estas curvaturas.





**Figura 6.** Daños a la estructura de un heliostato por el viento en el CEToC.

### 1.3. Objetivo General

Realizar un estudio teórico del efecto de las cargas del viento sobre la estructura de un heliostato concentrador mediante dinámica de fluidos computacional.

### 1.4. Objetivos Específicos

- Realizar un estudio computacional de las cargas del viento sobre la estructura de un heliostato, obteniendo los coeficientes de arrastre, sustentación y volcamiento, mediante dinámica de fluidos computacional.
- Analizar y comparar los resultados teóricos de las cargas del viento sobre la estructura de un heliostato de una faceta y los resultados experimentales de un heliostato de tres facetas encontrados en la literatura.
- Examinar los campos de presión, velocidad y patrón de flujo en un heliostato posicionado a diferentes ángulos de operación.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

#### 2.1. Estudios hidrodinámicos de la capa límite atmosférica

Stewart (1979) define la capa límite atmosférica como la parte de la atmósfera que está fuertemente influenciada por el aire que está en contacto directo con la superficie de la Tierra. Todo el intercambio de cantidad de movimiento, calor y vapor de agua entre la atmósfera y la superficie ocurre a través de la capa límite.

Un parámetro importante en los estudios de capa límite atmosférica es la altura de la rugosidad aerodinámica ( $y_0$ ), la cual es la longitud que describe la pérdida de velocidad del viento debido a los elementos rugosos. En los perfiles de la capa límite atmosférica, la velocidad del viento a nivel del suelo ( $y$ ) tiende a ser cero a medida que se acerca a  $y_0$ . El valor  $y_0$  es particular de la zona a estudiar. La Tabla 1 presenta algunos valores característicos de la longitud aerodinámica para distintos tipos de zonas.



**Tabla 1.** Valor de  $y_0$  para distintos tipos de zonas (Aguilar y Brunet, 2003).

| No. | Nombre Clase   | Longitud aerodinámica (m) | Descripción   |
|-----|----------------|---------------------------|---|
| 1   | Mar            | 0.0002                    | Mar abierto, terrenos planos sin obstáculos.  |
| 2   | Suave          | 0.005                     | Tierra sin obstáculos con vegetación despreciable, pantanos, hielo sin crestas.   |
| 3   | Abierto        | 0.03                      | Pasto plano y abierto, tundra, autopista de aeropuerto.   |
| 4   | Abierto rugoso | 0.10                      | Cultivos bajos o cubiertas vegetales.   |
| 5   | Rugoso         | 0.25                      | Cultivos de altura variada.   |
| 6   | Muy rugoso     | 0.50                      | Tierra intensamente cultivada con grandes granjas, huertos, tierra con arbustos, edificaciones bajas y muy espaciadas con árboles pequeños. |
| 7   | Rozamiento     | 1.0                       | Bosque, áreas con muchos edificios.   |
| 8   | Caótico        | 2.0                       | Elementos muy altos con distribución irregular, centros de ciudades, grandes bosques irregulares con grandes claros.                        |

Richards y Huxley (1993) propusieron perfiles de entrada completamente desarrollados generalmente como condiciones de frontera en términos de la velocidad y turbulencia, dados en forma matemática para una capa límite en equilibrio:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[ \frac{y+y_0}{y_0} \right] \quad (1)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa[y+y_0]} \quad (3)$$

Más tarde, Durbin y Pettersson-Reif (2011) reportaron los perfiles de velocidad y cantidades turbulentas para un flujo de capa límite atmosférica obtenidos de

---

manera analítica, los cuales prueban ser equivalentes a los propuestos por Richards y Huxley (1993).

Blocken *et al.* (2007) propusieron utilizar funciones de pared para simular la rugosidad del suelo y lograr el equilibrio (perfiles completamente desarrollados). Este trabajo también propone el uso de una función definida por el usuario para especificar las condiciones de entrada (perfiles de velocidad y cantidades turbulentas) y la constante de Smagorinsky (típicamente  $C_s \leq 1$ ). Más tarde, Toparlar *et al.* (2019) elaboraron estudios eliminando los gradientes de velocidad y cantidades turbulentas como condición de frontera en la parte superior del dominio.

Crasto (2007) desarrollaron una “relación de acoplamiento” donde es posible acoplar los perfiles de velocidad y magnitudes turbulentas de una capa límite atmosférica en función de la altura y la altura de la rugosidad aerodinámica con los perfiles especificados por la ley de pared:

$$C_s k_s \approx E y_0 \quad (4)$$

## **2.2. Estudios para resolver el comportamiento de no equilibrio de la capa límite atmosférica en el dominio computacional**

Resolver el problema que se presenta al intentar simular la capa límite atmosférica en un dominio computacional es de gran interés, ya que el perfil de energía cinética turbulenta se ve notablemente afectado por la tendencia a evolucionar conforme avanza de los perfiles impuestos a la entrada del dominio.

Yang *et al.* (2009) realizaron simulaciones de una capa límite atmosférica en equilibrio donde plantean perfiles de entrada utilizando el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  estándar y basados en las ecuaciones de Navier-Stokes, como se muestra a continuación:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[ \frac{y+y_0}{y_0} \right] \quad (5)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln \left( \frac{y+y_0}{y_0} \right) + C_2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa(y+y_0)} \sqrt{C_1 \ln \left( \frac{y+y_0}{y_0} \right) + C_2} \quad (7)$$

Richards y Norris (2010) propusieron, en sus estudios computacionales, nuevos perfiles de entrada basados en gradientes de presión, debido a que la condición de frontera de simetría se utiliza usualmente en la parte superior del dominio, el cual no corresponde a un flujo conducido por un esfuerzo cortante libre. Se proponen las expresiones siguientes:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \left( \ln \left( \frac{y}{y_0} \right) + C_{u1} \left( \frac{y}{H} \right) + C_{u2} \left( \frac{y}{H} \right)^2 + C_{u3} \left( \frac{y}{H} \right)^3 + C_{u4} \left( \frac{y}{H} \right)^4 \right) \quad (8)$$

$$k = u^{*2} \left( C_{k1} + C_{k2} \left( 1 - \frac{y}{H} \right)^2 + C_{k3} \left( 1 - \frac{y}{H} \right)^4 + C_{k4} \left( 1 - \frac{y}{H} \right)^6 \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu K^3}{\kappa u^* y} \left( 1 + (1 + C_{u1}) \left( \frac{y}{H} \right) + (1 + C_{u1} + 2C_{u2}) \left( \frac{y}{H} \right)^2 + (1 + C_{u1} + 2C_{u2} + 3C_{u3}) \left( \frac{y}{H} \right)^3 \right) \quad (10)$$

### 2.3. Estudios experimentales sobre cargas aerodinámicas en heliostatos

Experimentalmente, Cemerk *et al.* (1978) utilizaron un túnel de viento y modelos geométricos a escala de 1:22 de dos facetas para el estudio de las cargas aerodinámicas.

$$\frac{u}{u_\infty} = \left[ \frac{y}{y_\infty} \right]^\eta \quad (11)$$

$$IT = \frac{u_{rms}}{u} \quad (12)$$

---

Peterka *et al.* (1986) elaboraron estudios en heliostatos a una escala de 1:60 de tres facetas en un túnel de viento, reportaron perfiles de velocidad con una intensidad turbulenta del 14% y a curvas exponenciales con  $\eta=0.15$ . En Peterka *et al.* (1987) reportaron curvas exponenciales con  $\eta=0.14$  y una intensidad turbulenta del 18% para modelos geométricos a escala de 1:40 de una sola faceta.

Los estudios de Peterka *et al.* (1987) fueron utilizados para validar el estudio computacional de Ghanadi *et al.* (2016) donde analizaron tres elevaciones, 30°, 60° y 90°, para obtener los coeficientes de arrastre picos y medios, utilizando un modelo de turbulencia LES y proponiendo un perfil de entrada exponencial con  $\eta=0.14$ .

#### **2.4. Estudios teóricos sobre cargas aerodinámicas en heliostatos**

Utilizando el perfil propuesto por Richards y Hoxey (1993) y siguiendo los consejos de Blocken *et al.* (2007), Marais *et al.* (2015) redujeron los problemas relacionados con la no homogeneidad de los campos posicionando el área de estudio cerca de la entrada del dominio computacional.

Vishaykanth (2015), en su trabajo teórico sobre la carga aerodinámica en heliostatos, encontró que, al igual que Cermak (1978), no es necesario tener un dominio computacional homogéneo, solo que se conserven las cantidades de momento y la turbulencia en el área de estudio (equilibrio local).

Ghanadi *et al.* (2016) realizaron un estudio computacional sobre las cargas aerodinámicas en heliostatos a escala. Su estudio propuso un perfil de entrada exponencial con  $\eta=0.14$  y utilizaron el modelo de turbulencia LES. Analizaron tres elevaciones diferentes (30°, 60° y 90°) y determinaron los coeficientes de arrastre medios y picos. Validaron su estudio a partir de datos obtenidos

---

experimentalmente por Peterka (1987) y concluyeron que los coeficientes aerodinámicos son muy sensibles a la intensidad de la turbulencia.

### **2.5. Estudios sobre cargas aerodinámicas en heliostatos concentradores**

Se encontraron varios trabajos sobre los impactos del viento en estructuras con curvaturas. Zou *et al.* (2015) obtuvieron los contornos de distribución del coeficiente de presión del viento en condiciones de trabajo de un concentrador de canal parabólico. Concluyeron que el coeficiente medio de presión del viento es mayor en la esquina del concentrador de canal cuando el ángulo de inclinación es de 90, además reportaron que las altas presiones generalmente se concentran alrededor de los bordes del colector.

Peterka y Derickson (1992) estudiaron las cargas del viento promedio y máximas en colectores solares de disco parabólico. Encontraron que, para las cargas frontales, el disco parabólico tiene una variación con las mismas tendencias con la elevación o el ángulo azimutal a como ocurre en los heliostatos planos, pero se reportó que las magnitudes generales se reducían para todo excepto la fuerza de sustentación. La explicación probable propuesta es que la curvatura cóncava hacia arriba genera un área de incidencia del viento cuya contribución al momento debe contrarrestar el momento generado en el borde de ataque del disco.

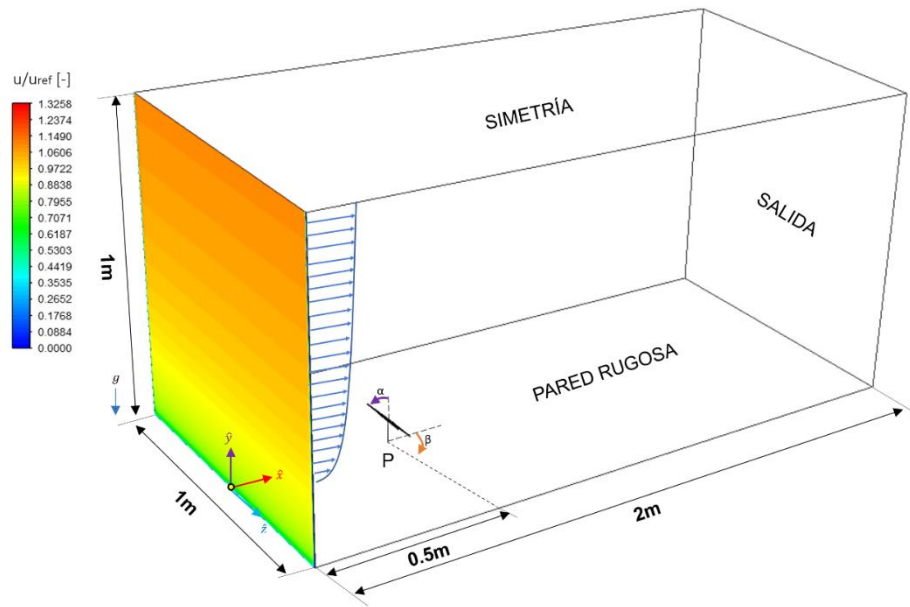
En la revisión de literatura realizada en este estudio no se encontró ningún trabajo que reporte un estudio teórico que analice el efecto del movimiento del viento sobre heliostatos curvos en posiciones de operación.

## CAPÍTULO 3

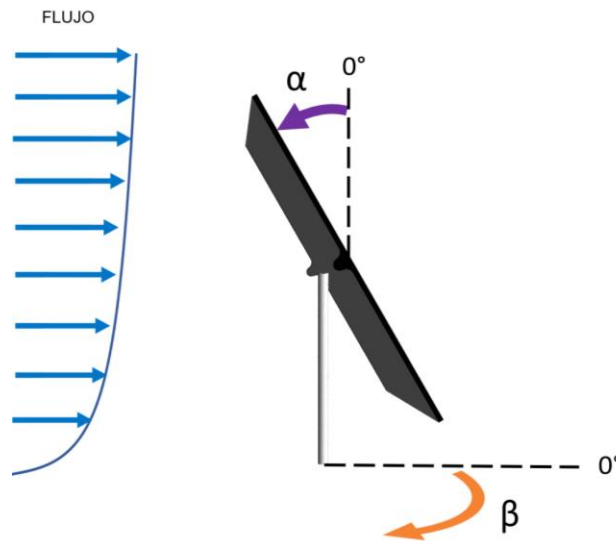
### METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

#### 3.1. Descripción del problema a estudiar

El modelo físico del sistema por estudiar se presenta en la Figura 7, también se puede observar un acercamiento al heliostato en la Figura 8, demostrando los ángulos de azimut ( $\beta$ ) y elevación ( $\alpha$ ). El modelo físico comprende una geometría rectangular de dimensiones:  $\sigma_x= 2m$  y  $\sigma_y= \sigma_z=1m$ . En la geometría se nos muestra ubicado en el punto P (0.5m,0m,0m) un heliostato con escala 1:60. Siguiendo el método implementado por Durán (2020), se ha impuesto una condición de frontera a la entrada del dominio computacional ( $x=0m$ ), está siendo un flujo de aire con características de capa límite atmosférica. Se han modelado tácitamente rugosidades como obstáculos aerodinámicos en el suelo del dominio ( $y = 0m$ ). El aire sale del sistema en  $x=\sigma_x$ . En el caso de los planos restantes de la geometría estos son tratados como paredes lisas, estas no interactúan con el heliostato por el hecho de estar muy alejadas de éste.



**Figura 7.** Esquema del sistema a estudiar.

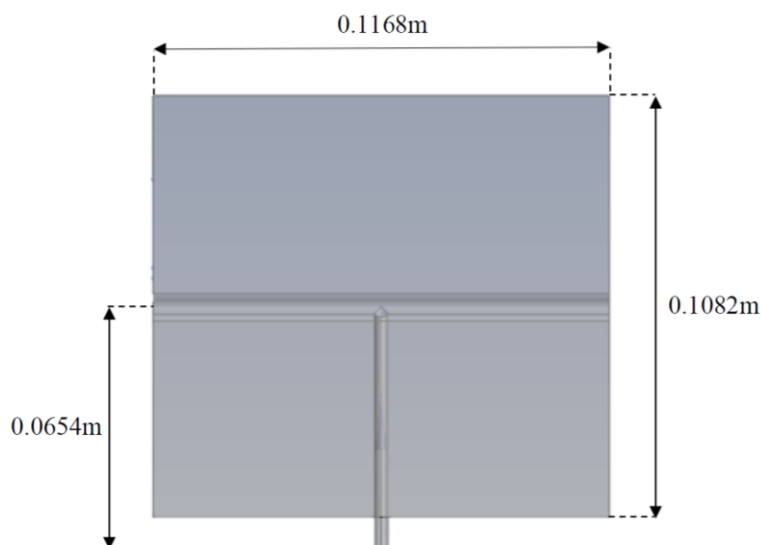


**Figura 8.** Acercamiento del heliostato en el dominio físico.

El análisis se desarrolla en dos etapas, la primera siendo en dominio vacío y la segunda en dominio con heliostato. A fin de asegurar perfiles completamente desarrollados en el sistema el estudio en dominio vacío se lleva a cabo con respecto a las sugerencias propuestas por Blocken *et al.* (2007), así aseguramos

que el aire que repercute sobre el heliostato sea el propuesto como condición frontera en la cara de entrada del sistema. El punto P (posición del heliostato) se debe colocar cerca de la entrada del dominio tal y como sugieren Blocken *et al.* (2007) para evitar problemas relacionados con no homogeneidad en el sistema y a su vez para permitirle a los vórtices generados por el impacto con el heliostato que se desarrollen antes de llegar a la zona de salida. Esta sugerencia se refiere a posicionar el punto P encontrándose cerca de la entrada del dominio.

La segunda etapa del estudio del dominio con heliostato se basa en posicionar un heliostato en el punto P y así generar sus coeficientes aerodinámicos. Extraemos las dimensiones de la sección transversal del dominio y del heliostato a través de los estudios experimentales que generó el estudio de Peterka *et al.* (1987). Se observan las dimensiones del heliostato en la Figura 9.



**Figura 9.** Dimensiones del heliostato.

De igual forma, se estudiaron el efecto de las fuerzas aerodinámicas en heliostatos de una faceta con curvaturas de canteo esférico. En la Figura 10 se observan las características de los heliostatos concentradores y en la Tabla 2 las

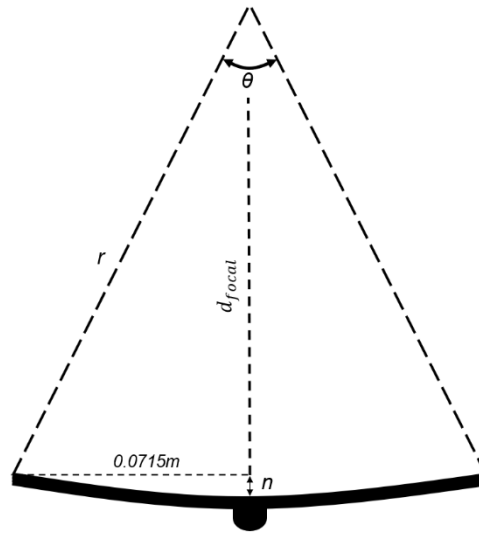


medidas correspondientes, las cuales se obtuvieron a partir de las ecuaciones (13-15)

$$r = d_{focal} + n \quad (13)$$

$$d_{focal} = \sqrt{r^2 - 0.715^2} \quad (14)$$

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{0.715}{d_{focal}}\right) \quad (15)$$



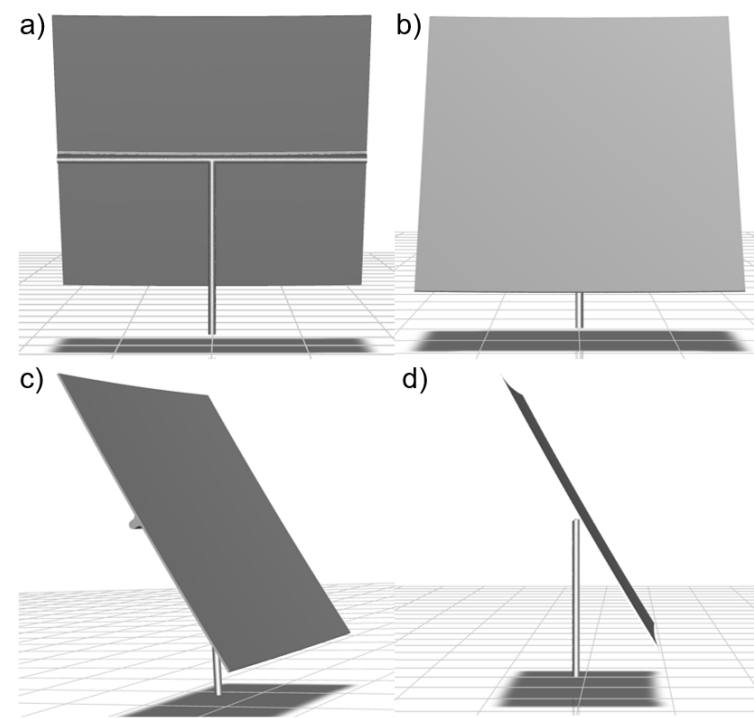
**Figura 10.** Sección transversal de heliostatos concentradores.

**Tabla 2.** Medidas de heliostatos concentradores.

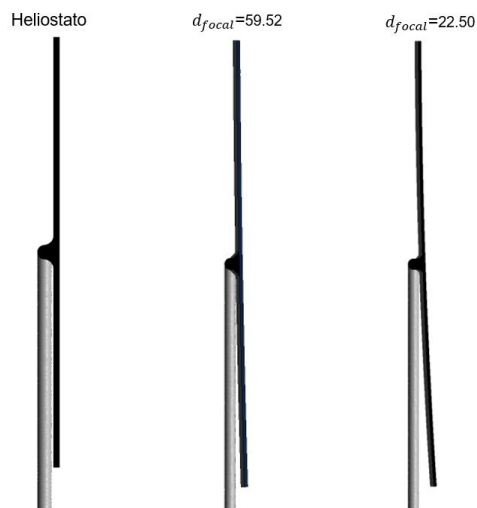
| $d_{focal}$ (m) | $\theta$ (°) | $r$ (m) | $n$ (mm) |
|-----------------|--------------|---------|----------|
| 22.501          | 3.648        | 22.489  | 1.1      |
| 59.522          | 1.376        | 59.518  | 0.4      |

En la Figura 11 se observa el modelo 3D en distintas vistas del heliostato con mayor curvatura. Mientras que en la Figura 12 se realiza una comparación de las

secciones transversales de los tres heliostatos estudiados, donde se puede apreciar la ligera curvatura de los heliostatos concentradores.



**Figura 11.** Vistas a) trasera b) frontal c) perspectiva c) lateral del heliostato a  $d_{focal}=22.50\text{m}$  en  $\alpha=30^\circ$ .



**Figura 12.** Comparación vista lateral de heliostatos estudiados.

## 3.2. Modelo matemático, consideraciones y condiciones de frontera

### 3.2.1. Modelo matemático

Las siguientes consideraciones se tomaron para el modelo matemático:

- Estado estacionario.
- Temperatura constante (288.16 K).
- Número de Mach < 3% (fluido incompresible).
- El heliostato es un objeto rígido (no se deforma).
- Régimen de flujo turbulento. (Re >4000)
- Condición de no deslizamiento en las todas las superficies del dominio.
- Rugosidad implícita en el suelo del dominio.

Se utilizará un modelo de turbulencia de la familia RANS (Reynolds Average Navier Stokes) para describir el flujo en el interior del sistema con el modelo  $k-\varepsilon$  estándar.

Para un fluido de densidad constante, la ecuación de continuidad adquiere la forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \bar{u}_i] = 0 \quad (16)$$

Ecuación de momentum:

$$\frac{\partial [\rho \bar{u}_i]}{\partial t} + \frac{\partial [\rho \bar{u}_i \bar{u}_j]}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}] \quad (17)$$

Ecuación de energía cinética turbulenta ( $k$ ):

$$\frac{\partial [\rho k]}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \bar{u}_j k - \Gamma^{(k)} \frac{\partial k}{\partial x_j}] = \rho [P^{(k)} - \varepsilon] \quad (18)$$

---

Ecuación de disipación de energía cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial[\rho\varepsilon]}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \bar{u}_j \varepsilon - \Gamma^{(\varepsilon)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = \rho [C_{\varepsilon 1} P^{(k)} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon] \frac{\varepsilon}{k} \quad (19)$$

Donde las viscosidades efectivas:

$$\Gamma^{(k)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (20)$$

$$\Gamma^{(\varepsilon)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (21)$$

A partir de los valores de energía cinética turbulenta y disipación de la energía cinética turbulenta, se determina la viscosidad turbulenta  $\mu_t$ :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (22)$$

Se calcula  $C_\mu$  con los valores de la velocidad de fricción del viento y la energía cinética turbulenta:

$$C_{\mu ABL} = \frac{u^{*4}}{k^2} \quad (23)$$

### 3.2.2. Consideraciones en un dominio vacío por Durbin y Petterson-Reif

En el estudio de Durbin y Petterson-Reif (2011) se propusieron consideraciones adicionales a cumplir en el dominio vacío de forma local y global para encontrar una solución analítica a un flujo libre de capa límite atmosférica:

- Flujo unidireccional (solo en dirección  $x$ ).
- Perfiles como función solamente de la altura respecto al suelo.
- Estado estacionario.
- Campo turbulento isotrópico.

- Producción de energía cinética igual a la disipación.

La ecuación de momentum desarrollada en la dirección  $x$ :

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_x}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \rho \bar{u}_x}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial \rho \bar{u}_x}{\partial y} + \bar{u}_z \frac{\partial \rho \bar{u}_x}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [\bar{\tau}_{xx} - \rho \overline{u'_x u'_x}] + \frac{\partial}{\partial y} [\bar{\tau}_{xy} - \rho \overline{u'_x u'_y}] + \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\tau}_{xz} - \rho \overline{u'_x u'_z}] \quad (24)$$

Considerando lo presentado en los puntos 3.2.1 y 3.2.2, la ecuación de momentum se simplifica a lo siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial y} [\bar{\tau}_{xy} - \rho \overline{u'_x u'_y}] = 0 \quad (25)$$

El tensor de esfuerzos viscosos para un fluido de densidad y viscosidad constantes se obtiene por la expresión:

$$\tau_{ij} = \mu \left[ \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \quad (26)$$

El tensor de esfuerzos turbulentos es expresado como:

$$-\overline{u'_i u'_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (27)$$

Desarrollando las ecuaciones (26) y (27) para los componentes  $x, y, z$ .  
Sustituyendo la ecuación (25), obtenemos:

$$\frac{d}{dy} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{d\bar{u}_x}{dy} \right] = 0 \quad (28)$$

Integrando la ecuación (28):

$$[\mu + \mu_t] \frac{d\bar{u}_x}{dy} = \tau_0 \quad (29)$$

Los autores hacen una suposición adicional en el fenómeno proponiendo que  $\mu \ll \mu_t$ , por lo cual (26) se reduce a:

$$\mu_t \frac{d\bar{u}_x}{dy} = \tau_0 \quad (30)$$

La ecuación (30) indica que el esfuerzo cortante que existe en el dominio es provocado básicamente por efectos turbulentos. De (27) obtenemos:

$$-\overline{u'_x u'_y} = \frac{\mu_t}{\rho} \frac{d\bar{u}_x}{dy} \quad (31)$$

La hipótesis de longitud mixta de Prantl es:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{u}'_i}{dx_j} \right| \frac{d\bar{u}'_j}{dx_j} \quad (32)$$

Desarrollando (32) para este caso en particular, da como resultado:

$$-\overline{u'_x u'_y} = l^2 \left| \frac{d\bar{u}_x}{dy} \right| \frac{d\bar{u}_x}{dy} \quad (33)$$

Relacionando las ecuaciones (30), (31), (32) y usando la igualdad  $l = ky$ , obtenemos:

$$\frac{d\bar{u}_x}{dy} = \frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{ky} \quad (34)$$

Al integrar (34) y definir a la velocidad de fricción  $u^* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ , obtenemos el perfil de velocidad:

$$\bar{u}_x = \frac{u^*}{K} \ln \left[ \frac{y}{y_0} \right] \quad (35)$$

Desarrollando la ecuación (17) en el componente  $x$ . Obtenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho k] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho \bar{u}_x k - r^{(k)} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho \bar{u}_y k - r^{(k)} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho \bar{u}_z k - r^{(k)} \frac{\partial k}{\partial z} \right] = \rho [P^{(k)} - \varepsilon] \quad (36)$$

Retomando la suposición de que la producción de energía cinética es la misma que la disipación, obtenemos:

$$p^{(k)} = \varepsilon \quad (37)$$

Alternativamente podemos escribir (19) como:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u'_l u'_j} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{u}'_l}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}'_l}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu + \mu_t}{\rho} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (38)$$

La producción de energía cinética está determinada en el tercer término de esta expresión. Al reescribirlo, obtenemos:

$$p(k) = -\overline{u'_x u'_y} \frac{d\bar{u}_x}{dy} \quad (39)$$

Utilizando las ecuaciones (31), (37) y (39), se obtiene:

$$\varepsilon = \frac{\mu_t}{\rho} \left[ \frac{d\bar{u}_x}{dy} \right]^2 \quad (40)$$

Mediante las ecuaciones (31), (32) y (33) se determina el perfil de disipación de energía cinética turbulenta:

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{ky} \quad (41)$$

Desarrollando (18) en  $x$ . Se obtiene:

$$\frac{\partial[\rho\varepsilon]}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho \overline{u_x} \varepsilon - r^{(\varepsilon)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho \overline{u_y} \varepsilon - r^{(\varepsilon)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho \overline{u_z} \varepsilon - r^{(\varepsilon)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] = \rho [C_{\varepsilon 1} P^{(k)} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon] \frac{\varepsilon}{k} \quad (42)$$

La ecuación se reduce a:

$$\frac{d}{dy} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dy} \right] = \rho [C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}] \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (43)$$

Se introducen las ecuaciones (21) y (41), además de recordar que  $dl/dy = 0$  (consecuente a la condición de producción igualada a la disipación), por último, utilizando el álgebra necesaria, se obtiene la siguiente expresión:

$$y^2 \frac{d}{dy} \left[ y k^2 \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{y} \right) \right] = \frac{[C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}] \sigma_\varepsilon u^{*6}}{C_\mu \kappa^2} \frac{1}{k} \quad (44)$$

Recordando la constante de Von Karmán ( $\kappa$ ):

$$\kappa = \sqrt{[C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}] \sigma_\varepsilon \sqrt{C_\mu}} \quad (45)$$

Resolviendo (44) y sustituyendo (45), obtenemos el perfil de energía cinética turbulenta tras acomodar la ecuación:

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (46)$$

A partir de este punto se refiere a los componentes de la velocidad media en las distintas direcciones ( $\overline{u_x}$ ,  $\overline{u_y}$ ,  $\overline{u_z}$ ), como  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , respectivamente.



El número de disipación turbulenta de Prantl se puede obtener a partir de la ecuación:

$$\sigma_{\varepsilon ABL} = \frac{\kappa^2}{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}) \sqrt{C_{\mu ABL}}} \quad (47)$$

### 3.2.3. Acoplamiento de perfiles

Las siguientes ecuaciones se obtienen de la guía de usuario de ANSYS Fluent:

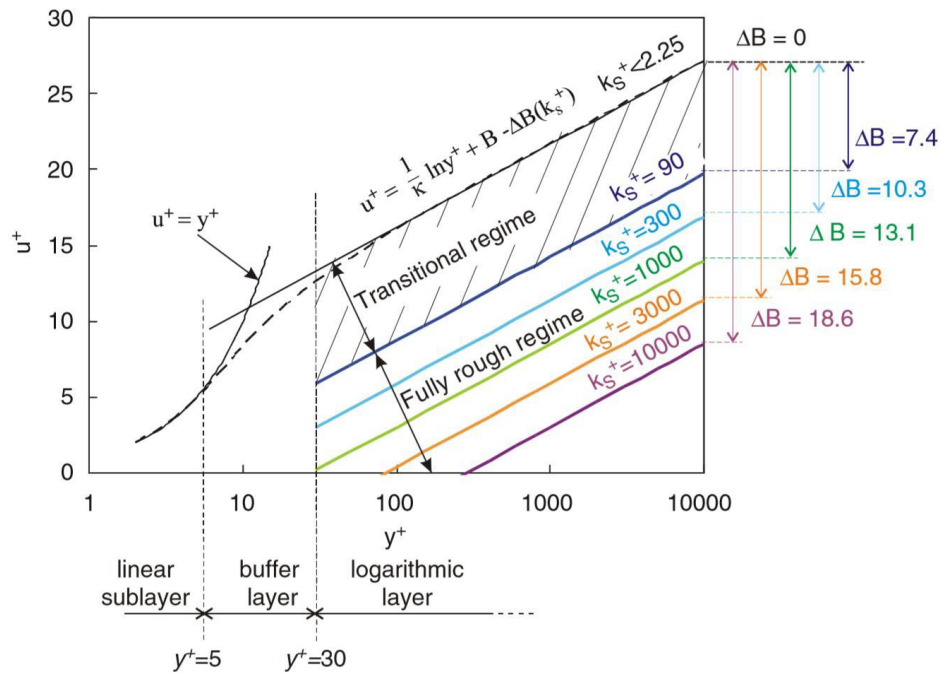
$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad (48)$$

$$u_* = C_{\mu ABL}^{1/4} k^{1/2} \quad (49)$$

$$\tau_w = \rho u_*^2 \quad (50)$$

$$k_s^+ = \frac{\rho u_*^2}{\mu} \quad (51)$$

Cabe mencionar que los valores de  $k_s^+$  se utilizan para poder establecer el comportamiento rugoso de la superficie, como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13.** Ley de pared para superficies rugosas y suaves en función de la rugosidad en granos de arena ( $k_{s+}$ ) adimensional, Blocken y colaboradores (2007).

### 3.2.4. Fuerzas y momentos aerodinámicos

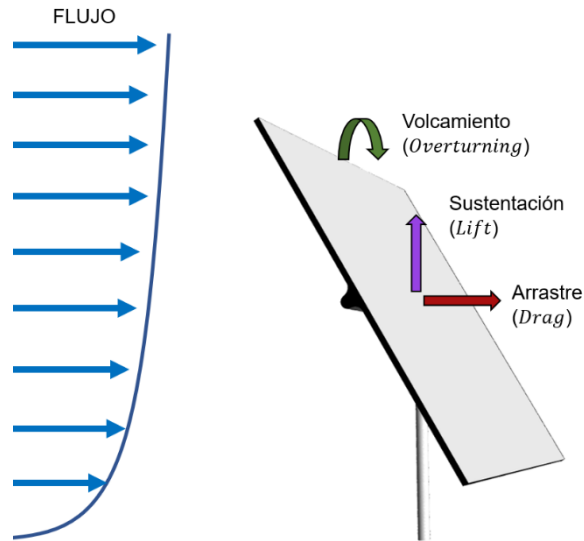
La fuerza de arrastre es una fuerza que se opone al movimiento de un objeto a través de un fluido, como el aire. Resulta de la interacción entre el objeto y el medio en el que se desplaza.

La fuerza de sustentación actúa perpendicularmente a la dirección del flujo de aire cuando un objeto se mueve a través del aire o cualquier otro fluido. Se genera debido a las diferencias de presión entre la parte superior e inferior del objeto en movimiento.

El momento de volcamiento es el que tiende a hacer que un objeto o estructura se vuelque o se caiga debido a la acción de fuerzas externas. Puede surgir

cuando hay una fuerza o carga aplicada en una dirección que crea un momento desestabilizador en relación con el punto de apoyo o el eje de giro de un objeto.

En la Figura 14 se observan las fuerzas y momentos que actúan sobre el heliostato.



**Figura 14.** Representación de las fuerzas y momentos.

Se determinaron matemáticamente los coeficientes de las fuerzas y los momentos (traducidos como los coeficientes de sustentación, arrastre y volcamiento) de la siguiente manera:

$$Drag = \frac{F_{drag}}{\frac{1}{2}\rho A_{ref} u_{ref}^2} \quad (52)$$

$$Lift = \frac{F_{lift}}{\frac{1}{2}\rho A_{ref} u_{ref}^2} \quad (53)$$

$$Overturning = \frac{M_{overturning}}{\frac{1}{2}\rho A_{ref} L_{ref} u_{ref}^2} \quad (54)$$

La presión  $p(s)$  y los esfuerzos cortantes  $\tau(s)$  distribuidos sobre la superficie del cuerpo son las principales causas del momento de volcamiento y las fuerzas de sustentación y arrastre.

$$\vec{F} = \int_s d\vec{F} = \int_s [d\vec{F}]_\tau + \int_s [d\vec{F}]_p \quad (55)$$

De manera adimensional, obtenemos el coeficiente de presión y el coeficiente de fricción superficial:

$$C_p \equiv \frac{p-p_\infty}{q_\infty} \quad (56)$$

$$C_f \equiv \frac{\tau}{q_\infty} \quad (57)$$

### 3.2.5. Transformación del sistema coordenado

En los estudios con los que se compararon los resultados, utilizan un sistema coordenado fijo al heliostato, provocando que ambos giren simultáneamente. Mientras que, el sistema coordenado en el software de dinámica de fluidos computacional se mantiene fijo en el espacio como se muestra en las Figuras 15 y 16. Con estas diferencias en sistemas coordenados, para poder comparar los coeficientes del presente estudio con los reportados en Peterka (1986), es necesario aplicar transformaciones a las fuerzas y momentos medidos sobre la superficie del heliostato, como se muestra a continuación:

$$\vec{F}' = [F_x \cos\beta - F_z \sin\beta] \hat{x}' + [-F_x \sin\beta - F_z \cos\beta] \hat{y}' + [F_y] \hat{z}' \quad (58)$$

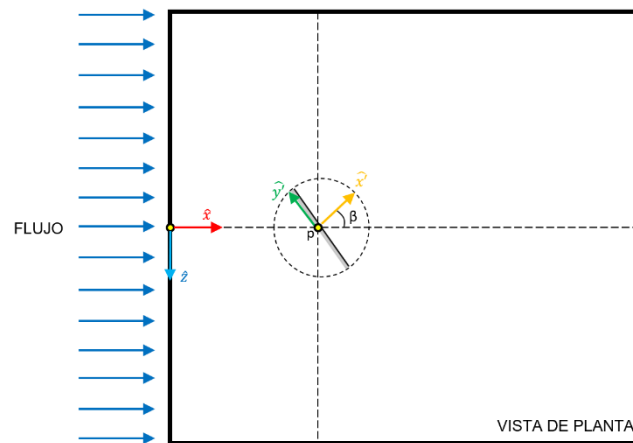
$$\vec{M}' = [M_x \cos\beta - M_z \sin\beta] \hat{x}' + [-M_x \sin\beta - M_z \cos\beta] \hat{y}' + [M_y] \hat{z}' \quad (59)$$

Para obtener los coeficientes aerodinámicos, utilizamos lo mencionado por Anderson (2011) y renombrando así tenemos:

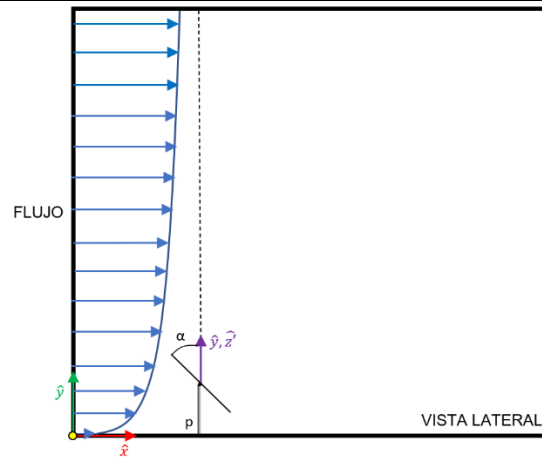
$$Drag = \frac{2}{\rho A_{ref} u_{ref}^2} [F_x \cos\beta - F_z \sin\beta] \quad (60)$$

$$Lift = \frac{2}{\rho A_{ref} u_{ref}^2} [F_y] \quad (61)$$

$$Overturning = \frac{2}{\rho A_{ref} L_{ref} u_{ref}^2} [-M_x \sin\beta - M_z \cos\beta] \quad (62)$$



**Figura 15.** Sistema coordenado fijo en el espacio y el utilizado por Peterka (1986).



**Figura 16.** Sistema coordenado fijo en el espacio y el utilizado por Peterka (1986).

### 3.2.6. Perfiles de entrada

La intensidad turbulenta se define como:

$$IT = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{u} \quad (63)$$

Se utilizan las leyes de pared modificadas de los perfiles de velocidad, energía cinética turbulenta y disipación turbulenta utilizando el modelo k-ε estándar:

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{y+y_0}{y_0} \right) \quad (64)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (65)$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa(y+y_0)} \quad (66)$$

### 3.2.7. Condiciones de frontera

En la Tabla 3 se observan las condiciones de frontera utilizadas, así como su región correspondiente. Se impone la condición de no deslizamiento en el techo y las paredes, hay que denotar que la condición de simetría también se puede aplicar en este caso. Mientras tanto a la salida se le impone la condición outflow (flujo completamente desarrollado) . Por último, funciones definidas por el usuario (UDF) se implementan en el software para así poder establecer condiciones de frontera a la entrada y también en el suelo del dominio.

Para describir el comportamiento del viento cercano a superficies lisas, se hace uso de funciones de pared estándar.

$$U_{smooth}^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (67)$$

La distancia adimensional desde la pared se define:

$$y^+ \equiv \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (68)$$

Para superficies rugosas, se utilizaron las funciones de pared tipo  $y_0$  propuestas por Parente y Benocci (2010) simuladas en el suelo del dominio computacional mediante:

$$\frac{u}{u_{rough}^*} = \frac{1}{\kappa} \ln(E_{ABL} y_{ABL}^+) \quad (69)$$

El valor de la constante E es sustituido por  $E_{ABL}$  y se calcula mediante la ecuación (70). La altura adimensional se define mediante la ecuación (71):

$$E_{ABL} = \frac{\mu}{\rho C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2} y_0} \quad (70)$$

$$y_{ABL}^+ = \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k_p^{1/2}}{\mu} (y_p + y_0) \quad (71)$$

Para determinar la energía cinética turbulenta en las superficies se aplicó la ecuación (72). El cálculo de la disipación turbulenta se realiza mediante la ecuación (73).

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (72)$$

$$\varepsilon_p = \frac{C_{\mu}^{3/4} ABL k_p^{3/2}}{\kappa y_p} \quad (73)$$

Adicionalmente se introdujo un factor de corrección, definido en la ecuación (74), en la ecuación (68), debido a las limitaciones del software utilizado y para asegurar el valor de  $C_{\mu}$  en las superficies aerodinámicamente lisas.

$$\varphi = \left( \frac{C_{\mu}}{C_{\mu ABL}} \right)^{1/4} \quad (74)$$

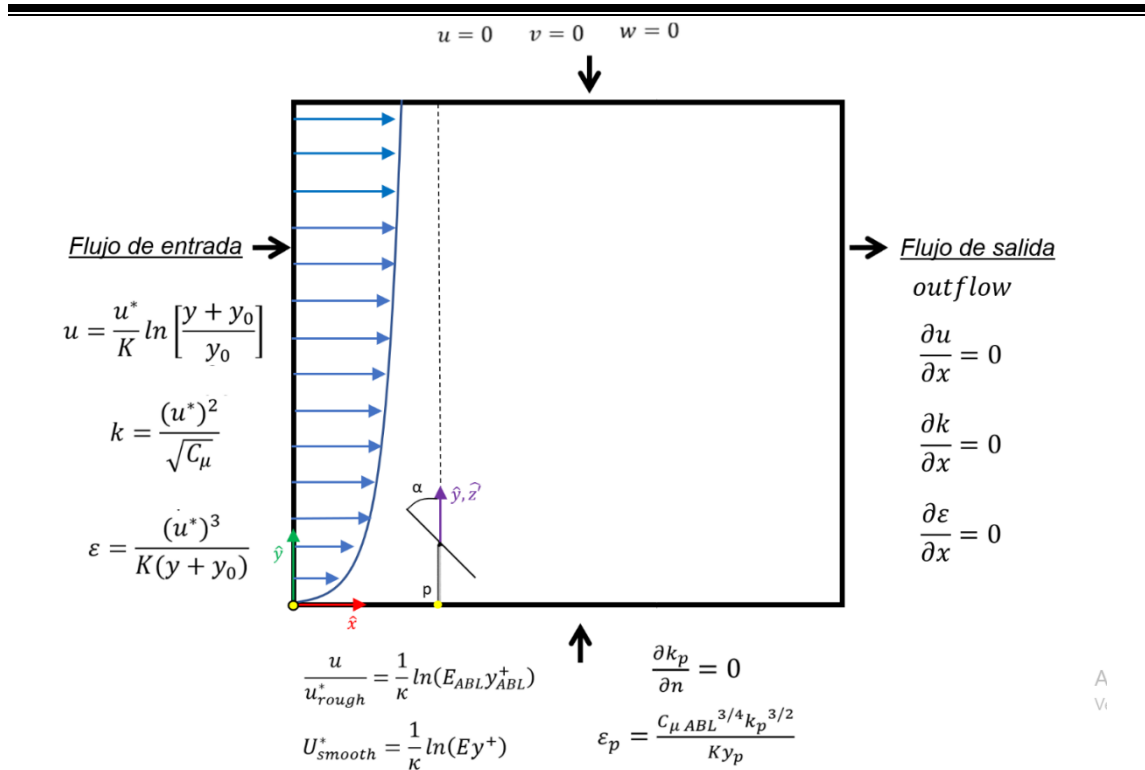
**Tabla 3.** Condiciones de frontera en el sistema aerodinámico estudiado.

| Posición inicial          | Región   | Condición de frontera  |
|---------------------------|--|--|
| $x = 0 \text{ m}$         | $0 \leq y \leq \sigma_y$<br>$-\frac{\sigma_z}{2} \leq z \leq \frac{\sigma_z}{2}$ | $u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[ \frac{y + y_0}{y_0} \right]$<br>$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_{\mu}}}$<br>$\varepsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa(y + y_0)}$ |
| $x = \sigma_x$            | $0 \leq y \leq \sigma_y$<br>$-\frac{\sigma_z}{2} \leq z \leq \frac{\sigma_z}{2}$ | <i>outflow</i><br>$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$<br>$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$<br>$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$              |
| $z = \frac{\sigma_z}{2}$  | $0 \leq x \leq \sigma_x$<br>$0 \leq y \leq \sigma_y$                             | $u = 0$<br>$v = 0$<br>$w = 0$  |
| $z = -\frac{\sigma_z}{2}$ | $0 \leq x \leq \sigma_x$<br>$0 \leq y \leq \sigma_y$                             | $u = 0$<br>$v = 0$<br>$w = 0$  |



|                   |  |  |
|-------------------|--|--|
| $y = \sigma_y$    | $0 \leq x \leq \sigma_x$<br>$-\frac{\sigma_z}{2} \leq z \leq \frac{\sigma_z}{2}$ | $u = 0$<br>$v = 0$<br>$w = 0$  |
| $y = 0 \text{ m}$ | $0 \leq x \leq \sigma_x$<br>$-\frac{\sigma_z}{2} \leq z \leq \frac{\sigma_z}{2}$ | $U_{smooth}^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+)$<br><br>$\frac{u}{u_{rough}^*} = \frac{1}{\kappa} \ln(E_{ABL}y_{ABL}^+)$<br><br>$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$<br><br>$\varepsilon_p = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa y_p}$ |

En la Figura 17 se presenta un esquema del dominio computacional con todas las condiciones de frontera requeridas para realizar la simulación computacional.



**Figura 17.** Condiciones fronteras utilizadas en el presente estudio (vista lateral).

### 3.3 Solución numérica

#### 3.3.1. Metodología numérica

Para resolver las ecuaciones gobernantes mediante el método de volumen finito, se utilizó el software de Dinámica de Fluidos Computacional ANSYS FLUENT 20.0 bajo las siguientes condiciones:

- Estado estacionario.
- Acoplamiento de presión-velocidad: SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations)
- Discretización de la presión en el espacio: segundo orden.

- 
- Discretización espacial de momentum: segundo orden aguas arriba (upwind).
  - Discretización espacial de energía cinética turbulenta: segundo orden aguas arriba (upwind).
  - Discretización espacial de la disipación turbulenta: segundo orden aguas arriba (upwind).

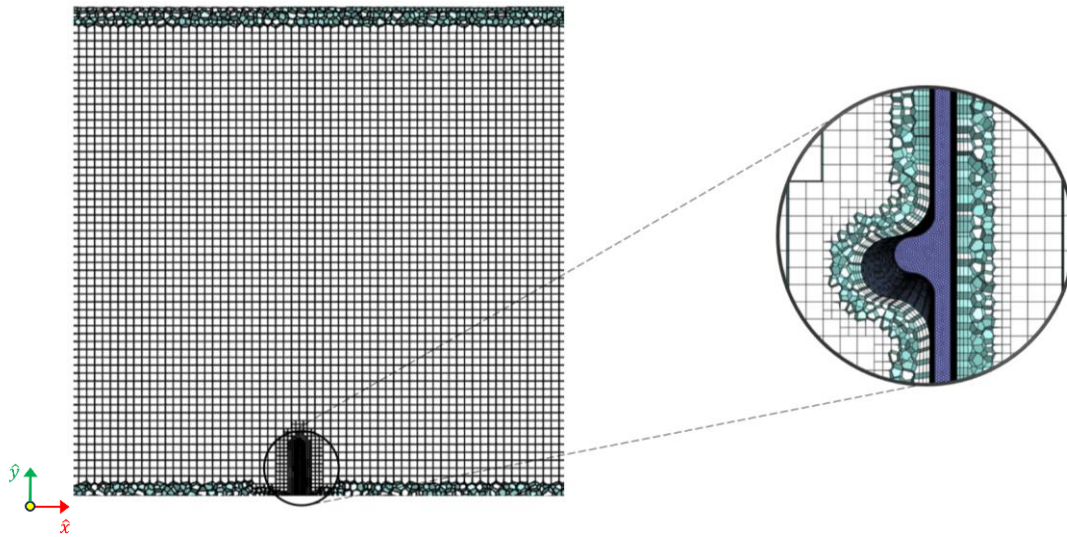
Se consideró un residual global menor a  $1 \times 10^{-6}$  como criterio de convergencia para todas las ecuaciones de transporte (conservación de masa, momentum, energía cinética turbulenta y disipación de energía cinética turbulenta).

### 3.3.2. Metodología computacional

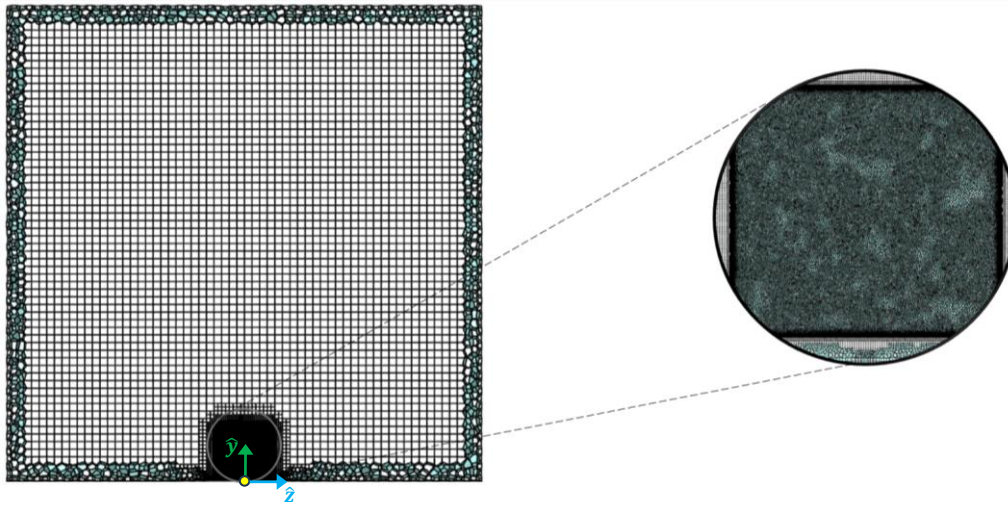
Con el fin de mejorar el proceso de mallado, se dividió el dominio computacional en distintas regiones. Estas regiones, a su vez, se agruparon en tres categorías: zona exterior del dominio, elementos grandes del heliostato y elementos pequeños del heliostato.

Se le denominó zona exterior a los bordes del sistema, donde se utilizaron poliedros para el mallado computacional. Se realizó una transición gradual a hexaedros conforme se acercaban a la región del heliostato, a su vez, el tamaño de las celdas de la malla se redujo para la zona de los elementos pequeños del heliostato en comparación con los elementos grandes.

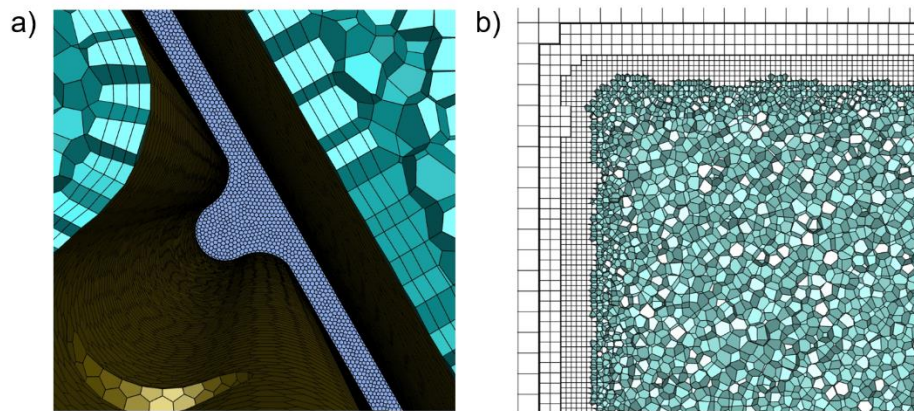
En la zona del heliostato de las Figuras 18 y 19 se puede observar la mayor concentración de celdas, debido a que en esta zona se debe capturar la trayectoria del flujo, la generación de vórtices y las diferencias de presión con mayor precisión, ya que de ellos dependen los coeficientes aerodinámicos. En la Figura 20 se aprecia la finura de la malla en las esquinas y zonas cercanas al heliostato.



**Figura 18.** Vista lateral del mallado computacional.



**Figura 19.** Vista frontal del mallado computacional.



**Figura 20.** Acercamientos a a) la sección transversal y b) la esquina superior izquierda del heliostato.

Se realizó un estudio de independencia de malla utilizando cuatro configuraciones de mallado distintas. Se utilizó refinamiento por proximidad de bordes, capas límites en la parte inferior del sistema y en la superficie del heliostato, además, se modificaron aspectos como el tamaño de los elementos y el volumen de las celdas del sistema de acuerdo con los parámetros de mallado de superficie.

Las Tablas 4-6 muestran los resultados de los coeficientes aerodinámicos adimensionales para diferentes mallas computacionales. También se presentan las diferencias porcentuales de los coeficientes aerodinámicos obtenidos entre las diferentes mallas variando el ángulo  $\alpha$  y con una orientación de  $\beta=0$ . Debido a que las diferencias porcentuales entre las mallas 2 y 3, en promedio no excedían el 1%, los coeficientes aerodinámicos, contornos de velocidad, contornos de presión y trayectorias de flujo se obtuvieron utilizando la configuración de Malla 2.

**Tabla 4.** Configuración de Malla 1.

| Elementos promedio: 801,846 |       |        |             |
|-----------------------------|-------|--------|-------------|
| $\alpha$                    | Drag  | Lift   | Overturning |
| 0°                          | 1.174 | -0.009 | -0.746      |
| 15°                         | 1.148 | 0.291  | -0.764      |
| 30°                         | 1.008 | 0.554  | -0.715      |
| 45°                         | 0.768 | 0.706  | -0.585      |
| 60°                         | 0.516 | 0.758  | -0.439      |
| 75°                         | 0.228 | 0.501  | -0.264      |
| 80°                         | 0.152 | 0.333  | -0.186      |
| 84°                         | 0.109 | 0.196  | -0.128      |

**Tabla 5.** Configuración de malla 2 y diferencia porcentual con malla 1.

| Elementos promedio: 981,585   |       |        |             |                     |                     |                            |
|-------------------------------|-------|--------|-------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| $\alpha$                      | Drag  | Lift   | Overturning | Diferencia Drag (%) | Diferencia Lift (%) | Diferencia Overturning (%) |
| 0°                            | 1.173 | -0.009 | -0.746      | 0.1                 | 0.0                 | 0.0                        |
| 15°                           | 1.148 | 0.291  | -0.765      | 0.0                 | 0.0                 | 0.1                        |
| 30°                           | 1.015 | 0.557  | -0.720      | 0.7                 | 0.5                 | 0.7                        |
| 45°                           | 0.774 | 0.713  | -0.590      | 0.8                 | 1.0                 | 0.8                        |
| 60°                           | 0.580 | 0.868  | -0.529      | 11.0                | 12.7                | 17.0                       |
| 75°                           | 0.233 | 0.523  | -0.276      | 2.1                 | 4.2                 | 4.3                        |
| 80°                           | 0.152 | 0.344  | -0.190      | 0.0                 | 3.2                 | 2.1                        |
| 84°                           | 0.111 | 0.201  | -0.134      | 1.8                 | 2.5                 | 4.5                        |
| Errores porcentuales promedio |       |        |             | 2.1                 | 3.0                 | 3.7                        |

**Tabla 6.** Configuración de malla 3 y diferencia porcentual con malla 2.

| Elementos promedio: 1,212,897 |       |        |             |                     |                     |                            |
|-------------------------------|-------|--------|-------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| $\alpha$                      | Drag  | Lift   | Overturning | Diferencia Drag (%) | Diferencia Lift (%) | Diferencia Overturning (%) |
| 0°                            | 1.173 | -0.009 | -0.745      | 0.0                 | 0.0                 | 0.1                        |
| 15°                           | 1.139 | 0.289  | -0.760      | 0.8                 | 0.7                 | 0.7                        |
| 30°                           | 1.010 | 0.556  | -0.716      | 0.5                 | 0.2                 | 0.6                        |
| 45°                           | 0.766 | 0.706  | -0.583      | 1.0                 | 1.0                 | 1.2                        |
| 60°                           | 0.578 | 0.867  | -0.519      | 0.3                 | 0.1                 | 1.9                        |
| 75°                           | 0.230 | 0.518  | -0.192      | 1.3                 | 1.0                 | 4.2                        |
| 80°                           | 0.154 | 0.344  | -0.192      | 1.3                 | 0.0                 | 1.0                        |
| 84°                           | 0.112 | 0.198  | -0.135      | 0.9                 | 1.5                 | 0.7                        |
| Errores porcentuales promedio |       |        |             | 0.8                 | 0.6                 | 1.3                        |

### 3.3.3. Propiedades del fluido, constantes y valores de referencia utilizados

En la Tabla 7 se presentan las propiedades del fluido y las constantes del modelo turbulento utilizado para los cálculos computacionales.

**Tabla 7.** Propiedades del fluido, constantes del modelo turbulento y valores de referencia.

| Cantidad                    | Símbolo   | Magnitud | Unidades         |
|-----------------------------|-----------|----------|------------------|
| Velocidad de referencia ABL | $u_{ABL}$ | 15.9240  | $m \cdot s^{-1}$ |
| Altura de referencia ABL    | $y_{ABL}$ | 1.13538  | m                |
| Velocidad de referencia     | $u_{ref}$ | 11.8108  | $m \cdot s^{-1}$ |
| Altura de referencia        | $y_{ref}$ | 0.1670   | m                |

|  |                            |                         |                                     |
|--|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Longitud de referencia                         | $L_{ref}$                  | 0.1082                  | m                                   |
| Área de referencia                             | $A_{ref}$                  | 0.0126                  | m <sup>2</sup>                      |
|  | $B_{ref}$                  | 0.1168                  | m                                   |
| Densidad                                       | $\rho$                     | 1.2250                  | kg·m <sup>-3</sup>                  |
| Viscosidad dinámica                            | $\mu$                      | 1.7894x10 <sup>-5</sup> | kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> |
| Constante modelo turbulencia $\mu_t$           | $c_\mu$                    | 0.0900                  | -                                   |
| Constante modelo turbulencia en referencia ABL | $c_{\mu ABL}$              | 0.01086                 | -                                   |
| Constante modelo turbulencia $k$               | $\sigma_k$                 | 1.0000                  | -                                   |
| Constante modelo turbulencia $\varepsilon$     | $c_{\varepsilon 1}$        | 1.4400                  | -                                   |
| Constante modelo turbulencia $\varepsilon$     | $c_{\varepsilon 2}$        | 1.9200                  | -                                   |
| Constante modelo turbulencia $\varepsilon$     | $\sigma_\varepsilon$       | 1.3000                  | -                                   |
| Constante modelo turbulencia en referencia ABL | $\sigma_{\varepsilon ABL}$ | 3.5054                  | -                                   |
| Constante Von Kármán                           | $\kappa$                   | 0.4187                  | -                                   |
| Altura de rugosidad aerodinámica               | $y_0$                      | 3.5x10 <sup>-5</sup>    | m                                   |
| Número de Reynolds en $y_{ref}$                | $Re_{ref}$                 | 9.69x10 <sup>-4</sup>   | -                                   |



## CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1. Estudios sobre la capa límite atmosférica

## 4.1.1. Estudio sobre la capa límite atmosférica bidimensional

Se realizaron dos estudios de capa límite atmosférica, el primero se realizó en un dominio 2D computacional. En las Figuras 21 y 22 se puede observar los campos de velocidad e intensidad turbulenta respectivamente, como fue señalado en Vishaykanth (2015), no es necesario obtener una capa límite atmosférica en equilibrio en todo el dominio, pero es importante tener las condiciones adecuadas en las zonas cercanas al área de interés. En las Figuras 23 y 24 se compararon los resultados con los obtenidos en los estudios experimentales de Peterka (1986) y se obtuvo un error promedio menor del 1%.

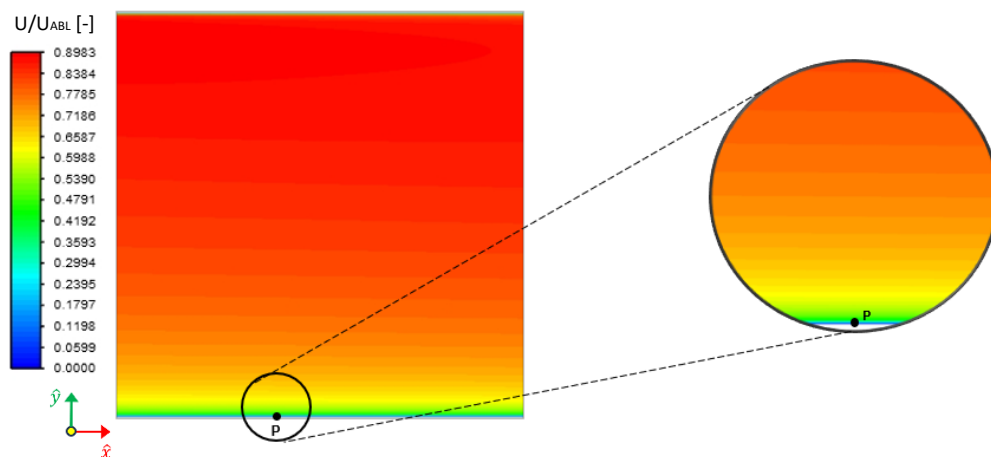


Figura 21. Campo de velocidad adimensional en dominio 2D.

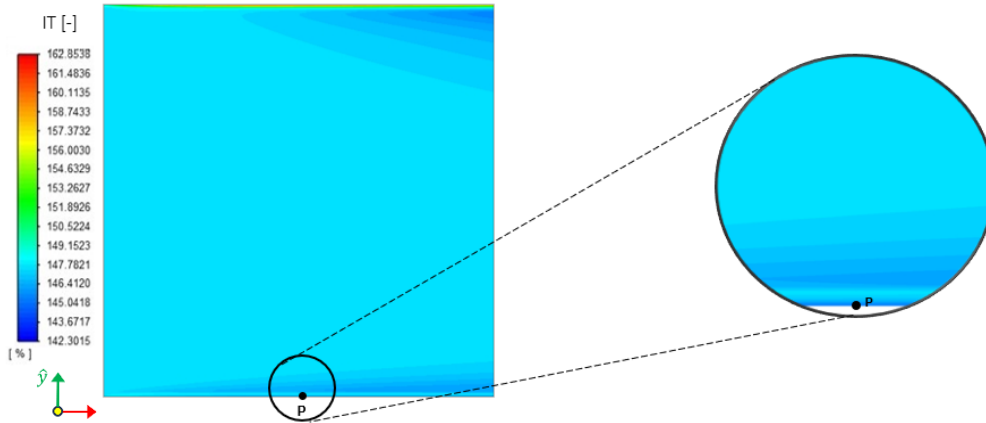


Figura 22. Campo de IT en dominio 2D.

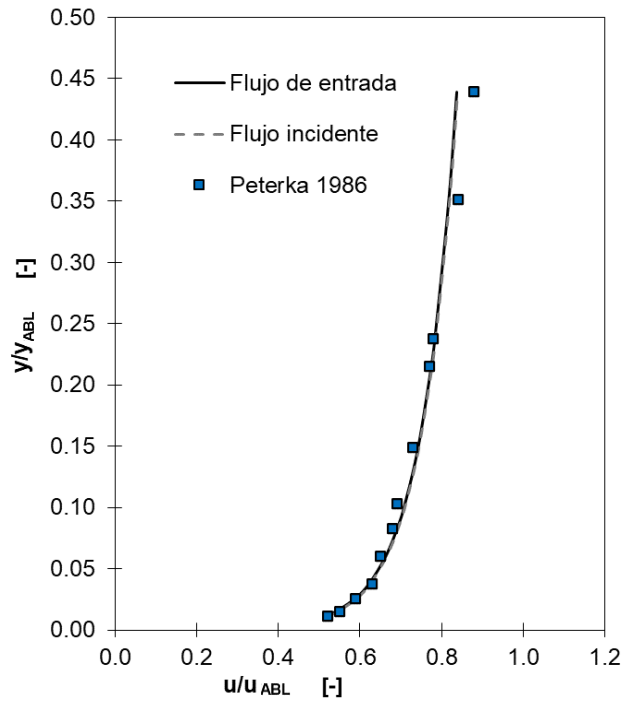
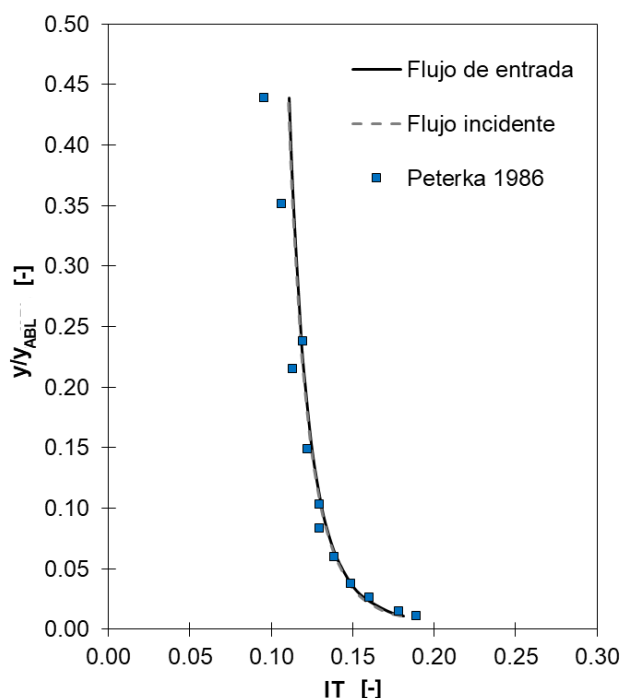


Figura 23. Comparación de perfiles de velocidad 2D con Peterka (1986).



**Figura 24.** Comparación de perfiles de intensidad turbulenta 2D con Peterka (1986).

#### 4.1.2. Estudio sobre la capa límite atmosférica tridimensional

El segundo estudio de la capa límite atmosférica se realizó en un dominio tridimensional, en las Figuras 25 y 26 se pueden observar los campos de velocidad y de intensidad turbulenta en vista  $XY$  en  $Z=0m$  con un acercamiento a la zona de interés. En la Figura 27 se muestra la vista  $YZ$  de ambos campos.

Se obtuvo un error menor promedio menor al 3% en comparación a los resultados de Peterka (1986), como se aprecia en las Figuras 28 y 29, el mayor porcentaje de error se encuentra en zona más cercana a la parte inferior del dominio.

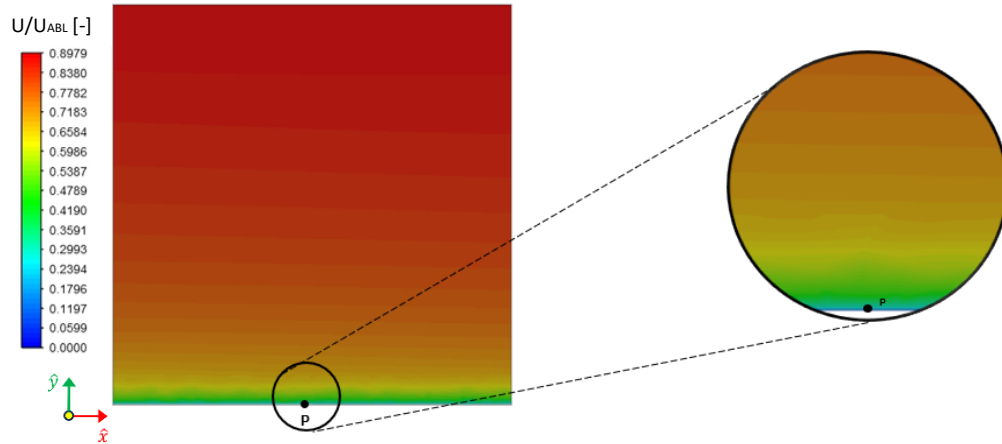


Figura 25. Campo de velocidad adimensional en dominio 3D.

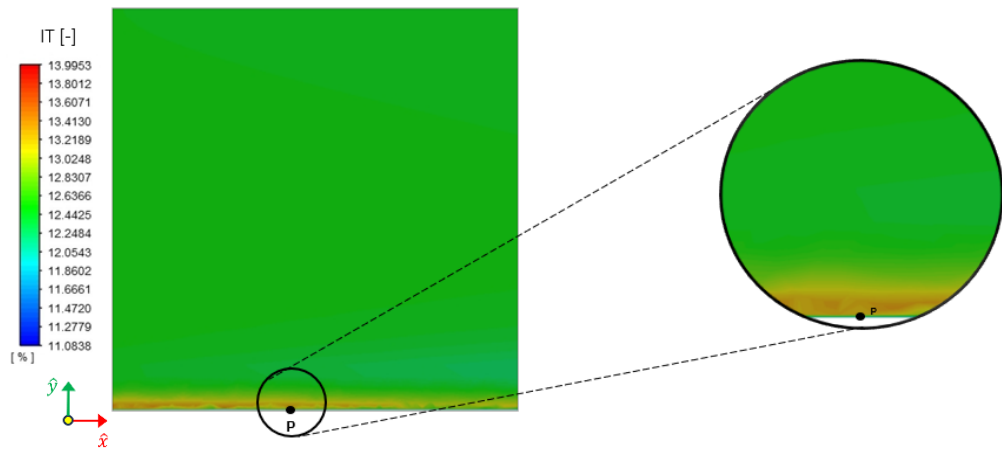


Figura 26. Campo de IT en dominio 3D.

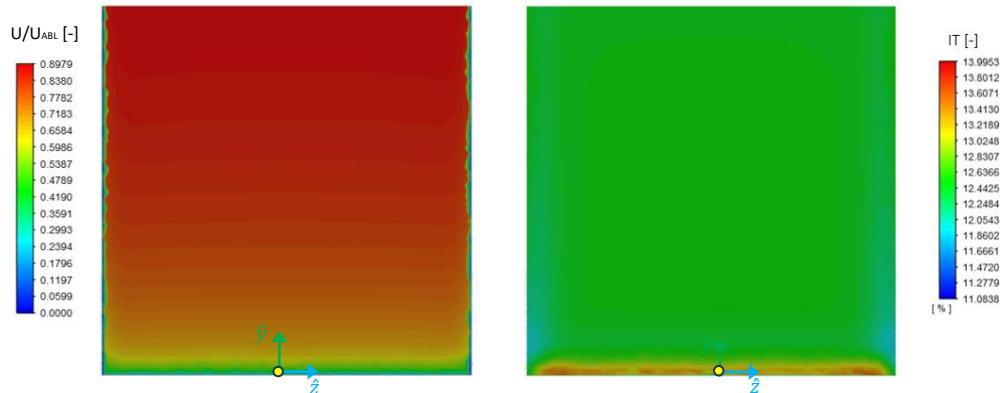
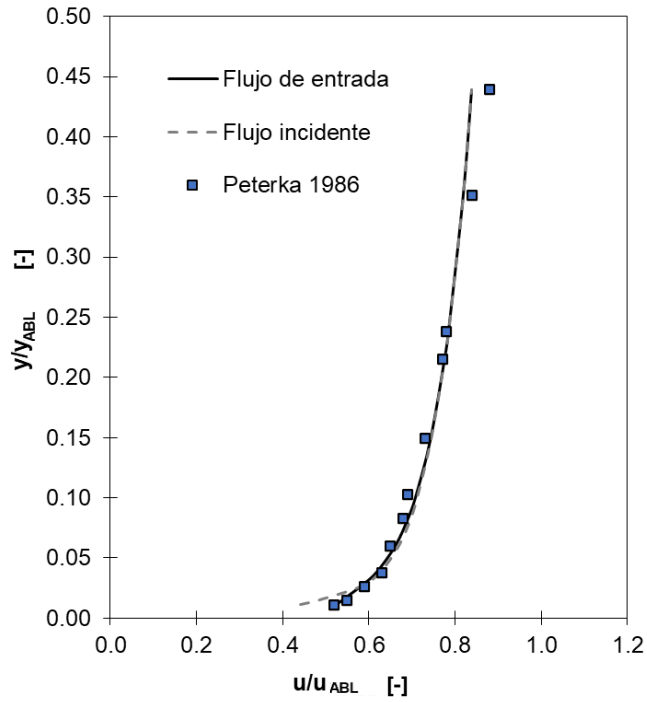
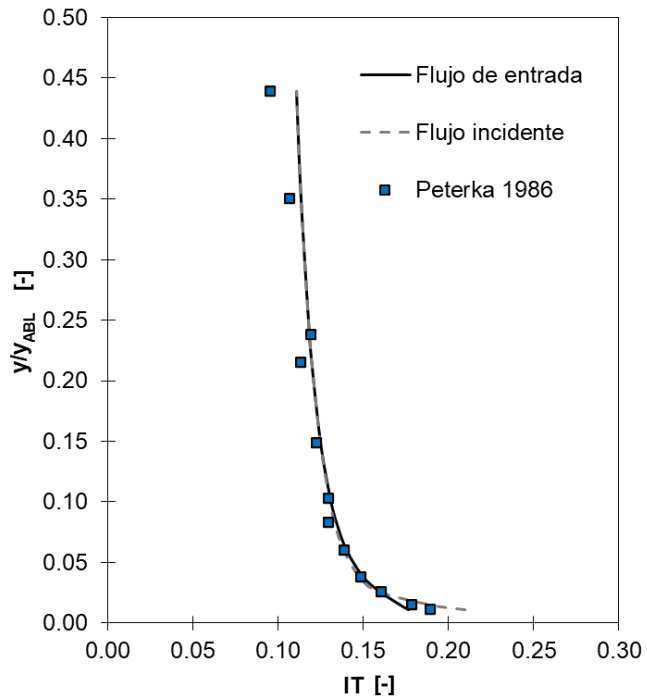


Figura 27. Vistas YZ de campos de velocidad (izq.) e intensidad turbulenta (der.) en  $X=0m$ .

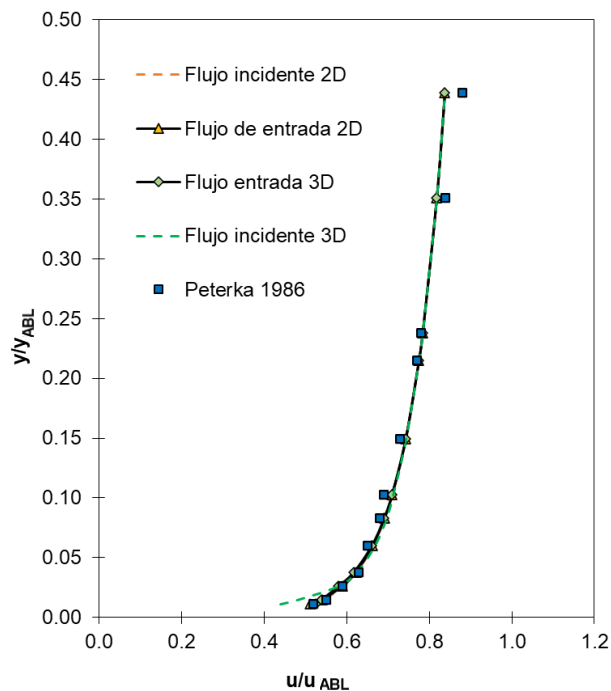


**Figura 28.** Comparación de perfiles de velocidad 3D con Peterka (1986).

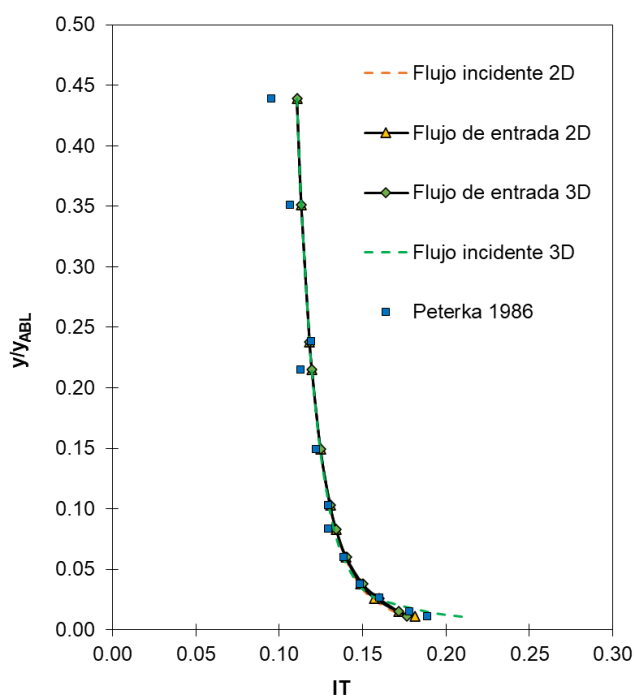


**Figura 29.** Comparación de perfiles de intensidad turbulenta 3D con Peterka (1986).

En las Figuras 30 y 31 se realizó una comparación de ambos estudios de la capa límite atmosférica, donde se observó que los resultados en el dominio bidimensional se ajustan mejor a la línea de tendencia de los resultados experimentales. Sin embargo, como se menciona en Blocken *et al.* (2017), una simulación en 2D no representa verdaderamente la turbulencia en 3D, pero sirve para ilustrar los problemas que puedan surgir al utilizar el modelo  $k-\epsilon$  estándar y evaluar las posibles medidas correctivas.



**Figura 30.** Comparación de perfiles de velocidad en dominios 2D y 3D.



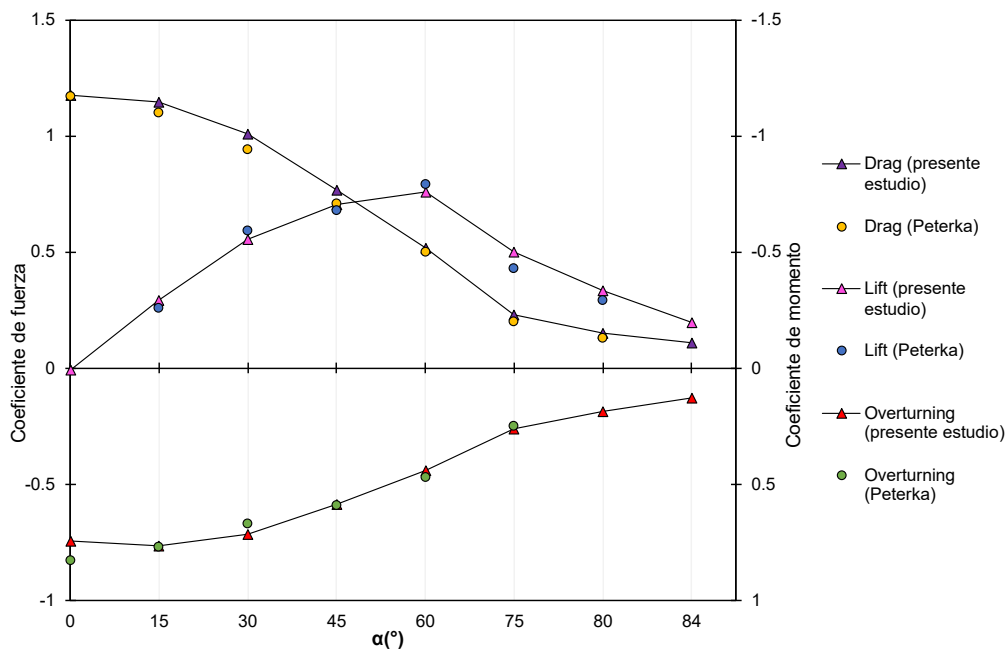
**Figura 31.** Comparación de perfiles de intensidad turbulenta en dominios 2D y 3D.

## 4.2. Estudios sobre cargas aerodinámicas

### 4.2.1. Validación con datos reportados en la literatura

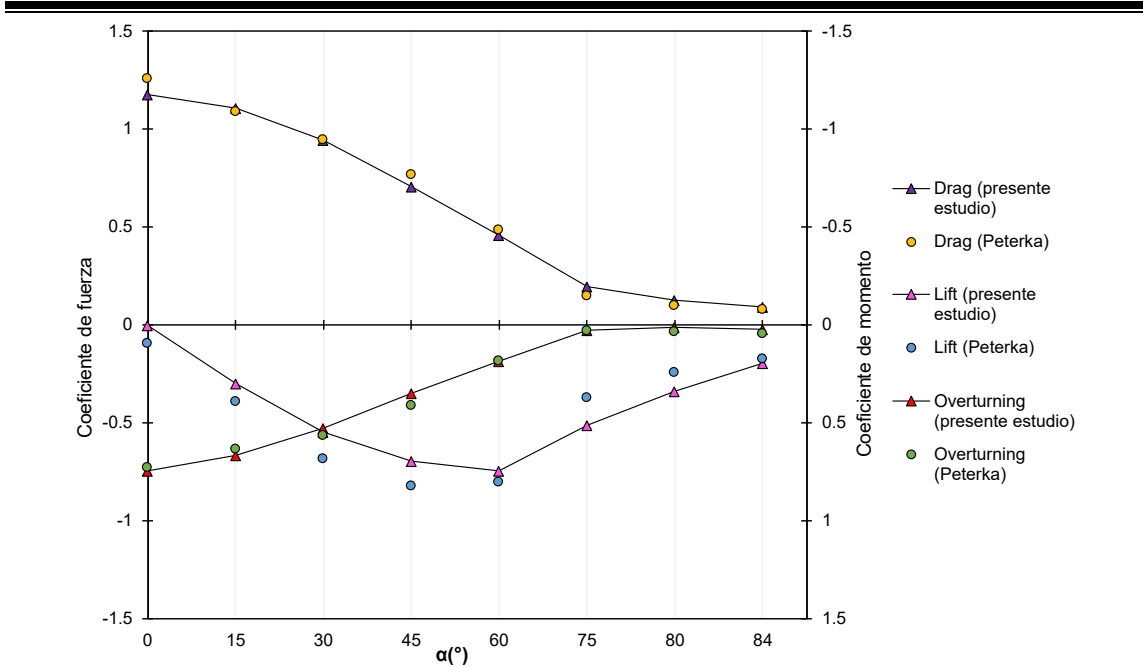
En la Figura 32 se realizó una comparación de los resultados obtenidos en un azimut de  $\beta=0^\circ$ , con el flujo del viento incidente en la cara posterior del heliostato, con los obtenidos experimentalmente por Peterka (1986) a diferentes inclinaciones. Mientras que la Figura 33 compara los resultados en  $\beta=180^\circ$  donde el viento incide en la cara frontal del heliostato, ambos ángulos de azimut son los ángulos donde las fuerzas y momentos aerodinámicos son mayores en las estructuras de los heliostatos.

Se observó que el coeficiente de arrastre (*Drag*) es mayor en  $0^\circ$  para ambos valores de azimut, en el mismo ángulo de elevación, se tiene el mayor coeficiente de volcamiento (*Overturning*) para  $\beta=180^\circ$ . Sin embargo, el coeficiente de volcamiento es mayor en  $\alpha=15^\circ$  cuando el viento incide en la cara posterior del heliostato. Para ambos ángulos de azimut, se tiene que el coeficiente de sustentación (*Lift*) es mayor en una elevación de  $60^\circ$ , ya que cuando el heliostato se coloca en ángulo, el flujo se separa en el borde aguas arriba del heliostato, lo que causa el momento de sustentación.



**Figura 32.** Comparación de coeficientes aerodinámicos obtenidos con el flujo de aire incidente en la cara posterior ( $\beta=0^\circ$ ) contra Peterka (1986).





**Figura 33.** Comparación de coeficientes aerodinámicos obtenidos con el flujo de aire incidente en la cara frontal ( $\beta=180^\circ$ ) contra Peterka (1986).

Para determinar la diferencia entre los valores obtenidos numéricamente con los observados experimentalmente en la literatura, se calculó el error porcentual absoluto medio (MAPE) con la siguiente expresión:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - N_i}{E_i} \right| \tag{75}$$

Donde  $E_i$  son los valores experimentales reportados en Peterka (1986) y  $N_i$  los valores obtenidos en este estudio. Se obtuvieron los errores porcentuales que se muestran en la Tabla 8.

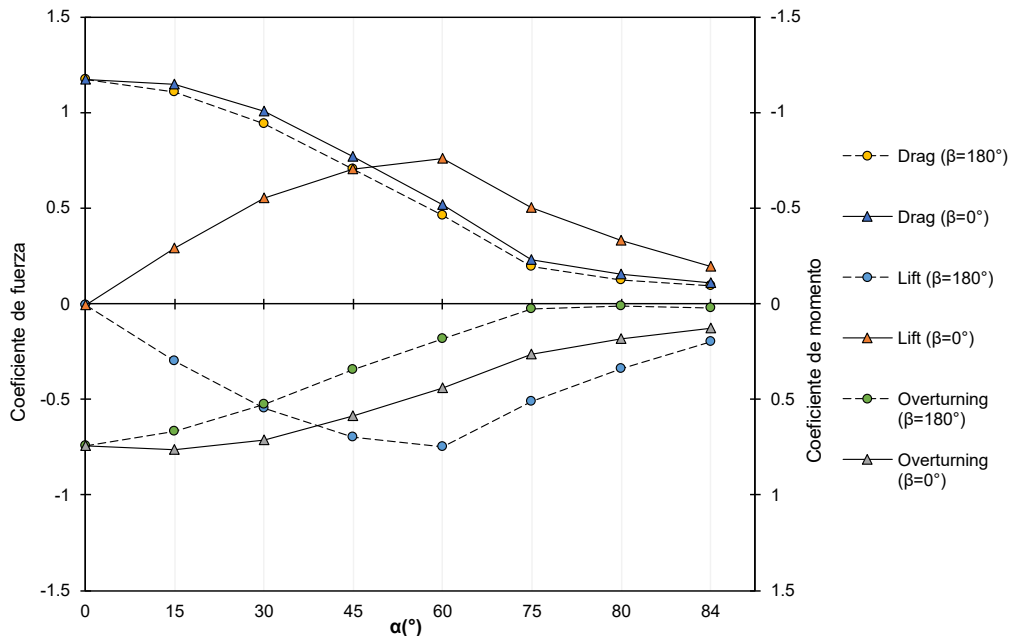
**Tabla 8.** Errores porcentuales absolutos medios (MAPE) de los coeficientes aerodinámicos.

|  |                 |                   |
|--|-----------------|-------------------|
|  | $\beta=0^\circ$ | $\beta=180^\circ$ |
|--|-----------------|-------------------|

|                    |      |       |
|--------------------|------|-------|
| <i>Drag</i>        | 7.8% | 11.9% |
| <i>Lift</i>        | 9.6% | 31.8% |
| <i>Overturning</i> | 5.1% | 17.1% |

Los estudios de Peterka (1986) fueron realizados utilizando un heliostato de 3 facetas, con una separación entre ellas de aproximadamente 5 mm. Una parte del porcentaje de error puede ser debido a esta diferencia en los estudios experimentales y el presente estudio teórico.

Una comparación de ambos ángulos de azimut se observa en la Figura 34, donde se aprecia la misma tendencia para todos los coeficientes aerodinámicos. Destacando que los valores de los coeficientes de arrastre y volcamiento son mayores en  $\beta=0^\circ$ , mientras que el coeficiente de sustentación presenta la mayor similitud para ambos ángulos de  $\beta$ , en direcciones opuestas.



**Figura 34.** Comparación de los coeficientes aerodinámicos obtenidos con el flujo de aire incidente en la cara frontal y en la cara posterior ( $\beta=180^\circ$  vs.  $\beta=0^\circ$ ).

En las Tablas 9 y 10 se presentan los coeficientes de arrastre, sustentación y volcamiento en  $\beta=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  respectivamente. Se denotan las similitudes entre ambos resultados.

**Tabla 9.** Coeficientes aerodinámicos de  $\alpha$  en  $\beta=0^\circ$ .

| $\alpha$ | <i>Drag</i> | <i>Lift</i> | <i>Overturning</i> |
|----------|-------------|-------------|--------------------|
| 0°       | 1.174       | -0.009      | 0.746              |
| 15°      | 1.148       | 0.291       | 0.764              |
| 30°      | 1.008       | 0.554       | 0.715              |
| 45°      | 0.768       | 0.706       | 0.585              |
| 60°      | 0.516       | 0.758       | 0.439              |
| 75°      | 0.228       | 0.501       | 0.264              |
| 80°      | 0.152       | 0.333       | 0.186              |
| 84°      | 0.109       | 0.196       | 0.128              |

**Tabla 10.** Coeficientes aerodinámicos de  $\alpha$  en  $\beta=180^\circ$ .

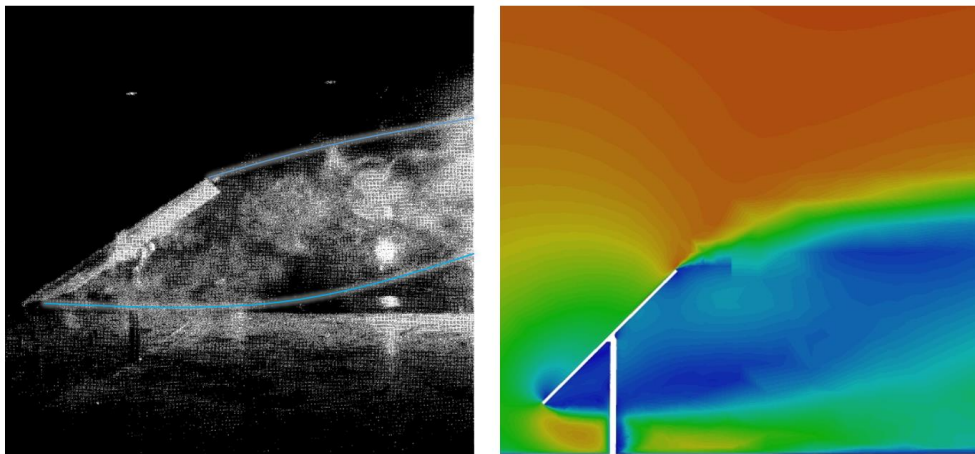
| $\alpha$ | <i>Drag</i> | <i>Lift</i> | <i>Overturning</i> |
|----------|-------------|-------------|--------------------|
| 0°       | 1.175       | -0.005      | 0.745              |
| 15°      | 1.107       | -0.301      | 0.666              |
| 30°      | 0.942       | -0.546      | 0.525              |
| 45°      | 0.703       | -0.696      | 0.347              |
| 60°      | 0.460       | -0.747      | 0.184              |
| 75°      | 0.194       | -0.513      | 0.026              |
| 80°      | 0.126       | -0.340      | 0.013              |
| 84°      | 0.093       | -0.197      | 0.024              |

### 4.3. Resultados numéricos

#### 4.3.1. Contornos de velocidad adimensional

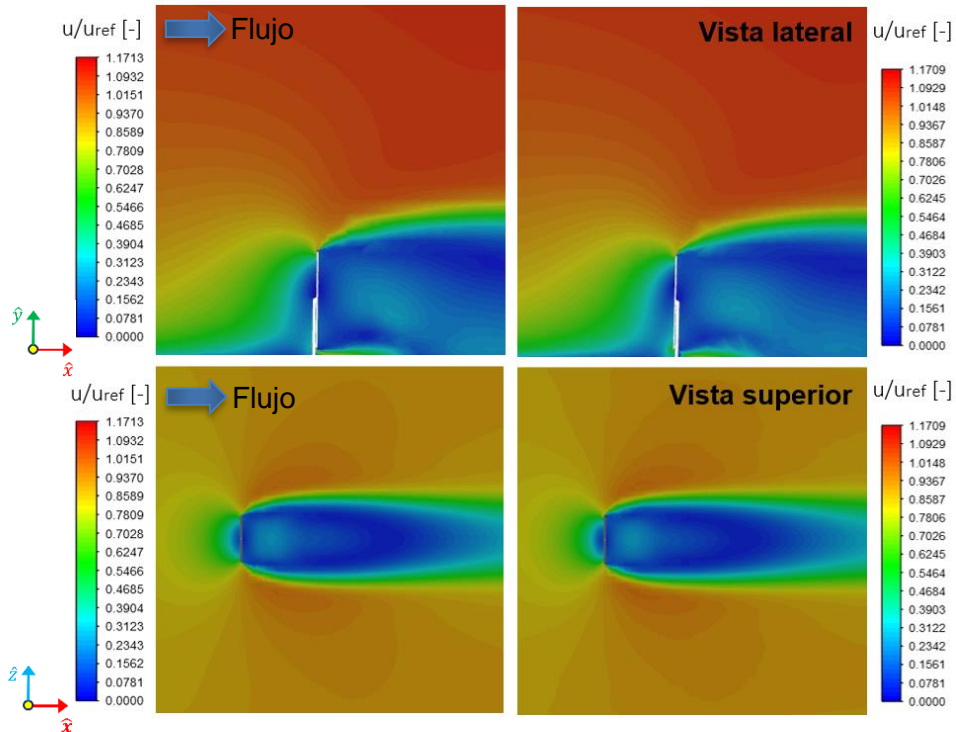
En este apartado se muestran los campos de velocidad para  $\beta=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  en todas las inclinaciones analizadas. Se muestran las vistas laterales (plano  $XY$  en  $z=0$ ) y la vista superior (plano  $XZ$  en  $y=y_{LCH}$ ).

En la Figura 35 se muestra una comparación entre el flujo del viento incidiendo en la cara frontal del heliostato experimental obtenido de Peterka (1987) y el contorno de velocidad en una elevación de  $45^\circ$ , en donde se aprecia una muy buena concordancia entre el patrón de flujo experimental y el numérico.



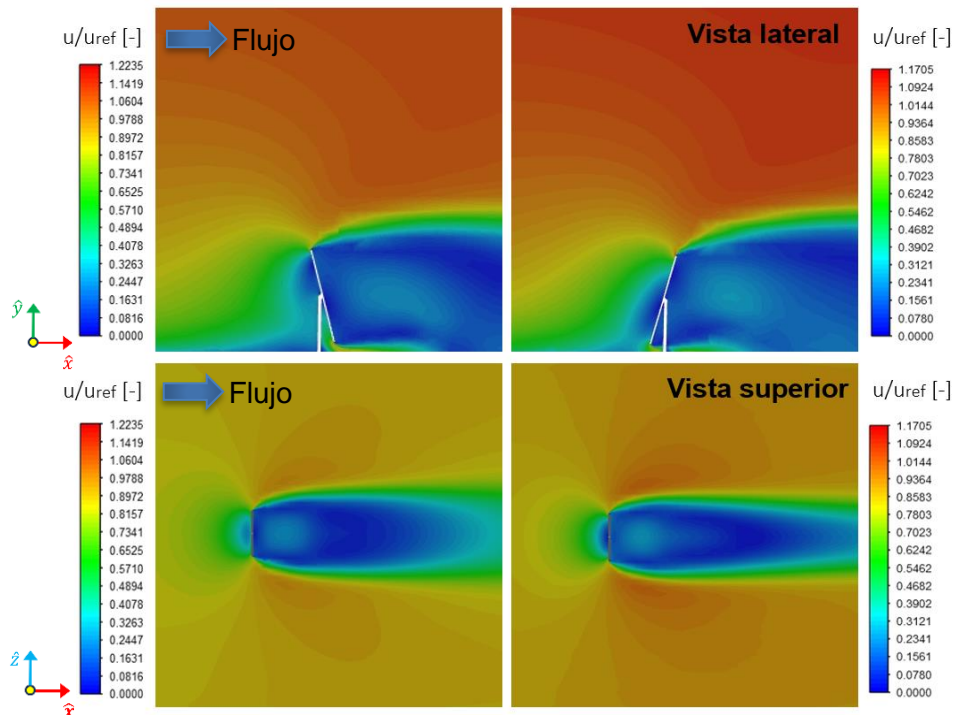
**Figura 35.** Flujo de aire en heliostato experimental de Peterka (1987) (izq.) y teórico a  $\alpha=45^\circ$ (der.).

En la Figura 36 se observan una gran similitud entre los campos de velocidad para ambos valores del ángulo azimutal con una elevación de  $0^\circ$ . Una ligera diferencia se aprecia por el efecto que ocasiona la esquina inferior del heliostato en la estela del flujo.



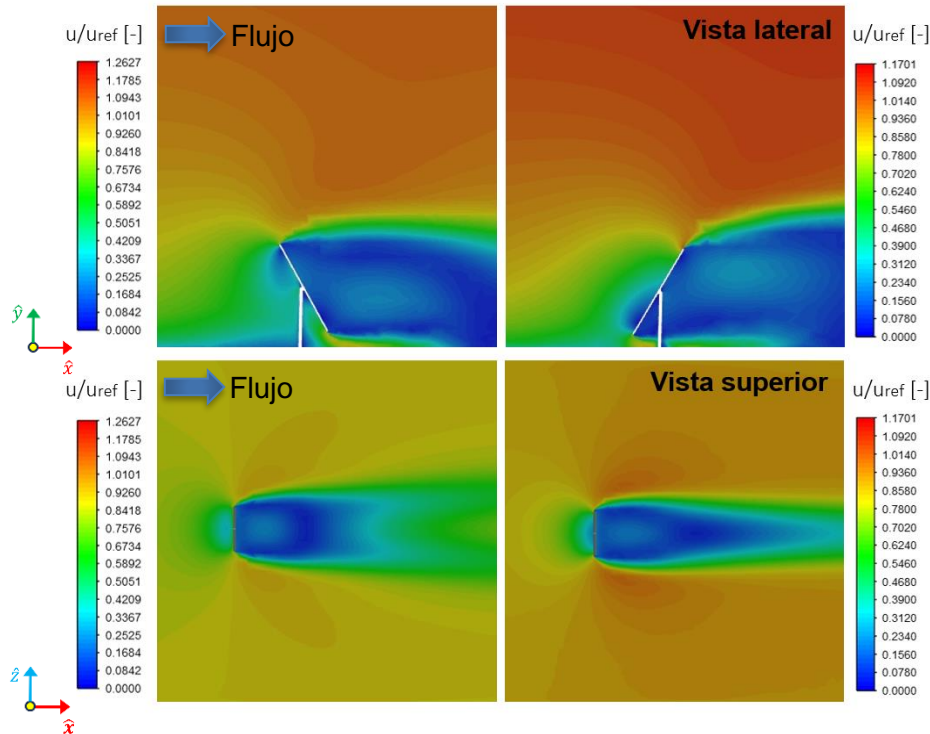
**Figura 36.** Contornos de velocidad  $\alpha=0^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

Los contornos de velocidad para un ángulo de elevación del heliostato ( $\alpha=15^\circ$ ) se muestran en la Figura 37. Existe similitud entre los contornos de velocidad, sin embargo, se aprecia una diferencia de velocidades en la zona donde el heliostato se separa del pedestal y una zona de baja velocidad en la zona superior de pared posterior del heliostato en  $\beta=0^\circ$ , mientras que en  $\beta=180^\circ$  se forma una zona de baja velocidad prácticamente uniforme en la zona donde el heliostato se separa del pedestal y en la mitad inferior de la pared frontal del heliostato.



**Figura 37.** Contornos de velocidad  $\alpha=15^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

En la Figura 38 se presentan los contornos de velocidad para un ángulo de elevación de  $30^\circ$ . Para  $\beta=0^\circ$ , se observa una zona de baja velocidad en la parte superior de la superficie posterior del heliostato, mientras que la estela muestra una zona similar se aprecia con un área de alta velocidad en la esquina inferior del heliostato. También se muestran las vistas superiores, donde se aprecian las formas que toman las zonas de baja velocidad. En  $\beta=180^\circ$ , se forma un área de baja velocidad que se desarrolla en una forma más alargada, mientras que se observa una curvatura al final de la zona de baja velocidad en  $\beta=0^\circ$ .



**Figura 38.** Contornos de velocidad  $\alpha=30^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

En las Figuras 39 y 40 se presenta la comparación entre  $\beta=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  en elevaciones de  $45^\circ$  y  $60^\circ$  respectivamente. Se observa una zona de alta velocidad en la parte inferior del heliostato en ambos valores de  $\alpha$  para  $\beta=180^\circ$ , siendo esta zona más grande a mayor elevación. En las vistas superiores, se puede apreciar como disminuyen considerablemente las áreas de baja velocidad de la estela de aire que se aleja del heliostato, en comparación con  $\alpha=30^\circ$ . Se aprecia como se disminuyen las diferencias de velocidades conforme aumenta la elevación, notando un flujo más uniforme en  $\beta=0^\circ$ .



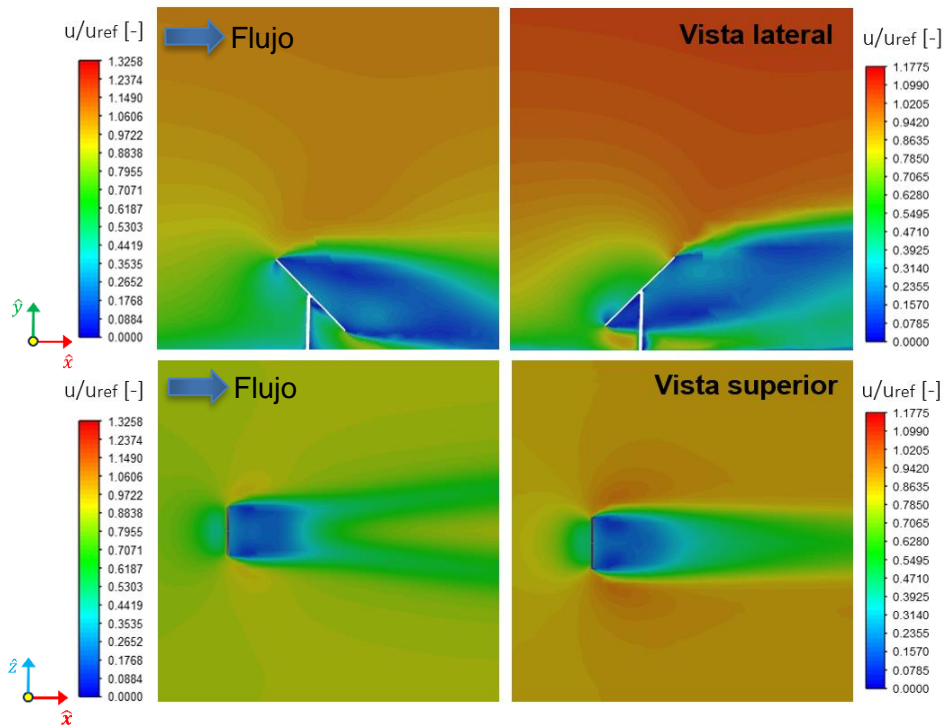


Figura 39. Contornos de velocidad  $\alpha=45^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

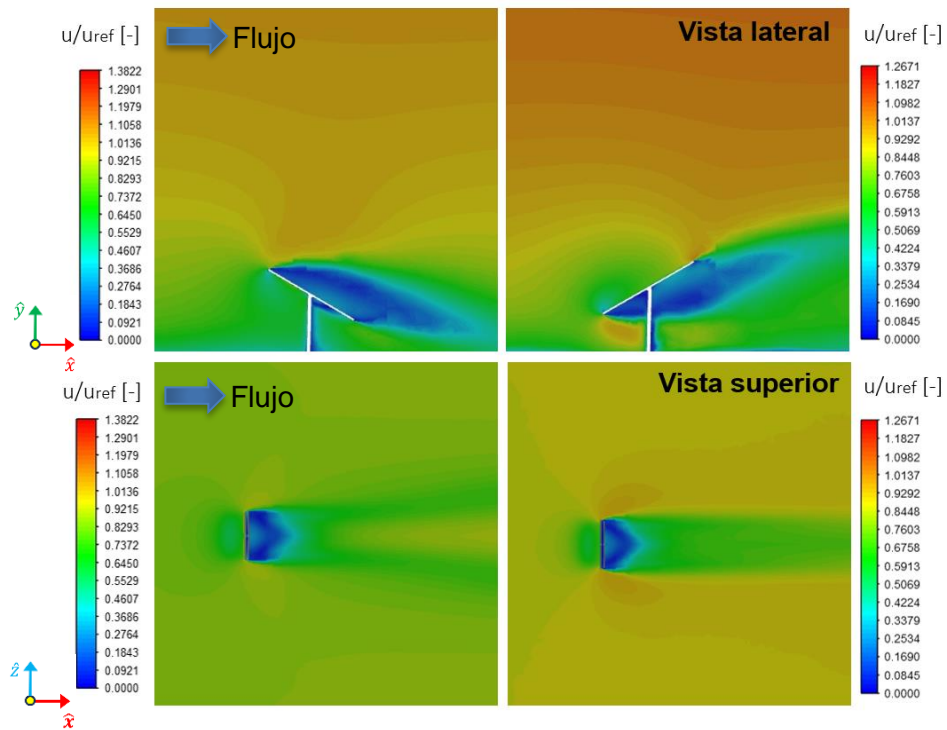
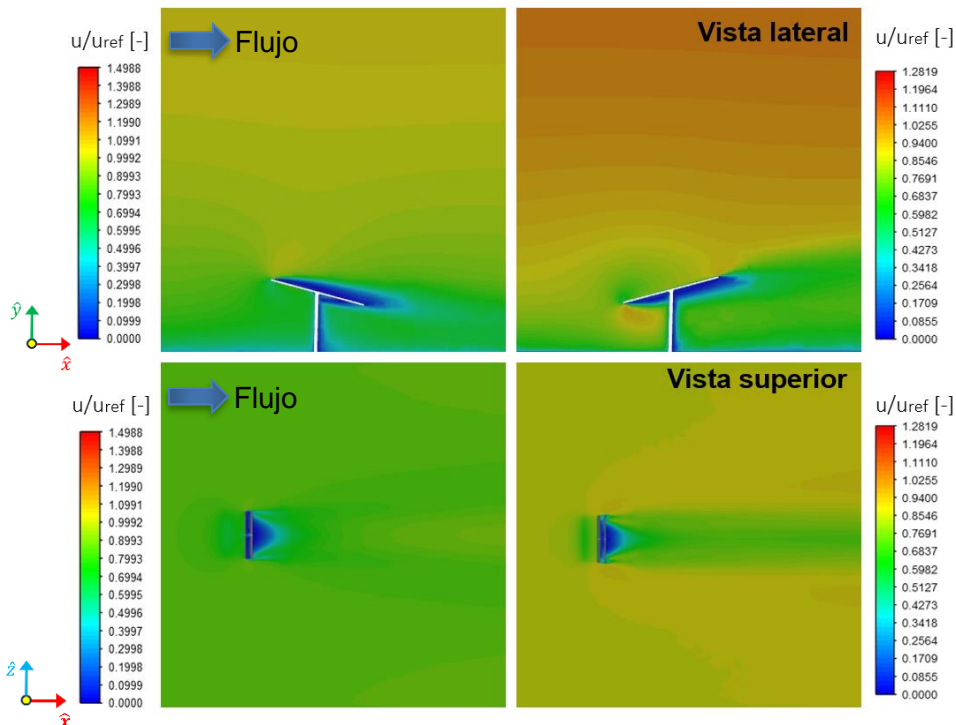


Figura 40. Contornos de velocidad  $\alpha=60^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).



En la Figura 41 se muestran los contornos de velocidad del heliostato a una elevación de  $75^\circ$ . En  $\beta=180^\circ$  se observan una zona baja velocidad debajo del heliostato y en el costado derecho del pedestal. Para  $\beta=0^\circ$  la zona baja velocidad se presenta también en la zona superior del heliostato. En la vista superior se se aprecia la estela de aire con una región de baja velocidad muy próxima al heliostato para ambos ángulos azimutales.



**Figura 41.** Contornos de velocidad  $\alpha=75^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

En las Figuras 42 y 43 se presentan los resultados de  $\alpha=80^\circ$  y  $\alpha=84^\circ$  respectivamente. El comportamiento es muy similar al descrito para  $\alpha=75^\circ$ , la principal diferencia se aprecia en la vista superior, en donde se observa que la zona de baja velocidad es más pequeña y próxima al heliostato.

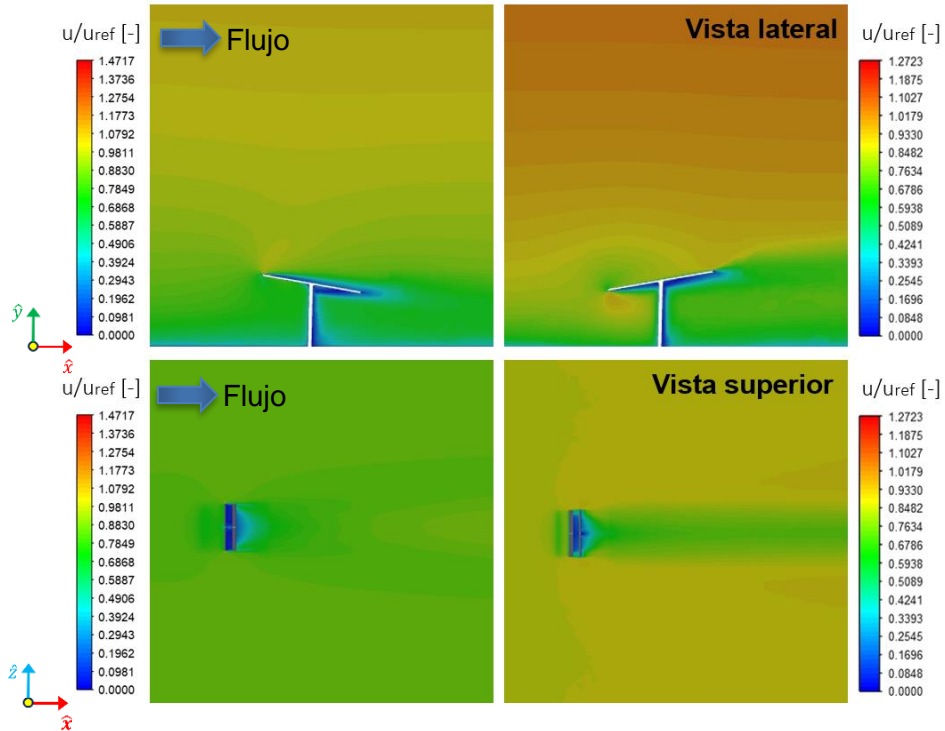


Figura 42. Contornos de velocidad  $\alpha=80^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

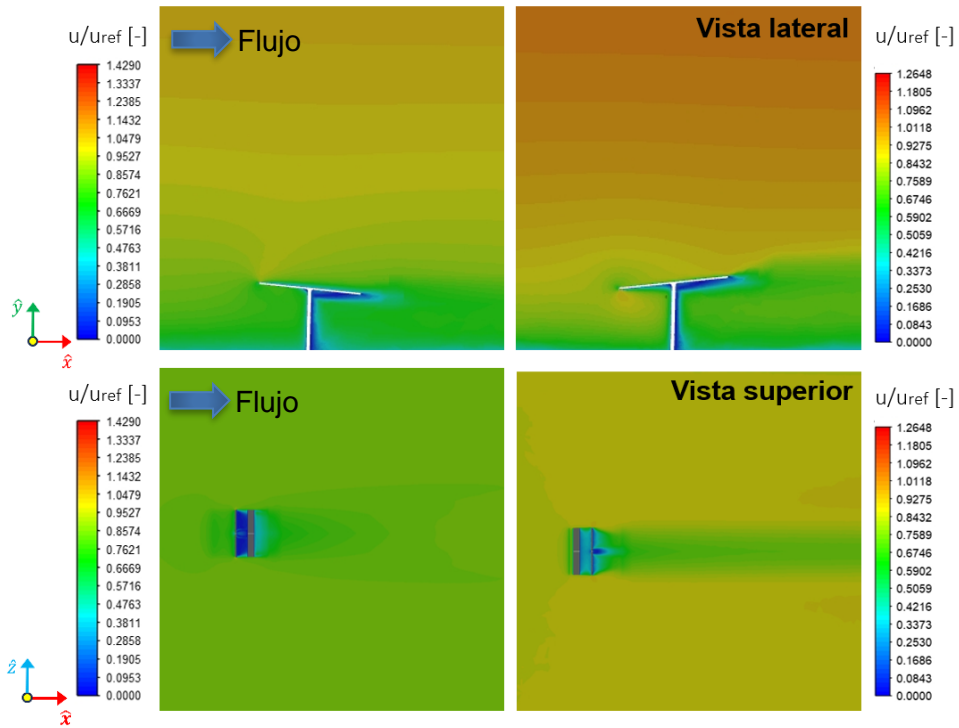


Figura 43. Contornos de velocidad  $\alpha=84^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

---

### 4.3.2. Contornos de presión total adimensional

En esta sección se muestran los campos de presión total para las mismas orientaciones y planos de los campos de velocidad. Las zonas de alta y baja presión en las partes superiores e inferiores del heliostato ayudan a explicar el comportamiento del coeficiente de sustentación, mientras que las diferencias de presión delante y atrás de la estructura, a los coeficientes de arrastre y sustentación. En la sección 4.2, se mostró que los coeficientes de arrastre y volcamiento presentan una reducción conforme se aumenta el ángulo de elevación, por lo que es de esperar que se presente una disminución en las diferencias de presión en las superficies delantera y trasera del heliostato.

En la Figura 44 se muestran los contornos de presión total para la posición más crítica desde el punto de vista aerodinámico ( $\alpha=0^\circ$ ) para ambas orientaciones de azimut. Se puede observar un comportamiento muy similar entre ambas orientaciones, con diferencias muy significativas entre la zona izquierda y derecha del heliostato, lo que se traduce en valores altos en los coeficientes de arrastre y volcamiento.

En la Figura 45 se presentan los contornos de presión total para una elevación de  $15^\circ$ . Para ambos ángulos azimutales se observa una presión alta donde el viento incide con el heliostato, con una mayor presión en la parte superior. Para  $\beta=0^\circ$  la presión alta es la cara posterior del heliostato, mientras que en  $\beta=180^\circ$  es en la cara superior.

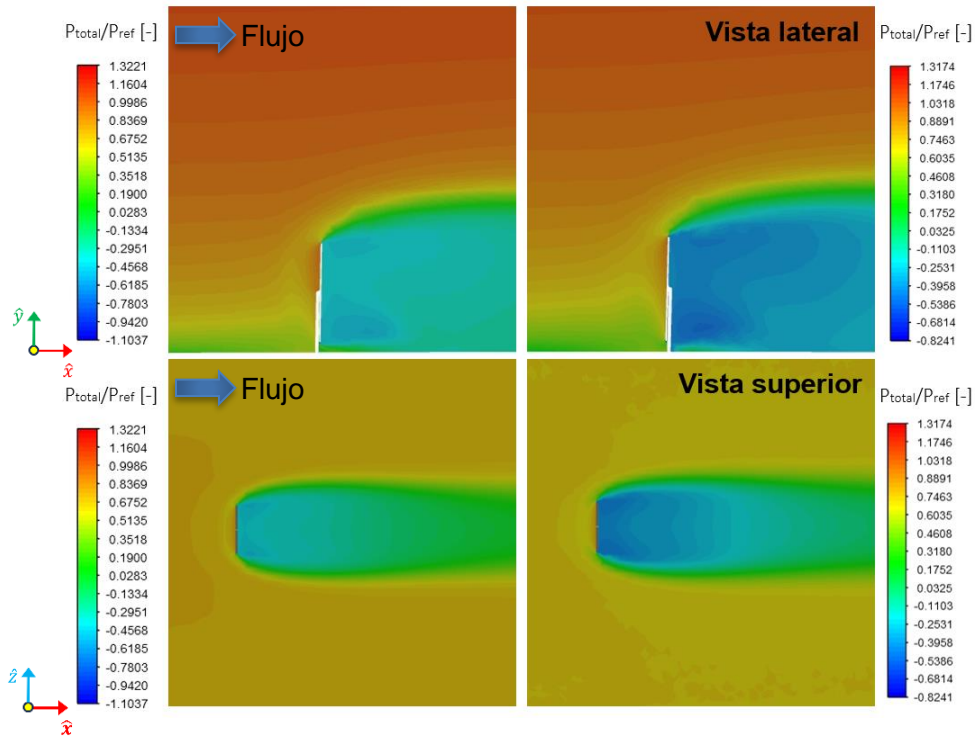


Figura 44. Contornos de presión  $\alpha=0^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

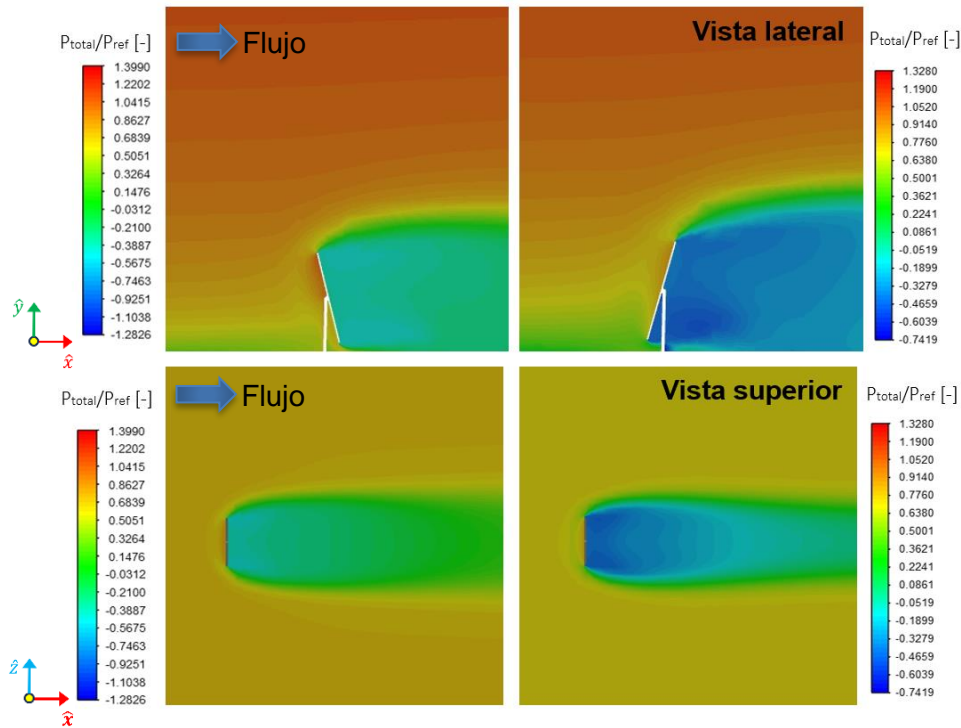
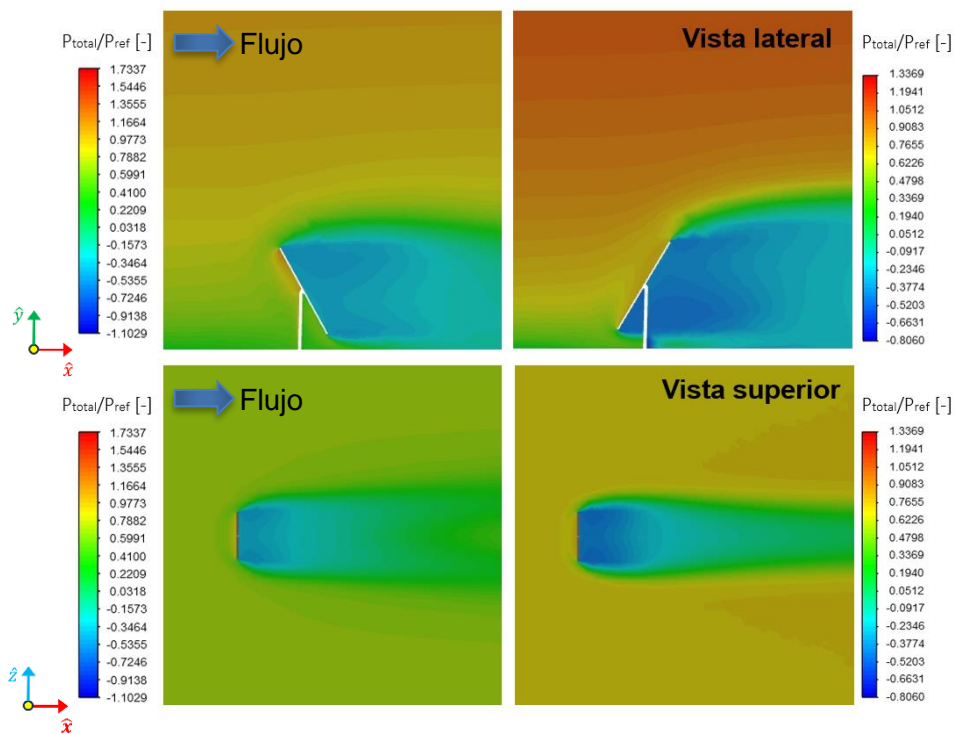


Figura 45. Contornos de presión  $\alpha=15^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

Los contornos de presión para una elevación de  $30^\circ$  se muestran en la Figura 46. Se puede observar una diferencia entre las presiones entre la parte superior e inferior de la superficie posterior para  $\beta=0^\circ$ , lo que no ocurre en  $\beta=180^\circ$ . Lo anterior explica las diferencias entre los valores de los coeficientes de sustentación y volcamiento entre ambos ángulos azimutales.



**Figura 46.** Contornos de presión  $\alpha=30^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

En las Figuras 47 y 48 se presentan los contornos de presión para  $\alpha=45^\circ$  y  $\alpha=60^\circ$  respectivamente, se puede observar en ambas figuras un comportamiento similar al descrito para  $\alpha=30^\circ$ , pero con un incremento en la presión sobre las superficies al aumentar el ángulo de elevación. En general, se presentan presiones mayores en el dominio de  $\beta=0^\circ$ .

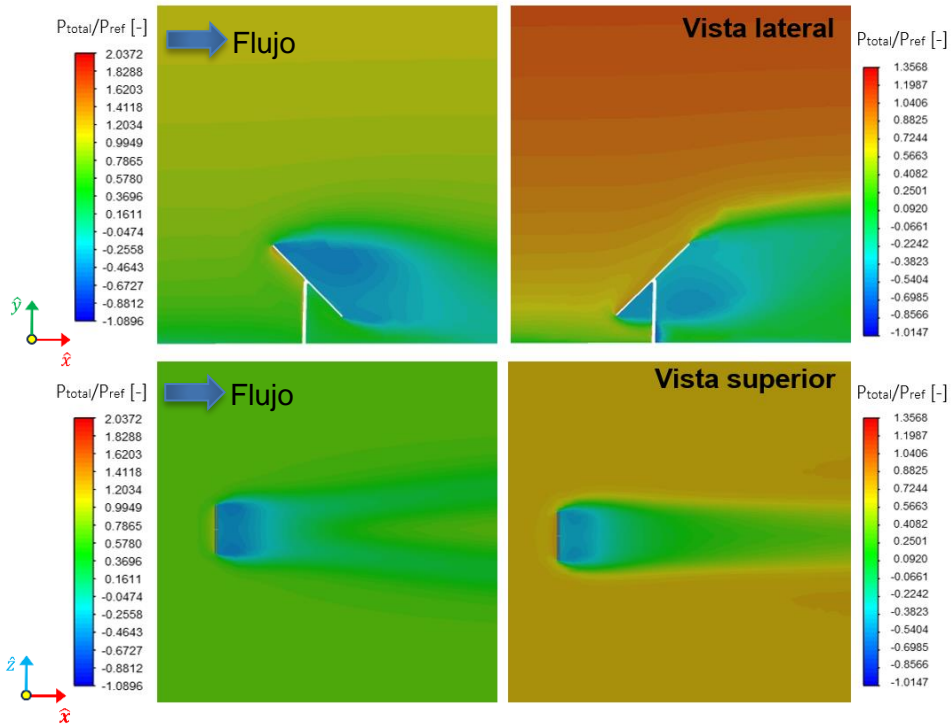


Figura 47. Contornos de presión  $\alpha=45^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

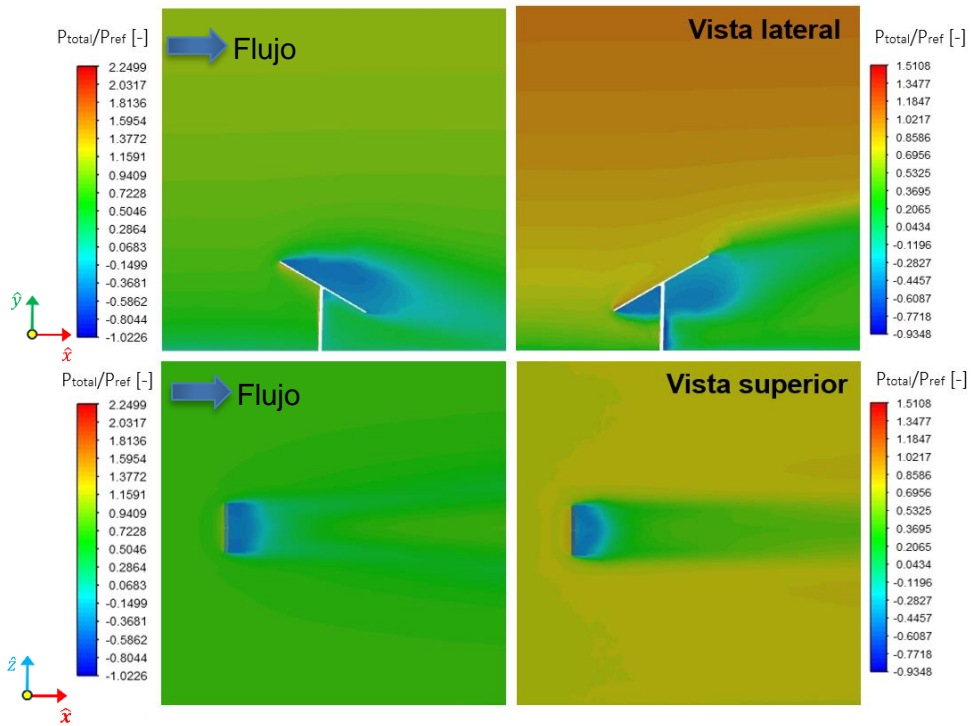
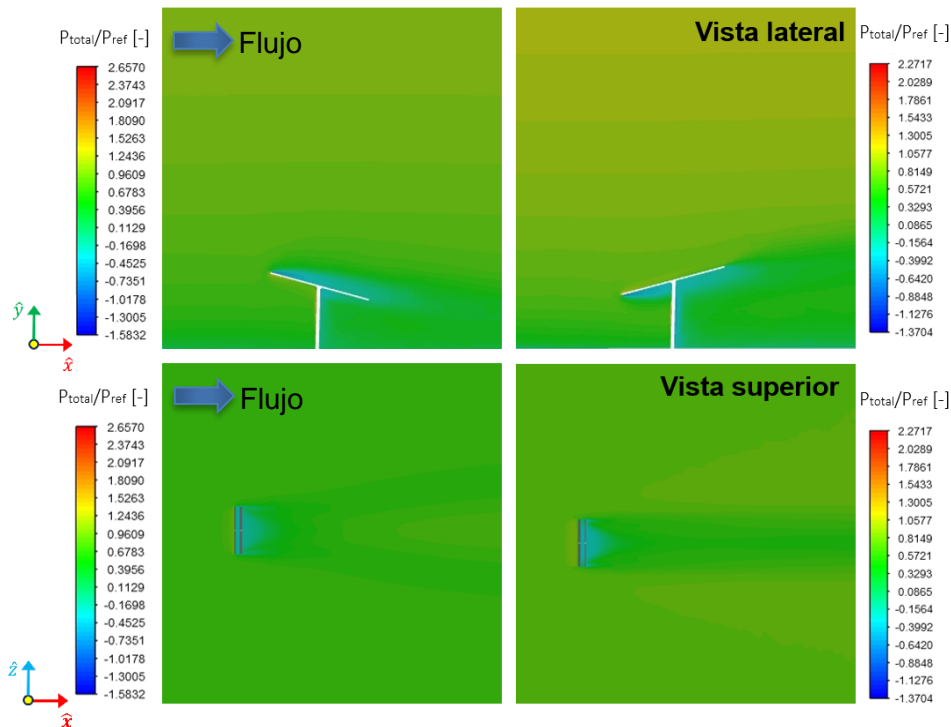


Figura 48. Contornos de presión  $\alpha=60^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

La Figura 49 muestra los contornos de presión para una elevación de  $75^\circ$ . Para  $\beta=0^\circ$ , la zona de baja presión se presenta en la cara superior del heliostato, mientras que lo opuesto ocurre  $\beta=180^\circ$ . Lo que explica la diferencia en los signos del coeficiente de sustentación que experimentan los heliostatos.



**Figura 49.** Contornos de presión  $\alpha=75^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

En las Figuras 50 y 51 se presentan los contornos de presión para  $\alpha=80^\circ$  y  $\alpha=84^\circ$  respectivamente. El comportamiento descrito para el ángulo de elevación de  $75^\circ$  se mantiene para ambos ángulos azimutales, por lo que las diferencias en el signo de los coeficientes de sustentación se mantienen.



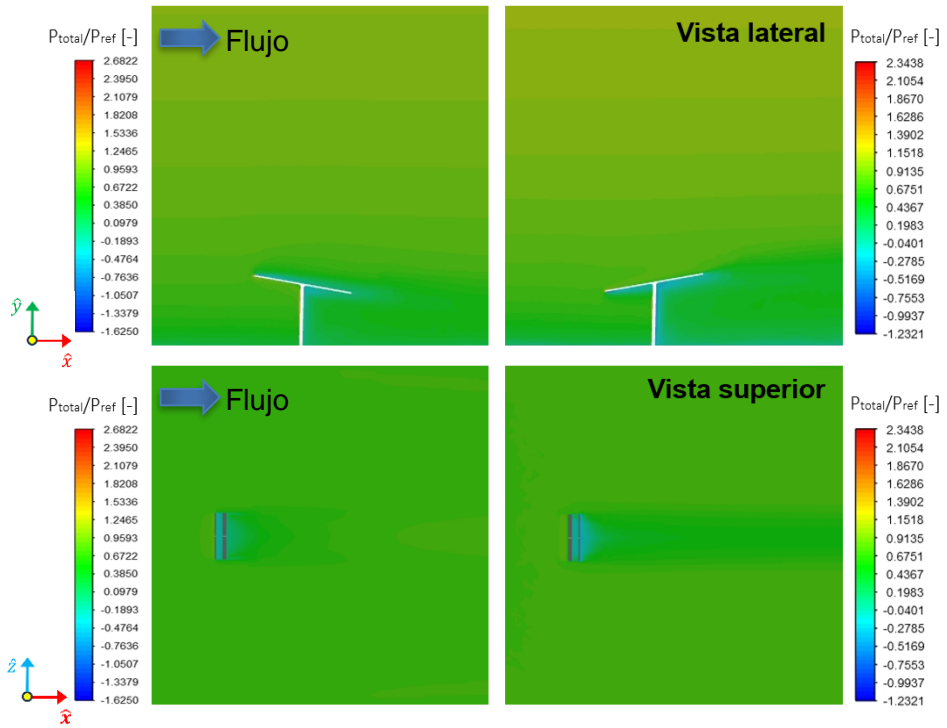


Figura 50. Contorno de presión  $\alpha=80^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).

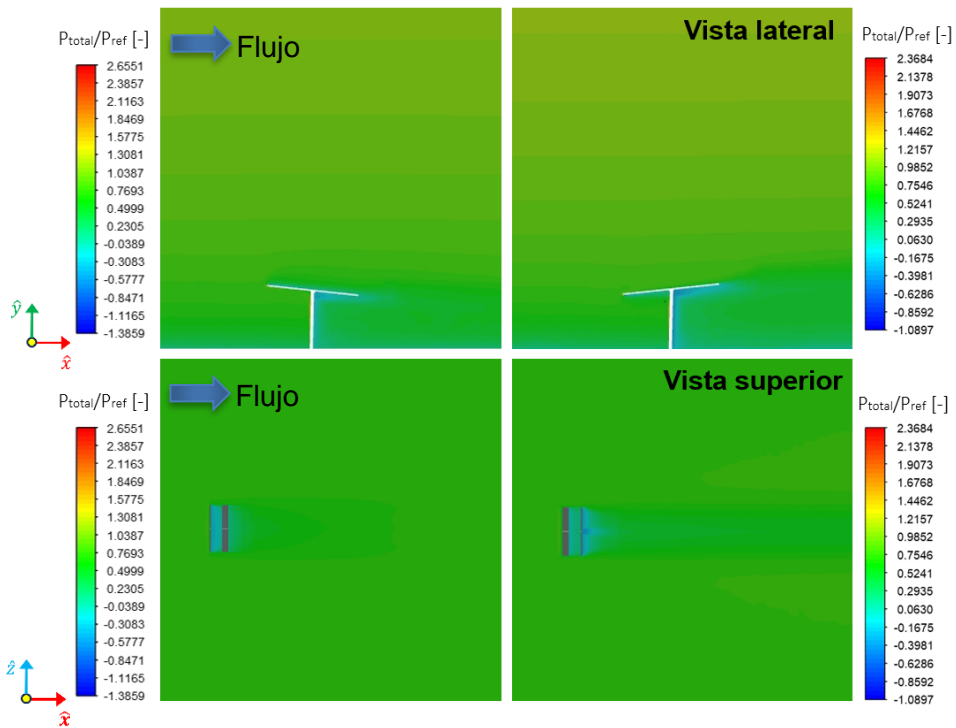


Figura 51. Contornos de presión  $\alpha=84^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).



### 4.3.3. Líneas de flujo relativas a la velocidad de referencia

En las Figuras 52, 53, 54 y 55 se muestran las líneas de flujo del aire para  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$  y  $\alpha=84^\circ$  respectivamente, en  $\beta=0^\circ$ . Se eligieron estos ángulos para demostrar más claramente el patrón de flujo del aire para las diferentes posiciones del heliostato.

En general se puede apreciar que las líneas de flujo son casi paralelas antes de llegar al heliostato, con un incremento en la rapidez del fluido con la altura. Cuando el aire choca con el heliostato, lo rodea por lo que las líneas de flujo cambian drásticamente de dirección. Una parte del fluido se dirige a la parte superior e inferior, así como por las caras laterales, generando un movimiento tridimensional. En la zona corriente arriba, se pueden observar remolinos que se forman en la parte posterior de la estructura para ángulos bajos ( $\alpha=0^\circ$  y  $\alpha=30^\circ$ ). Al aumentar el ángulo de elevación, se reduce la zona de estancamiento de fluido, lo que provoca una disminución en las diferencias de presión, que conduce a una reducción de los coeficientes de sustentación.

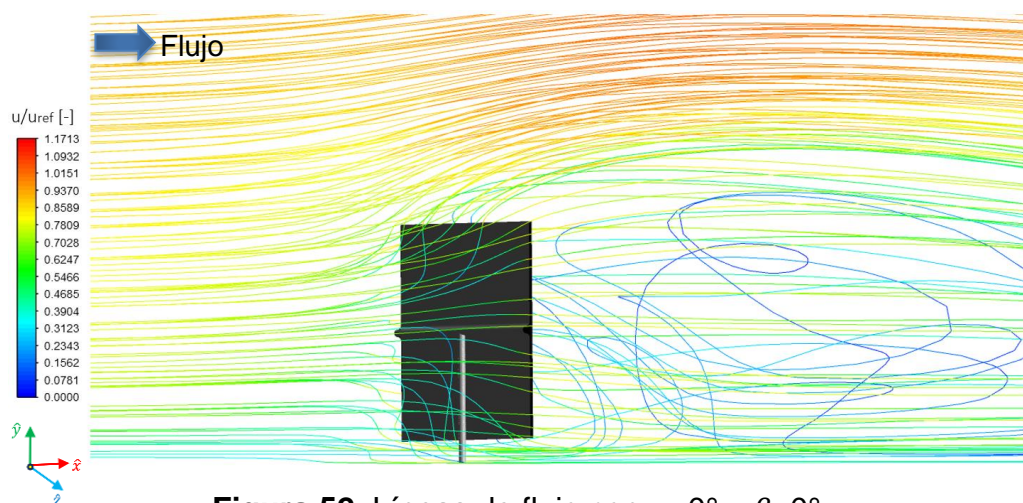


Figura 52. Líneas de flujo con  $\alpha=0^\circ$  y  $\beta=0^\circ$ .

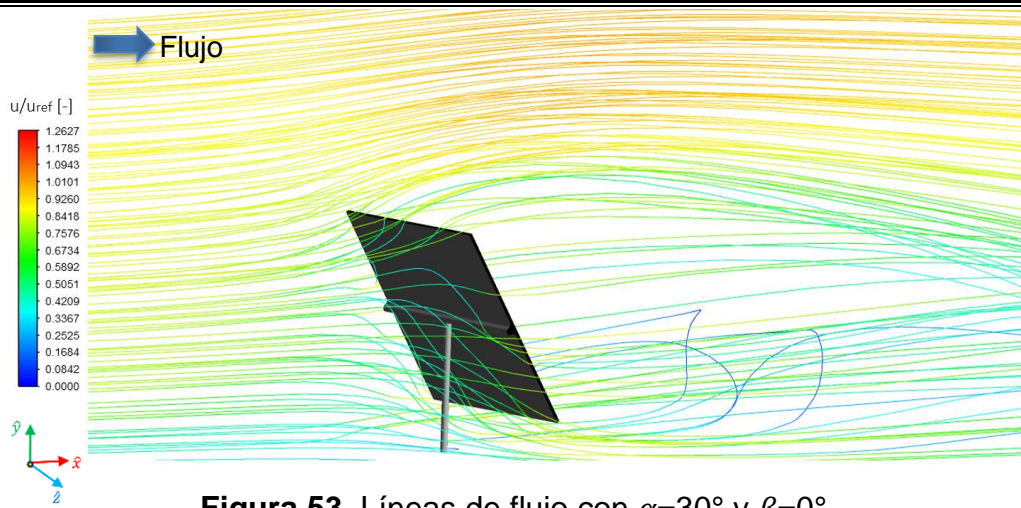


Figura 53. Líneas de flujo con  $\alpha=30^\circ$  y  $\beta=0^\circ$ .

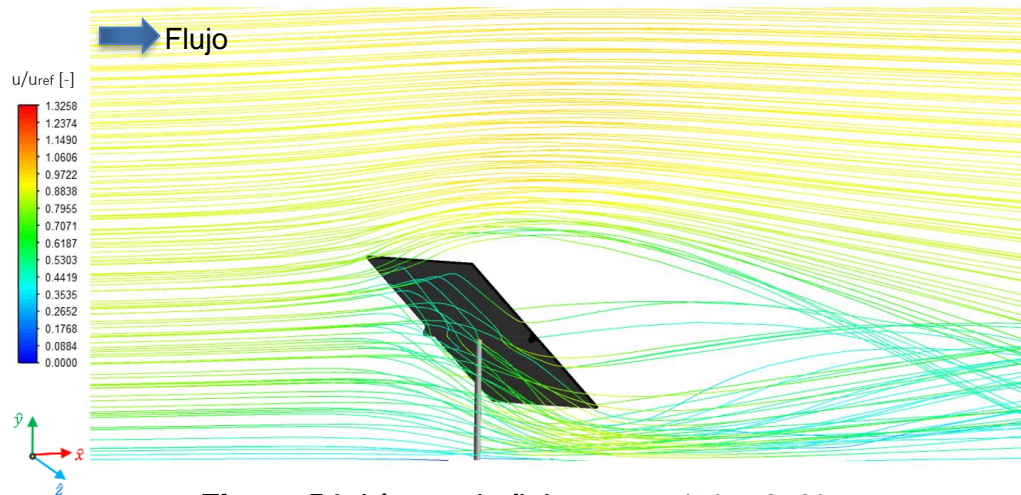


Figura 54. Líneas de flujo con  $\alpha=45^\circ$  y  $\beta=0^\circ$ .

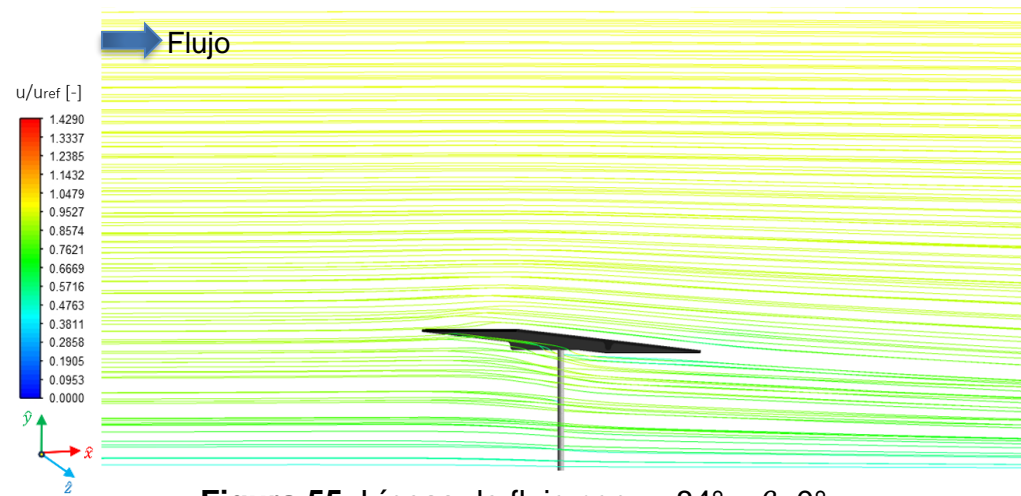
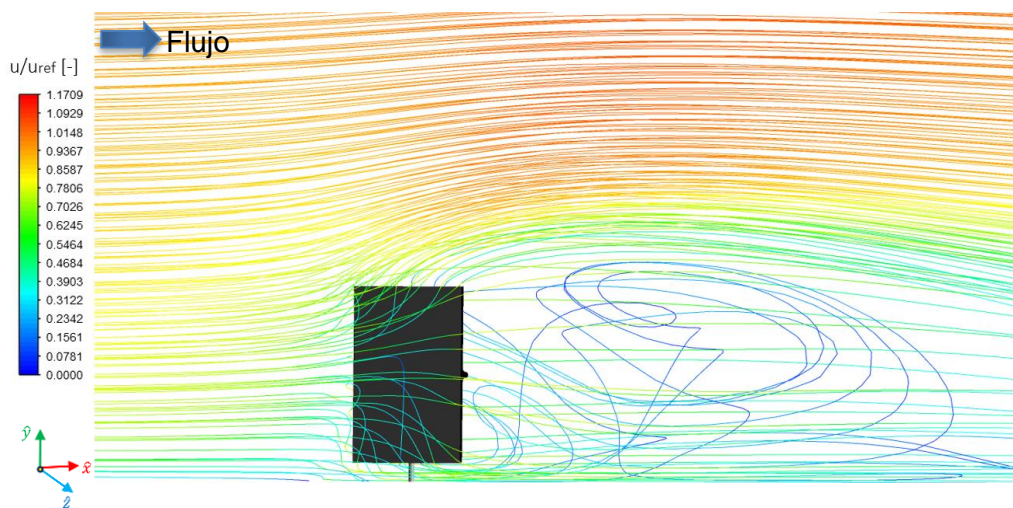


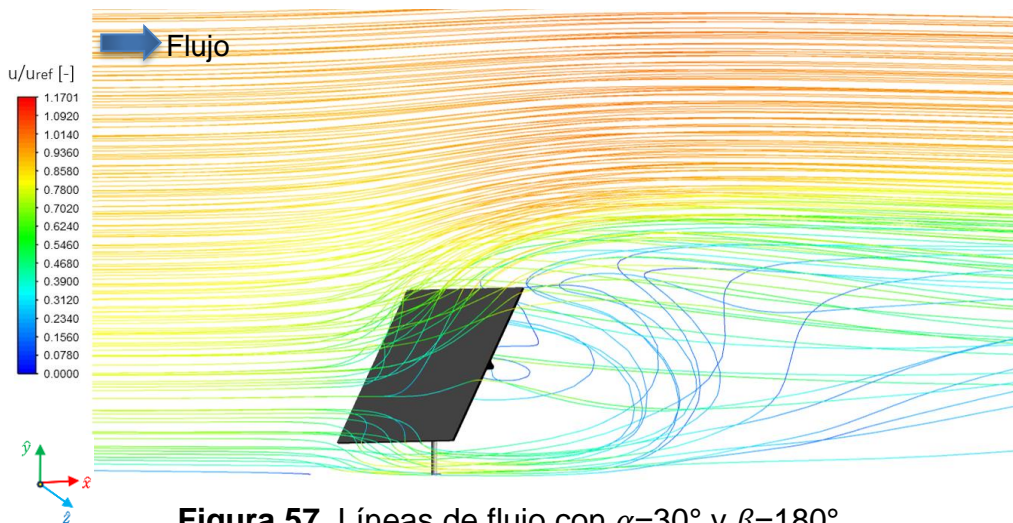
Figura 55. Líneas de flujo con  $\alpha=84^\circ$  y  $\beta=0^\circ$ .



En las Figuras 56-59 se presentan las líneas de flujo del aire para  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$  y  $\alpha=84^\circ$  respectivamente, en  $\beta=180^\circ$ . Se puede observar como el flujo incide en la cara frontal del heliostato, donde lo rodea en todas direcciones y se forman vórtices y remolinos en la parte posterior para  $\alpha=0^\circ$  y  $\alpha=30^\circ$ . Conforme se aumenta la elevación, el flujo se divide mayormente en dos direcciones, la parte superior e inferior del heliostato. En general el comportamiento es similar al descrito para  $\beta=0^\circ$ .



**Figura 56.** Líneas de flujo con  $\alpha=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$ .



**Figura 57.** Líneas de flujo con  $\alpha=30^\circ$  y  $\beta=180^\circ$ .

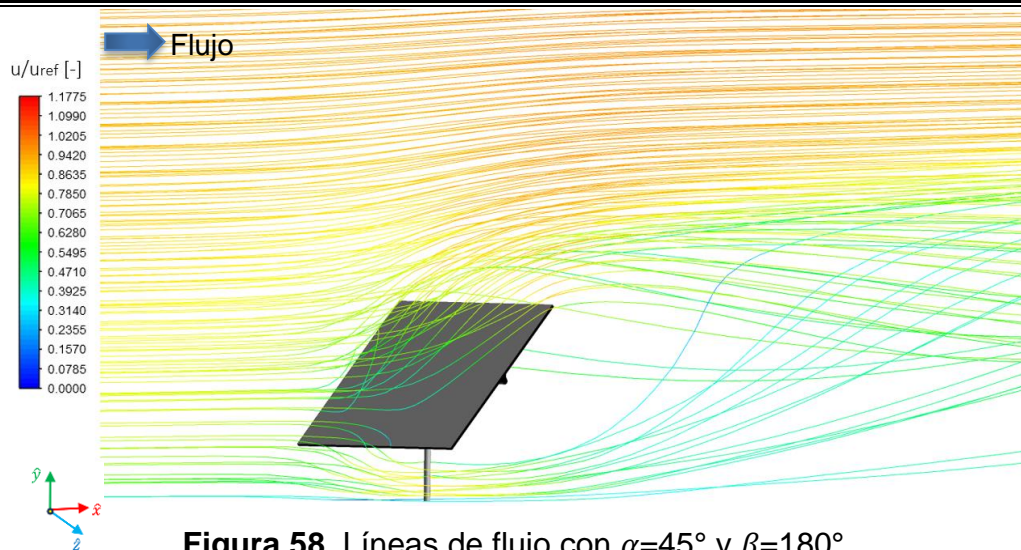


Figura 58. Líneas de flujo con  $\alpha=45^\circ$  y  $\beta=180^\circ$ .

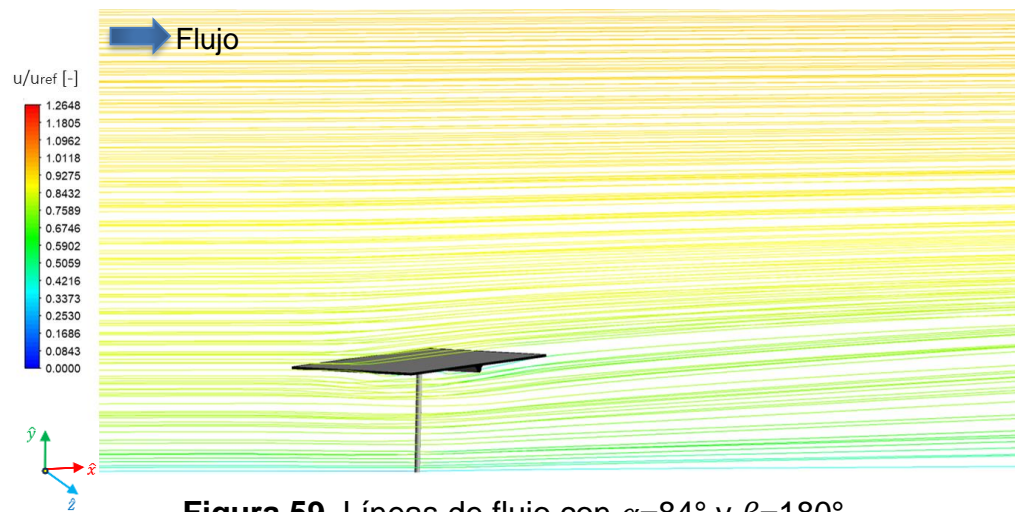


Figura 59. Líneas de flujo con  $\alpha=84^\circ$  y  $\beta=180^\circ$ .

#### 4.4 Estudio de heliostatos con curvatura de canteo esférico

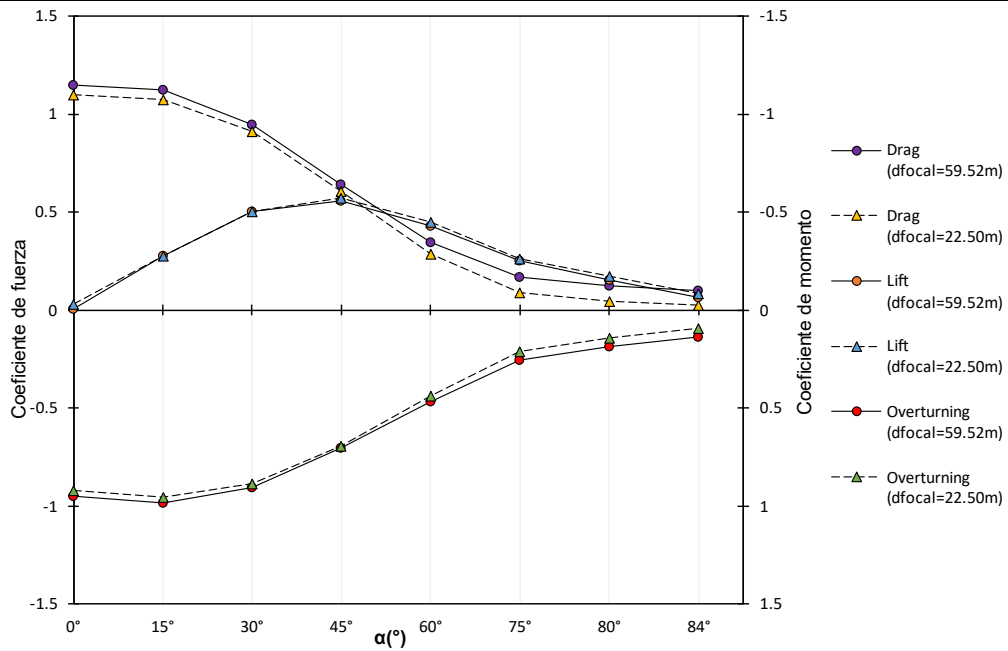
##### 4.4.2 Estudios sobre cargas aerodinámicas

Se realizaron estudios con dos curvaturas distintas, como fue descrito en la sección 3.1, bajo las mismas orientaciones y elevaciones del heliostato plano estudiado en las secciones 4.2 y 4.3. No se encontró ningún estudio de las cargas aerodinámicas del viento sobre heliostatos con curvatura, por lo que no fue posible comparar los resultados obtenidos con valores experimentales.

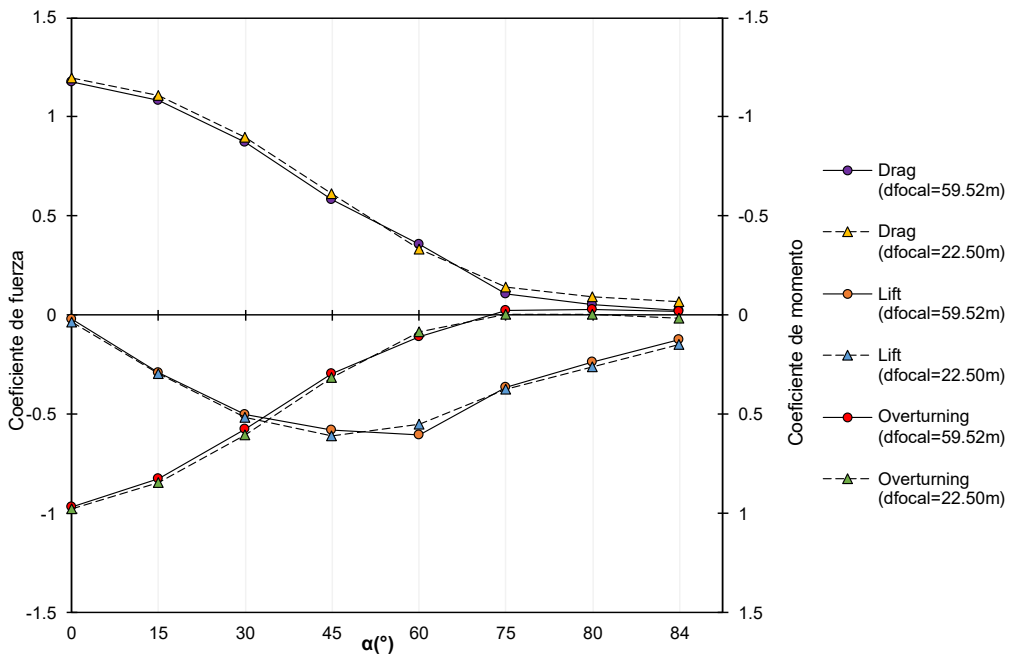
En las Figuras 60 y 61 (los valores puntuales se muestran en las Tablas 11-14) se compararon ambas curvaturas, para determinar cuánto difieren los coeficientes aerodinámicos y cuál de los dos heliostatos concentradores es el más afectado por las fuerzas inducidas por el flujo de aire. Se observó que en  $\beta=0^\circ$ , los coeficientes de arrastre fueron menores para el heliostato con mayor curvatura ( $d_{focal}=22.50$  m), los coeficientes de sustentación fueron ligeramente mayores para el heliostato con  $d_{focal}=59.52$  m y se obtuvieron valores muy similares de los coeficientes de volcamiento para ambos heliostatos. Se considera que la curvatura en las esquinas de los heliostatos provoca que se genere un flujo de viento más suave, lo que disminuye las fuerzas de arrastre y sustentación. En  $\beta=180^\circ$ , para ángulos de elevación entre  $0^\circ$  y  $\alpha=45^\circ$  se observó una mayor similitud entre ambas curvaturas. Se destaca que los coeficientes aerodinámicos fueron mayores para  $d_{focal}=22.50$  m en todas las elevaciones, con excepción de  $\alpha=60^\circ$ .

La Figura 62 muestra el efecto del ángulo azimutal sobre los coeficientes aerodinámicos para el heliostato con  $d_{focal}=22.50$  m. Se aprecia que el coeficiente de arrastre es ligeramente para  $\beta=180^\circ$ , con un comportamiento en forma de espejo para el coeficiente de sustentación, con fuerzas que tratan de levantar al heliostato para  $\beta=0^\circ$  y lo opuesto para  $\beta=180^\circ$ . En el caso de los coeficientes de volcamiento se aprecian diferencias muy significativas para los diferentes ángulos de elevación, en particular para valores entre 0 y  $30^\circ$ .

Las Figuras 63 muestra el efecto del ángulo azimutal sobre los coeficientes aerodinámicos para el heliostato con  $d_{focal}=59.62$  m. El comportamiento es similar al descrito para la Figura 57. Ciertas diferencias se aprecian en el comportamiento del coeficiente de arrastre en donde las principales diferencias ocurren para  $\alpha$  entre  $45$  y  $75^\circ$ .



**Figura 60.** Comparación de los coeficientes aerodinámicos de los heliostatos concentradores en  $\beta=0^\circ$ .



**Figura 61.** Comparación de los coeficientes aerodinámicos de los heliostatos concentradores en  $\beta=180^\circ$ .

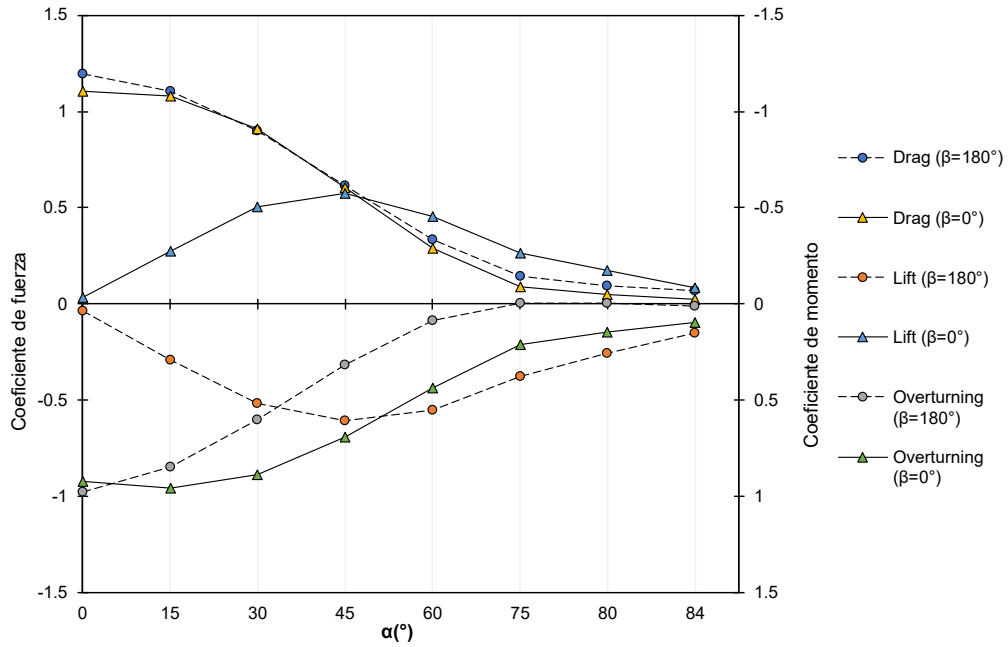


Figura 62. Comparación de azimut  $\beta=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  en  $d_{focal}=22.50$  m.

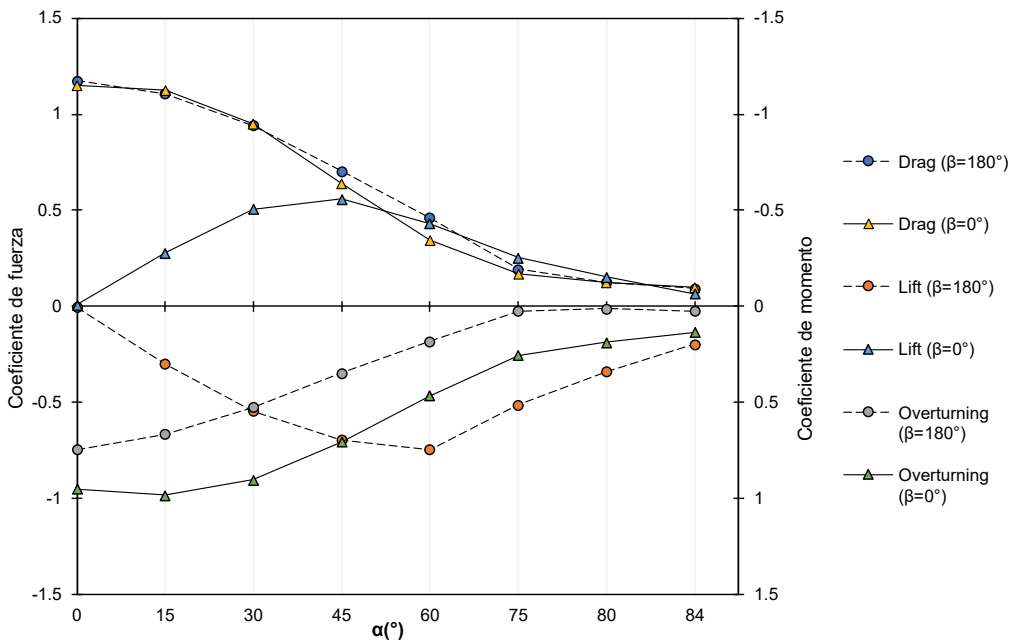


Figura 63. Comparación de azimut  $\beta=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  en  $d_{focal}=59.52$ m.

**Tabla 11.** Coeficientes aerodinámicos para  $\beta = 0^\circ$  y  $d_{focal}=22.50$  m.

| $\alpha$ | <i>Drag</i> | <i>Lift</i> | <i>Overturning</i> |
|----------|-------------|-------------|--------------------|
| 0°       | 1.103       | 0.032       | 0.922              |
| 15°      | 1.078       | 0.276       | 0.956              |
| 30°      | 0.912       | 0.506       | 0.886              |
| 45°      | 0.606       | 0.573       | 0.693              |
| 60°      | 0.288       | 0.452       | 0.439              |
| 75°      | 0.091       | 0.262       | 0.210              |
| 80°      | 0.048       | 0.172       | 0.144              |
| 84°      | 0.024       | 0.085       | 0.094              |

**Tabla 12.** Coeficientes aerodinámicos para  $\beta = 0^\circ$  y  $d_{focal}=59.52$  m.

| $\alpha$ | <i>Drag</i> | <i>Lift</i> | <i>Overturning</i> |
|----------|-------------|-------------|--------------------|
| 0°       | 1.151       | 0.008       | 0.951              |
| 15°      | 1.124       | 0.277       | 0.984              |
| 30°      | 0.949       | 0.506       | 0.904              |
| 45°      | 0.642       | 0.559       | 0.705              |
| 60°      | 0.347       | 0.430       | 0.466              |
| 75°      | 0.168       | 0.254       | 0.256              |
| 80°      | 0.124       | 0.153       | 0.187              |
| 84°      | 0.099       | 0.066       | 0.136              |



**Tabla 13.** Coeficientes aerodinámicos para  $\beta = 180^\circ$  y  $d_{focal} = 22.50$  m.

| $\alpha$ | <i>Drag</i> | <i>Lift</i> | <i>Overturning</i> |
|----------|-------------|-------------|--------------------|
| 0°       | 1.196       | -0.036      | 0.975              |
| 15°      | 1.106       | -0.293      | 0.845              |
| 30°      | 0.899       | -0.515      | 0.602              |
| 45°      | 0.613       | -0.607      | 0.315              |
| 60°      | 0.335       | -0.551      | 0.085              |
| 75°      | 0.142       | -0.375      | -0.003             |
| 80°      | 0.095       | -0.259      | -0.002             |
| 84°      | 0.071       | -0.149      | 0.014              |

**Tabla 14.** Coeficientes aerodinámicos para  $\beta = 180^\circ$  y  $d_{focal} = 59.52$  m.

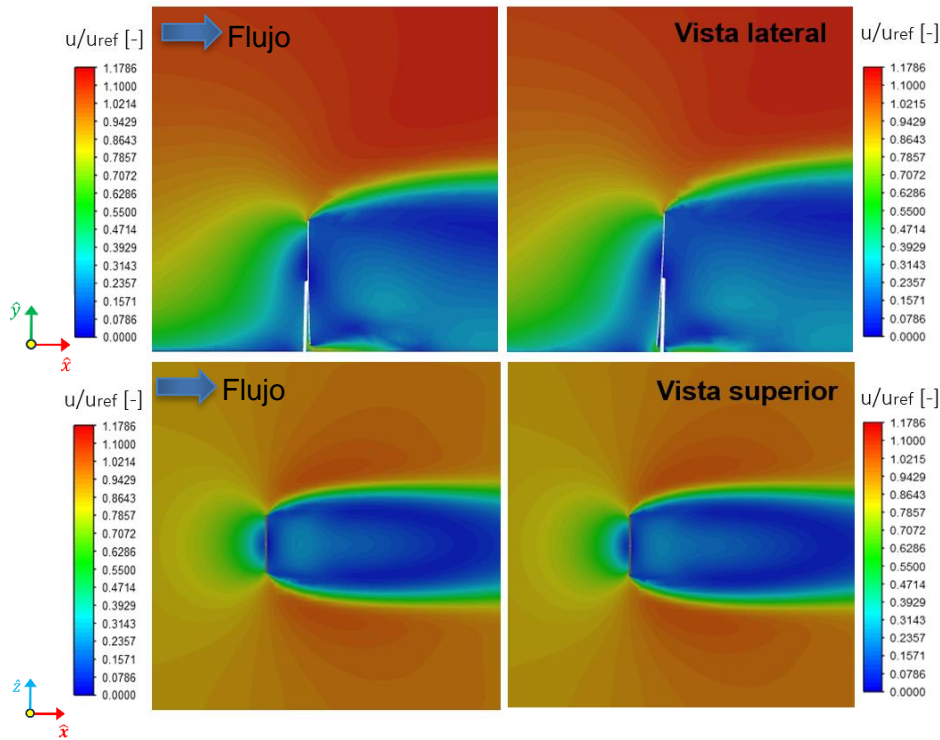
| $\alpha$ | <i>Drag</i> | <i>Lift</i> | <i>Overturning</i> |
|----------|-------------|-------------|--------------------|
| 0°       | 1.177       | -0.020      | 0.967              |
| 15°      | 1.081       | -0.288      | 0.823              |
| 30°      | 0.871       | -0.500      | 0.576              |
| 45°      | 0.584       | -0.579      | 0.293              |
| 60°      | 0.357       | -0.605      | 0.110              |
| 75°      | 0.107       | -0.363      | -0.023             |
| 80°      | 0.052       | -0.236      | -0.029             |
| 84°      | 0.023       | -0.123      | -0.018             |

#### 4.4.3. Contornos de velocidad adimensional

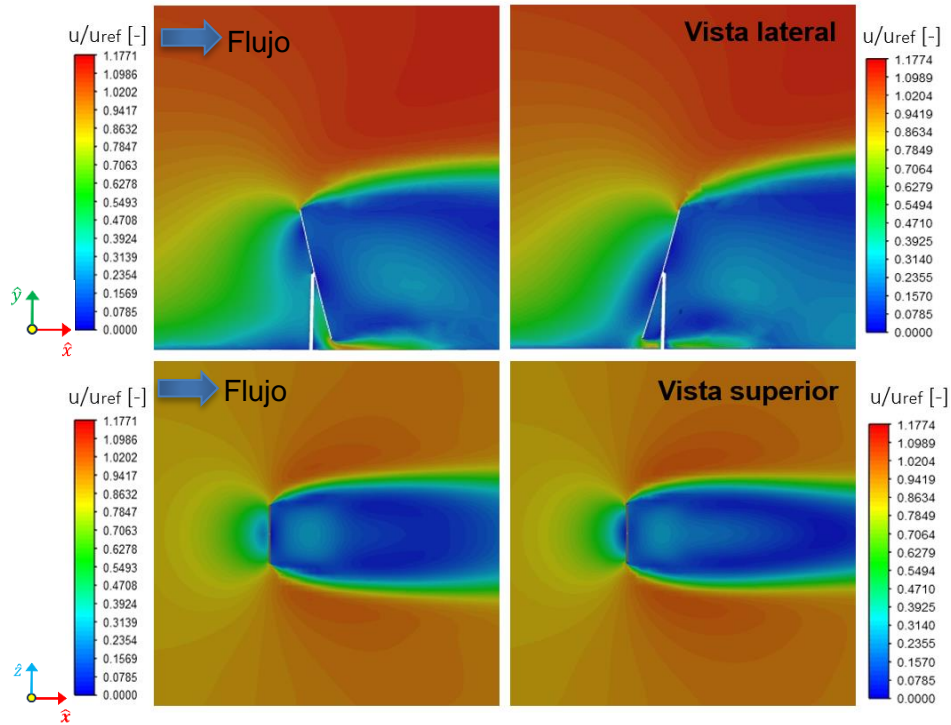
A continuación, se muestran los contornos de velocidad para todas las orientaciones y elevaciones, en vistas XY y XZ en  $y = y_{LCHC}$ , donde se puede

apreciar con más claridad el movimiento del aire y los efectos de la curvatura en los heliostatos. En la Figura 64 se muestran los contornos de velocidad del aire para el heliostato concentrador con una distancia focal de 22.50 m y  $\alpha=0^\circ$ . Se aprecia una gran similitud entre los dos ángulos azimutales.

La Figura 65 se presentan los contornos de velocidad para un ángulo de elevación de  $15^\circ$ . Se pueden observar de alta velocidad en la esquina inferior del heliostato en ambos valores de  $\beta$ . A continuación, se describen las diferencias entre los contornos de velocidad. En  $\beta=0^\circ$ , se aprecia una zona de baja velocidad en la parte superior de la superficie posterior del heliostato. Para  $\beta=180^\circ$  la zona de baja velocidad se presenta en casi toda la superficie frontal del heliostato, con excepción una pequeña zona cerca de la esquina superior.

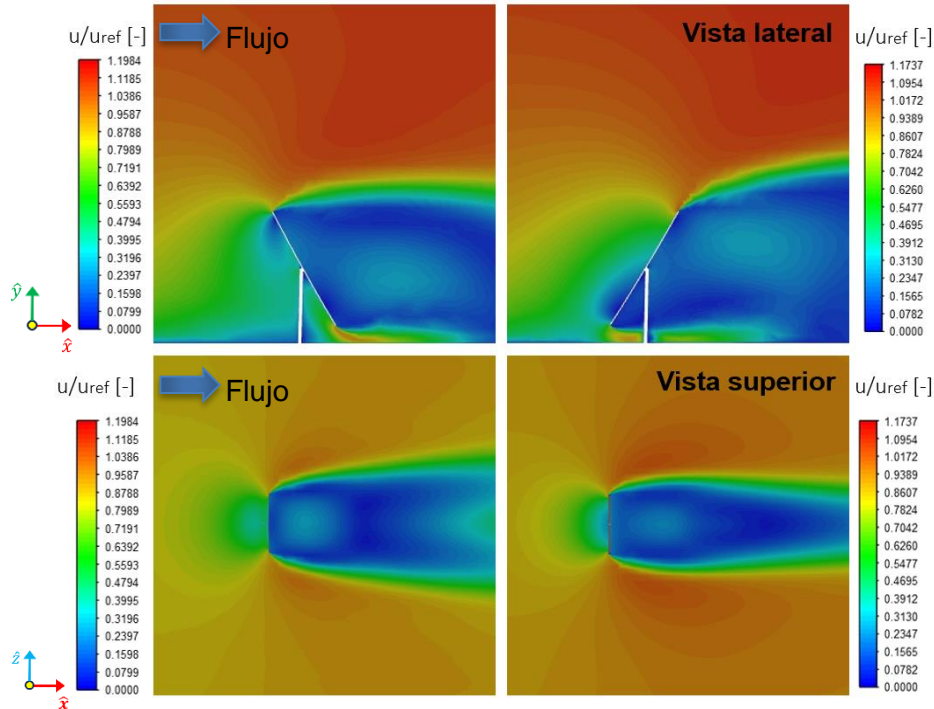


**Figura 64.** Contornos de velocidad  $\alpha=0^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).



**Figura 65.** Contornos de velocidad  $\alpha=15^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).

En la Figura 66 se comparan los contornos de velocidad en ambas orientaciones de azimut para  $\alpha=30^\circ$ . Se pueden observar zonas de baja velocidad de manera similar a los descrito  $\alpha=0^\circ$ , pero ahora son de menor tamaño. Para este ángulo de elevación la zona entre el heliostato y el pedestal presenta una diferencia más acentuada, para  $\beta=0^\circ$  la rapidez del fluido es considerablemente mayor a la observada para  $\beta=180^\circ$ , además de ubicarse en lugares opuestos.



**Figura 66.** Contornos de velocidad  $\alpha=30^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).

En las Figuras 67 y 68 se observan los contornos de velocidad para las elevaciones de  $45^\circ$  y  $60^\circ$ . Se aprecia que las zonas de baja velocidad descritas previamente se han vuelto muy pequeñas para  $\alpha=45^\circ$  y desaparecen cuando  $\alpha=60^\circ$ . La mayor diferencia entre los contornos de velocidad se sigue presentando en el espacio que se presenta entre el pedestal y la superficie del heliostato. En la vista superior también se observa un comportamiento diferente en la estela que se forma para  $\beta=0^\circ$ , ya que esta se ensancha y presenta una región de mayor velocidad al alejarse del heliostato. La vista superior muestra que al aumentar el ángulo de elevación la zona de baja velocidad posterior al heliostato se va reduciendo.

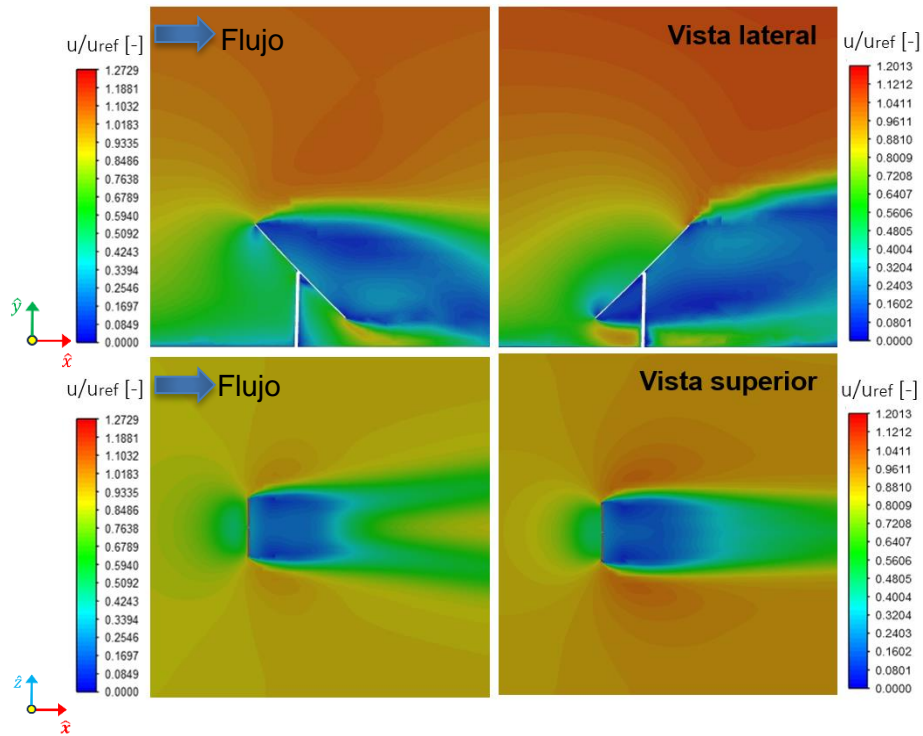


Figura 67. Contornos de velocidad  $\alpha=45^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).

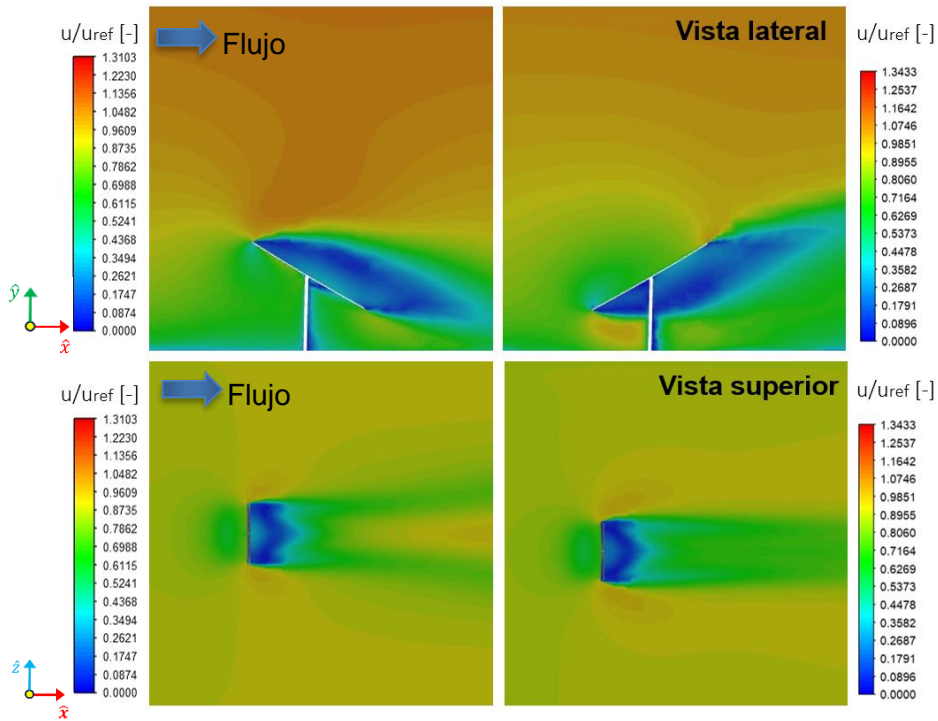
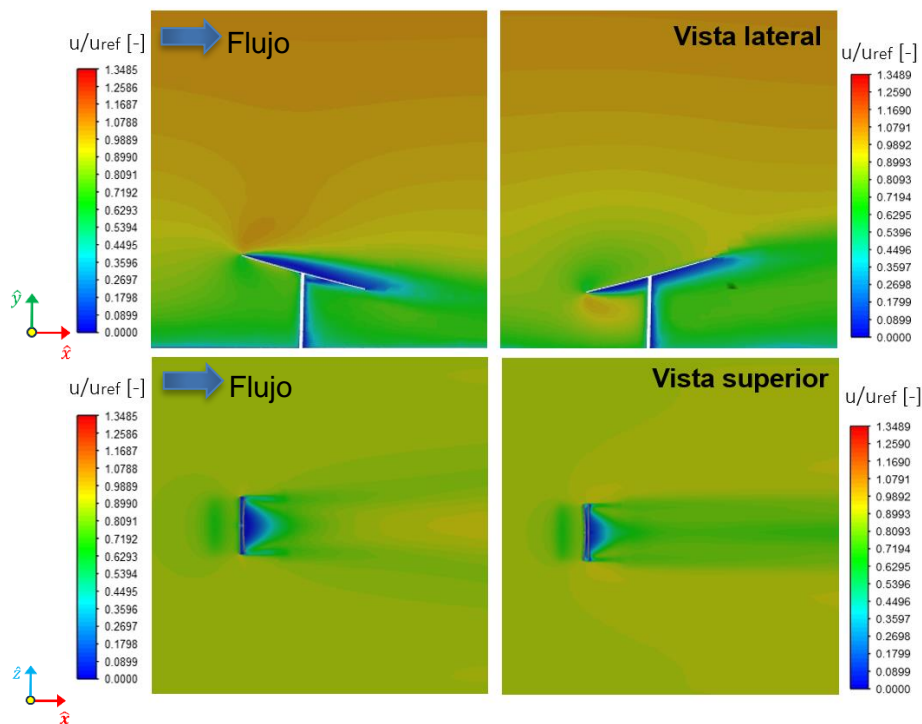


Figura 68. Contornos de velocidad  $\alpha=60^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).

En las Figuras 69, 70 y 71 se presentan los contornos de velocidad para  $\alpha=75^\circ$ ,  $\alpha=80^\circ$  y  $\alpha=84^\circ$  respectivamente. Se pueden apreciar zonas de baja velocidad en las superficies del heliostato. En la cara superior para  $\beta=0^\circ$  y en la inferior para  $\beta=180^\circ$  conforme aumenta la elevación, formándose un flujo más suave y uniforme. Estas zonas se van reduciendo al aumentar el ángulo de elevación. Las vistas superiores muestran que las zonas de baja velocidad posteriores al heliostato (estelas) se siguen reduciendo de manera significativa al aumentar el ángulo de elevación para ambos valores del ángulo azimutal.



**Figura 69.** Contornos de velocidad  $\alpha=75^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).



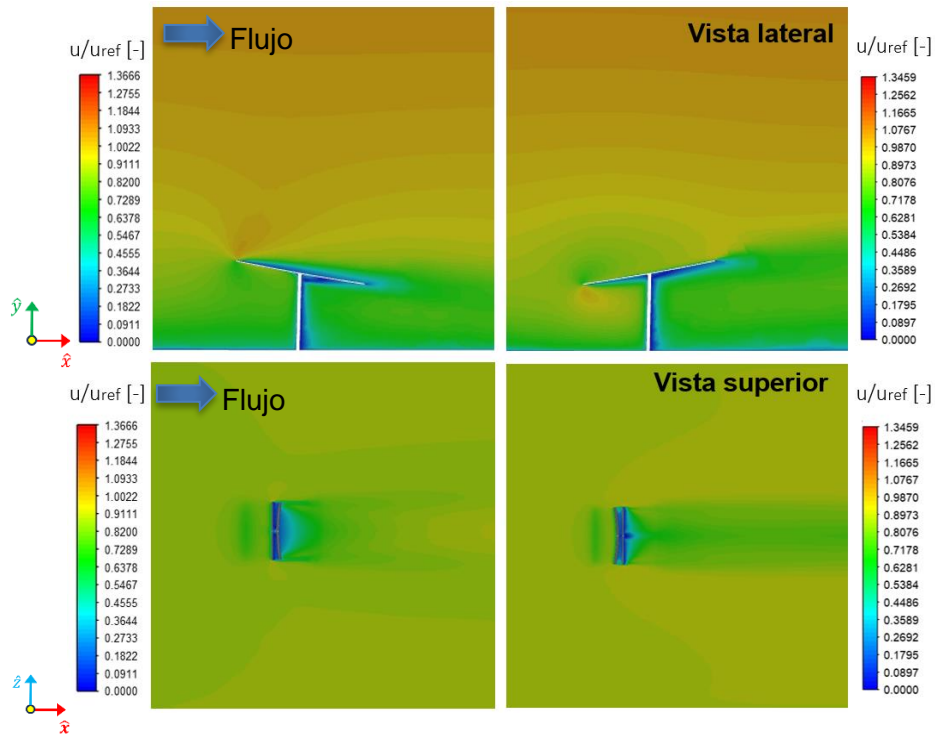


Figura 70. Contornos de velocidad  $\alpha=80^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).

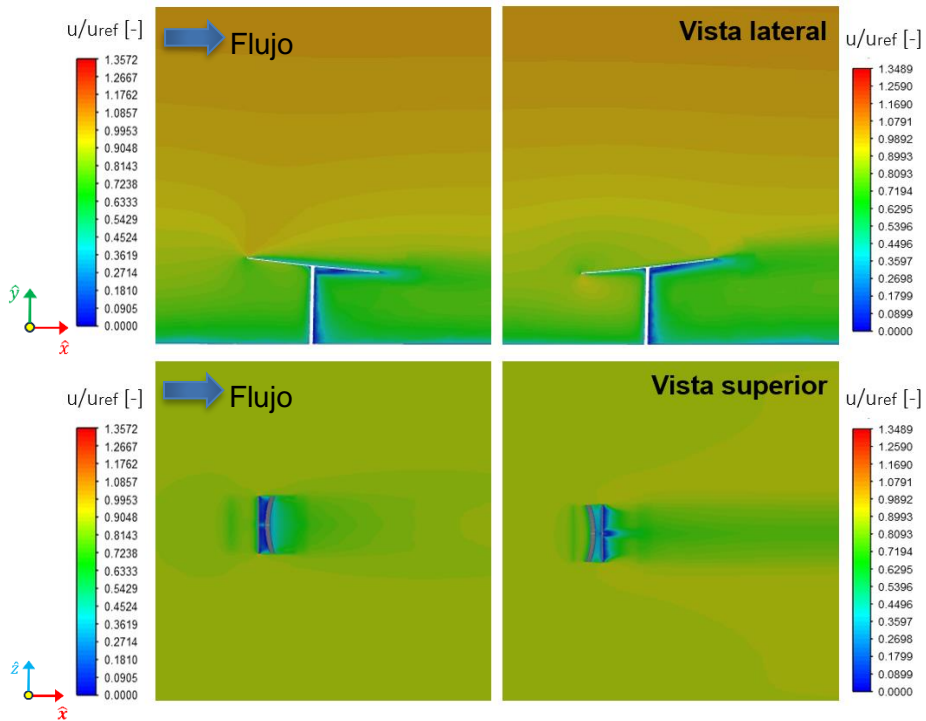
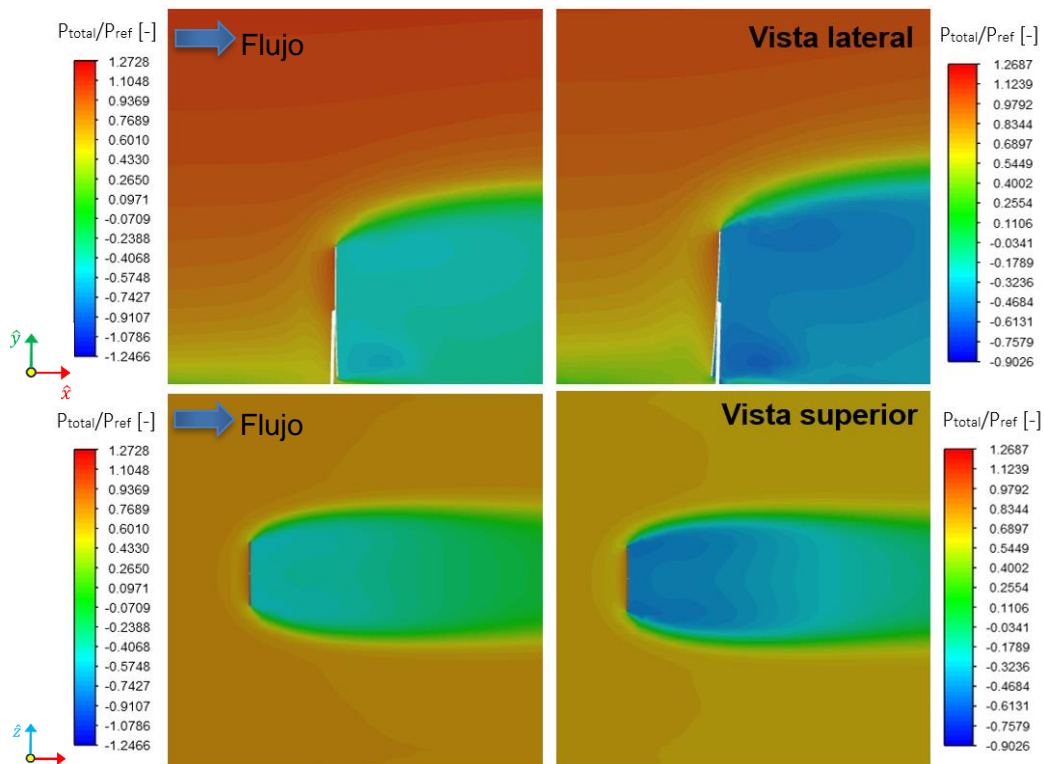


Figura 71. Contornos de velocidad  $\alpha=84^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.).  
( $d_{focal}=22.50$  m).

#### 4.4.4. Contornos de presión total adimensional

En esta sección se muestran los contornos de presión total para los heliostatos concentradores en  $\beta=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$ .

En la Figura 72 se observan los contornos de presión para un heliostato concentrador con una distancia focal de 22.50 m en posición vertical. Se presentan una zona de alta presión en la superficie en donde el flujo incide sobre el heliostato y una zona de baja presión en la parte posterior, en la zona opuesta a la dirección del flujo. En la zona posterior, las presiones son menores en el caso de  $\beta=180^\circ$ .

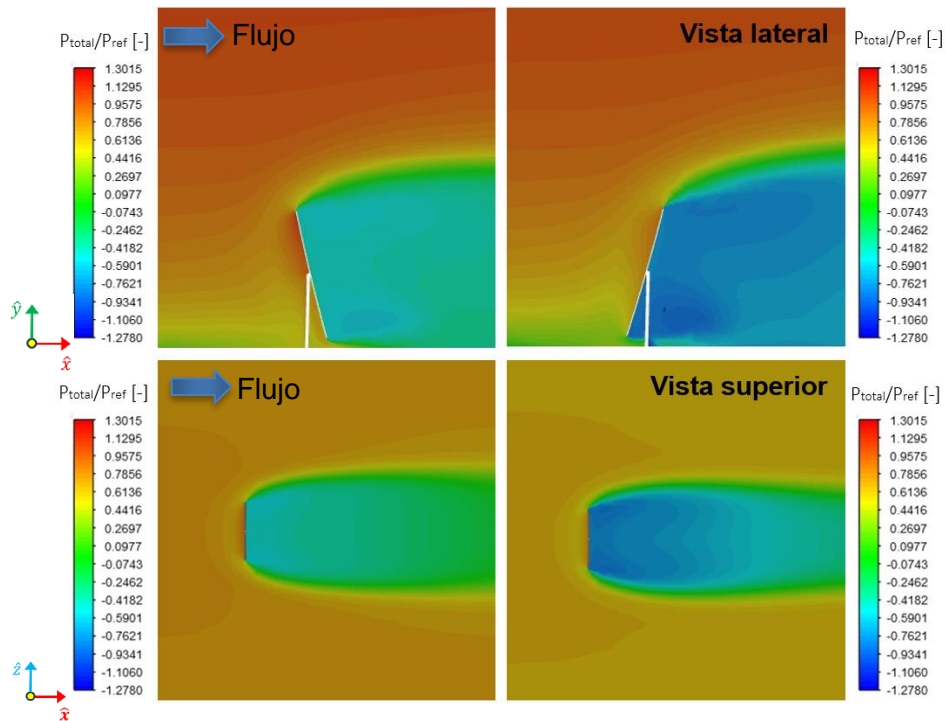


**Figura 72.** Contornos de presión  $\alpha=0^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).

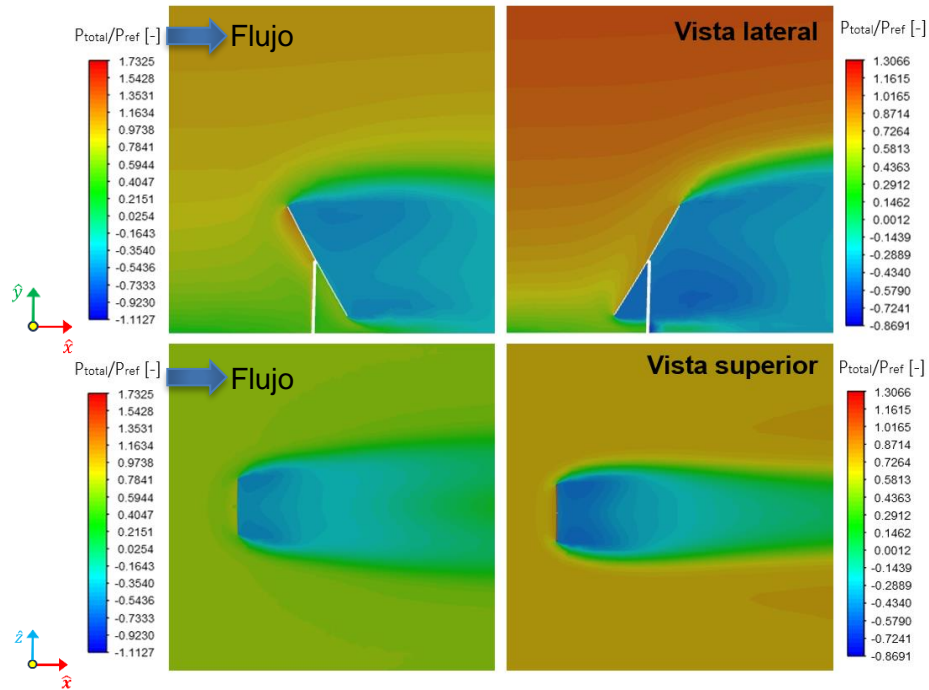


En las Figuras 73 y 74 se muestran los contornos de presión para las elevaciones de  $15^\circ$  y  $30^\circ$ . Se observa como la zona de alta presión se concentra en la mitad superior del heliostato, para  $\beta=0^\circ$  en la superficie posterior y en  $\beta=180^\circ$  en la superficie anterior. La presión total es ligeramente mayor en  $\beta=0^\circ$ , mientras que los valores de baja presión son menores en  $\beta=180^\circ$ .

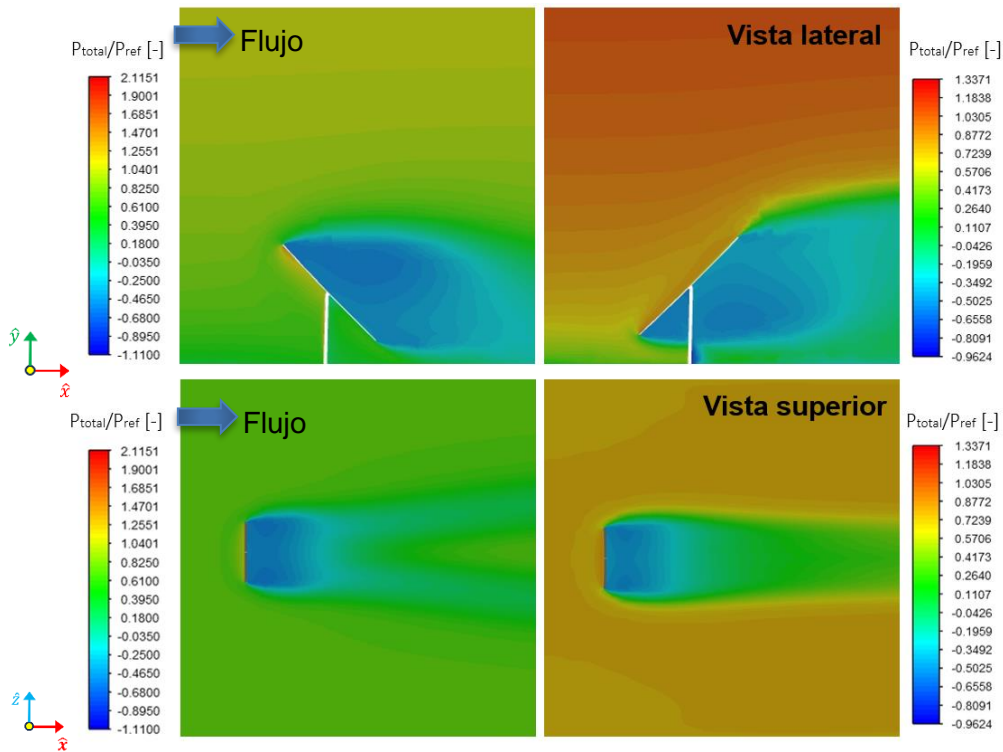
La Figura 75 muestra los contornos de presión para  $\alpha=45^\circ$ , se observan notables diferencias entre ambas orientaciones azimutales. Se aprecia un área de alta presión en la esquina superior del heliostato (superficie posterior) para  $\beta=0^\circ$ , lo que provoca que la fuerza de sustentación sea mayor en esta elevación. En  $\beta=180^\circ$ , la zona de alta presión está en la superficie superior, lo que explica que el coeficiente de sustentación tenga un signo negativo.



**Figura 73.** Contornos de presión  $\alpha=15^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).



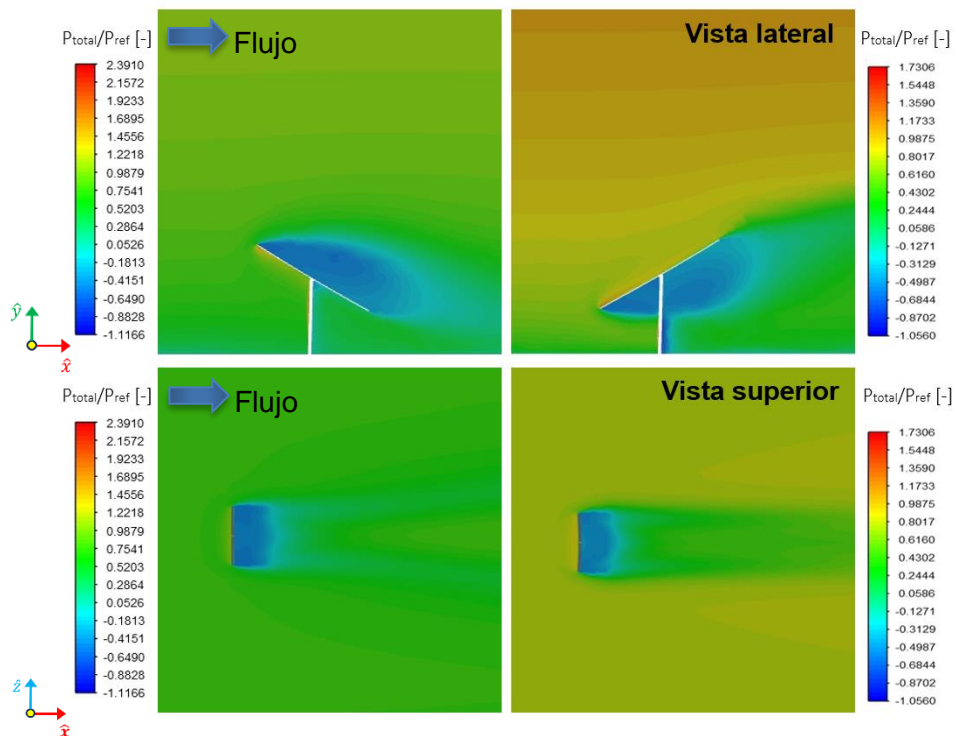
**Figura 74.** Contornos de presión  $\alpha=30^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).



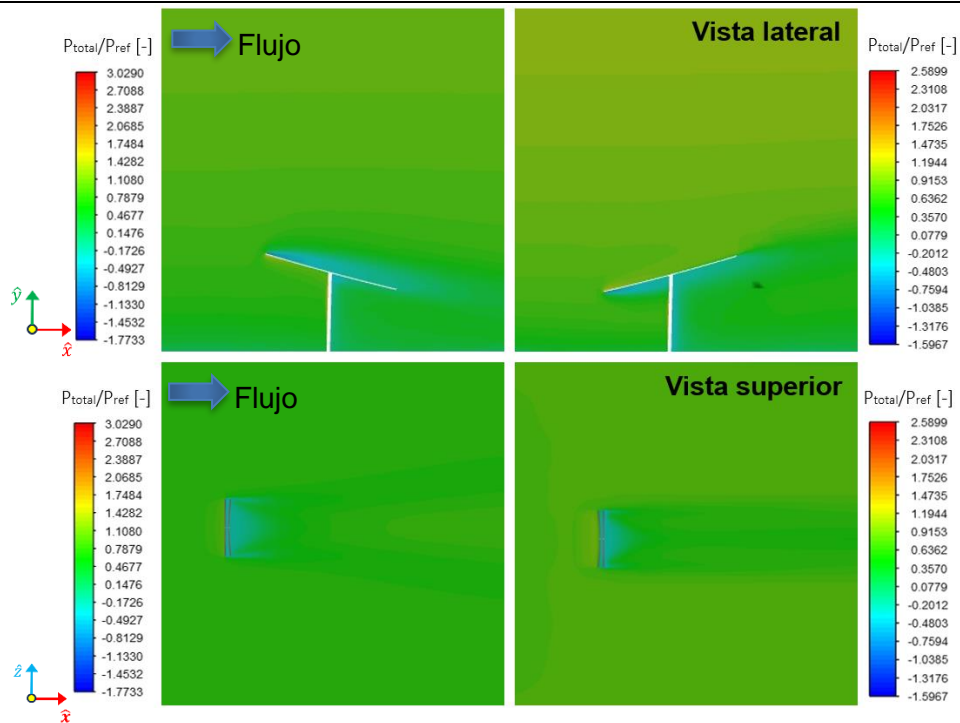
**Figura 75.** Contornos de presión  $\alpha=45^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).

En la Figura 76 y 77 se presentan los contornos de presión a  $60^\circ$  y  $75^\circ$  de elevación. En ambos ángulos azimutales el comportamiento es similar al descrito para  $\alpha=45^\circ$ , pero la diferencia de presión entre las superficies posterior y anterior se va reduciendo con el aumento del ángulo de elevación, lo que reduce los coeficientes de sustentación.

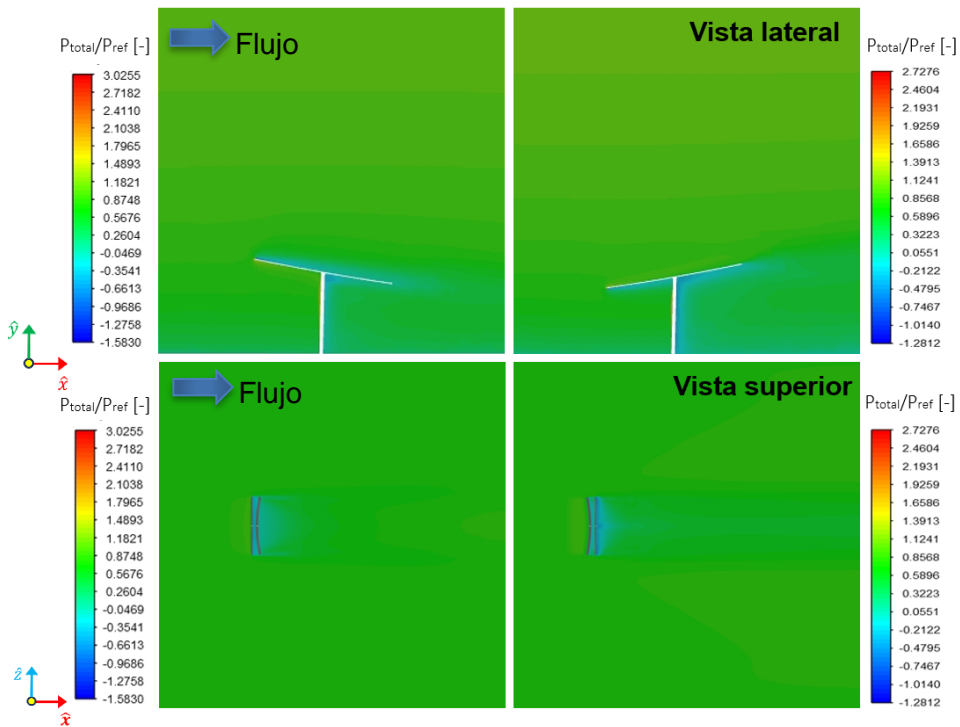
Para los ángulos de elevación de  $80^\circ$  y  $84^\circ$  (Figuras 78 y 79) se aprecia que las diferencias de presión son considerablemente menores a los otros ángulos de elevación, lo que se refleja en valores más pequeños de los coeficientes aerodinámicos.



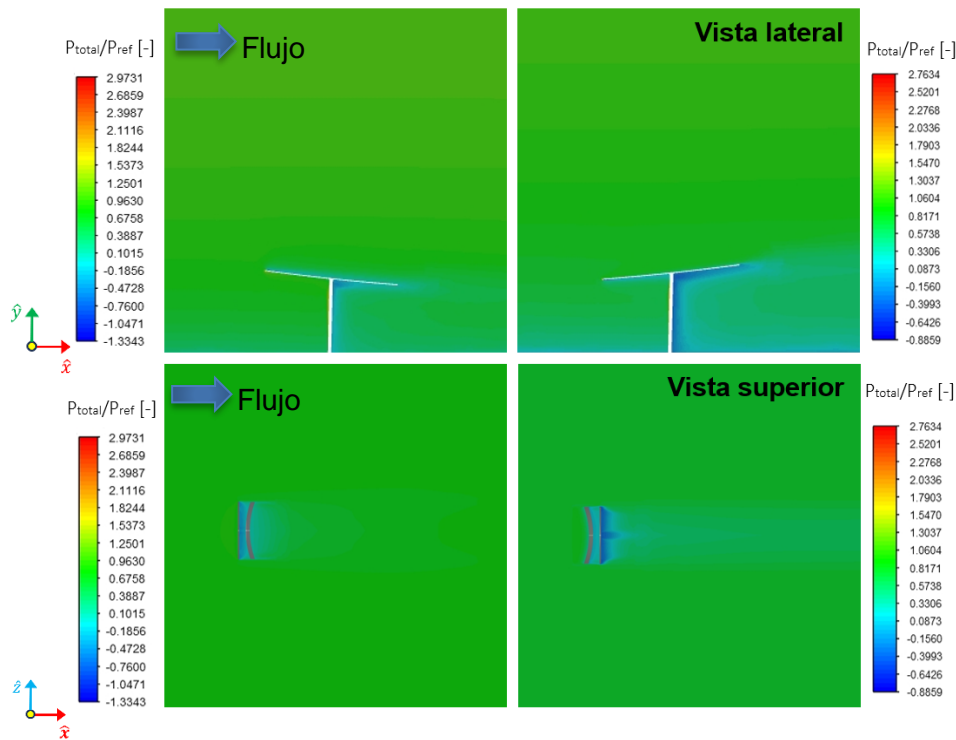
**Figura 76.** Contornos de presión  $\alpha=60^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).



**Figura 77.** Contornos de presión  $\alpha=75^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).



**Figura 78.** Contornos de presión  $\alpha=80^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).



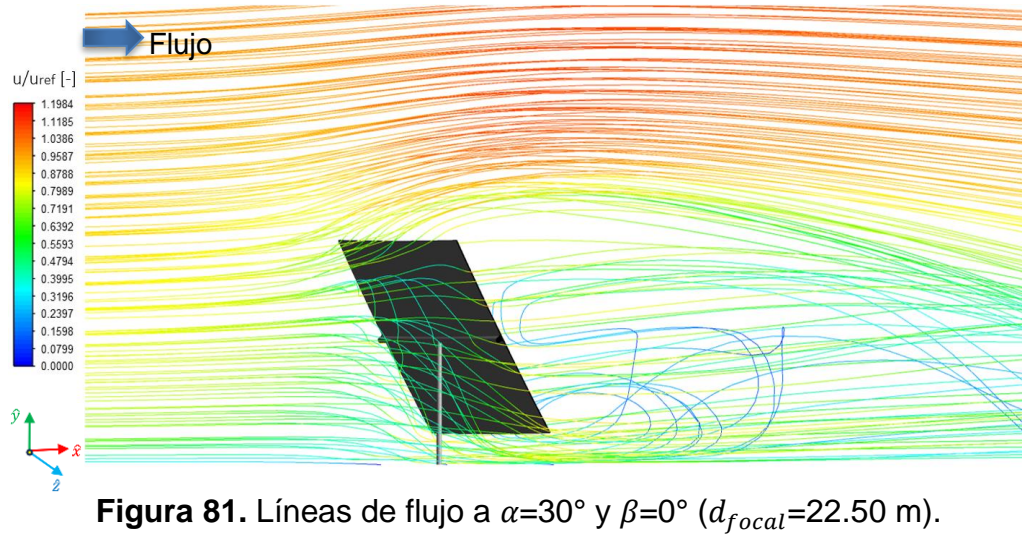
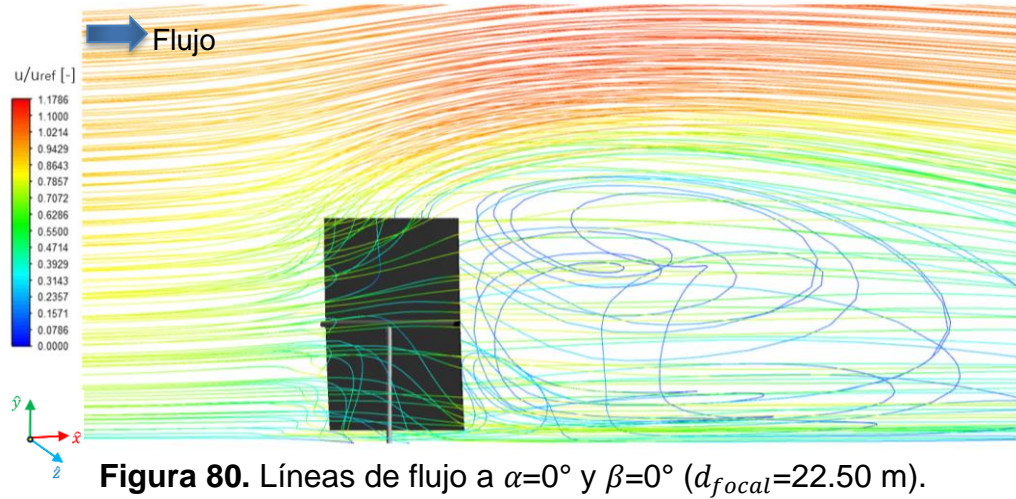
**Figura 79.** Contornos de presión  $\alpha=84^\circ$  en  $\beta=0^\circ$  (izq.) y  $\beta=180^\circ$  (der.) ( $d_{focal}=22.50$  m).

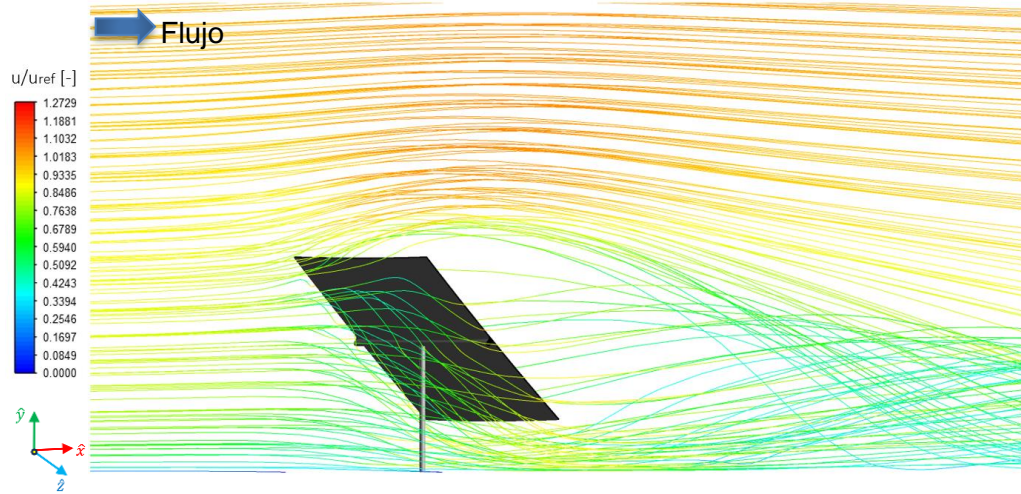
#### 4.4.4. Líneas de flujo relativas a la velocidad de referencia

A continuación, se muestran los patrones de movimiento del aire utilizando líneas de flujo. Las Figuras 80-83 presentan las líneas de flujo para  $\alpha=0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $84^\circ$ , respectivamente, correspondientes al heliostato con  $d_{focal}=22.50$  m y  $\beta=0^\circ$ . Como ocurrió en los casos correspondientes al heliostato plano, no se aprecian diferencias significativas en el patrón de flujo.

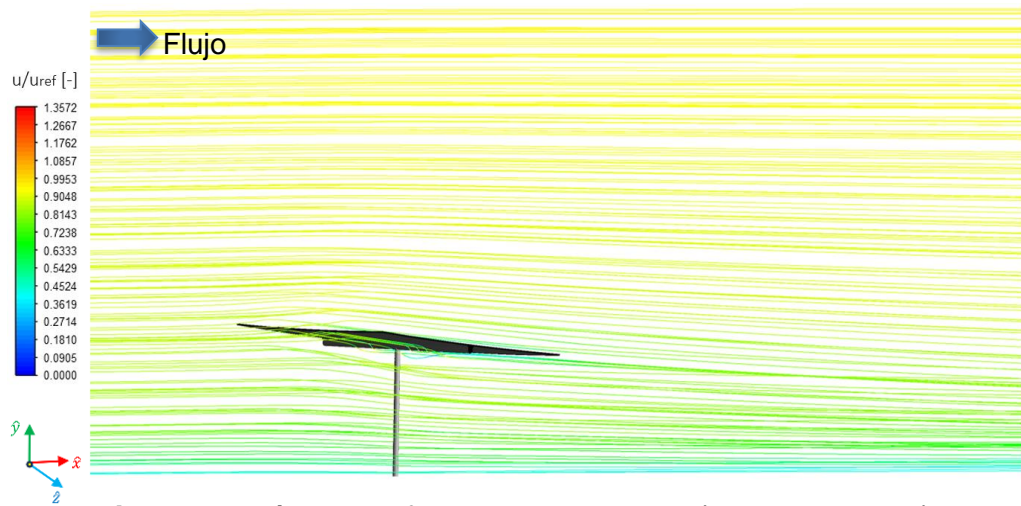
Las Figuras 84, 85, 86 y 87 presentan las líneas de flujo para  $\beta=180^\circ$  y ángulos de elevación de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $84^\circ$ , respectivamente. De nuevo, no se aprecian diferencias significativas en el patrón de flujo con respecto a los casos correspondientes al heliostato plano.







**Figura 82.** Líneas de flujo a  $\alpha=45^\circ$  y  $\beta=0^\circ$  ( $d_{focal}=22.50$  m).



**Figura 83.** Líneas de flujo a  $\alpha=84^\circ$  y  $\beta=0^\circ$  ( $d_{focal}=22.50$  m).



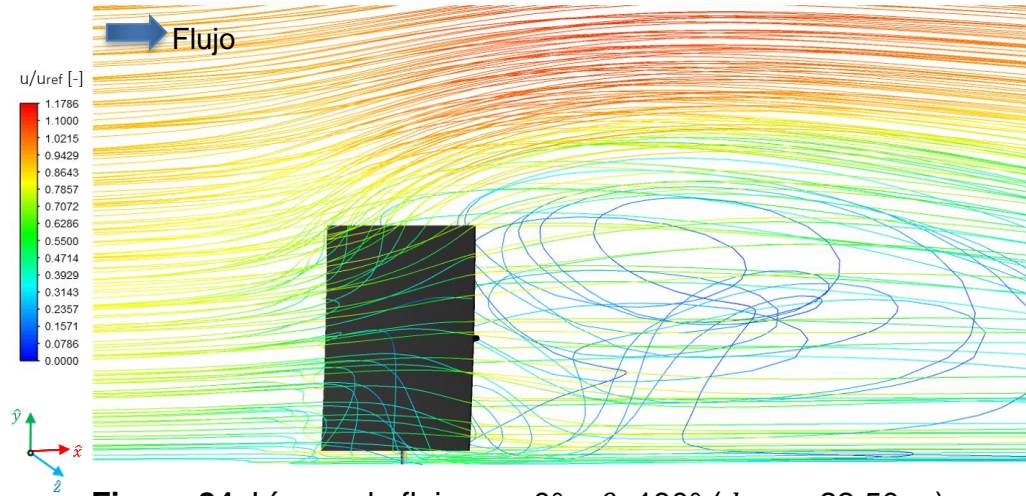


Figura 84. Líneas de flujo a  $\alpha=0^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  ( $d_{focal}=22.50$  m).

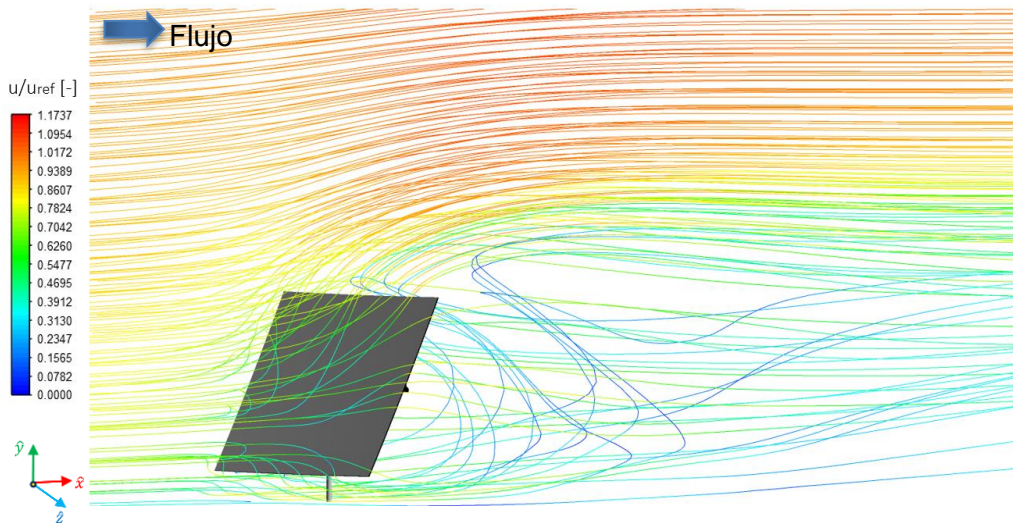
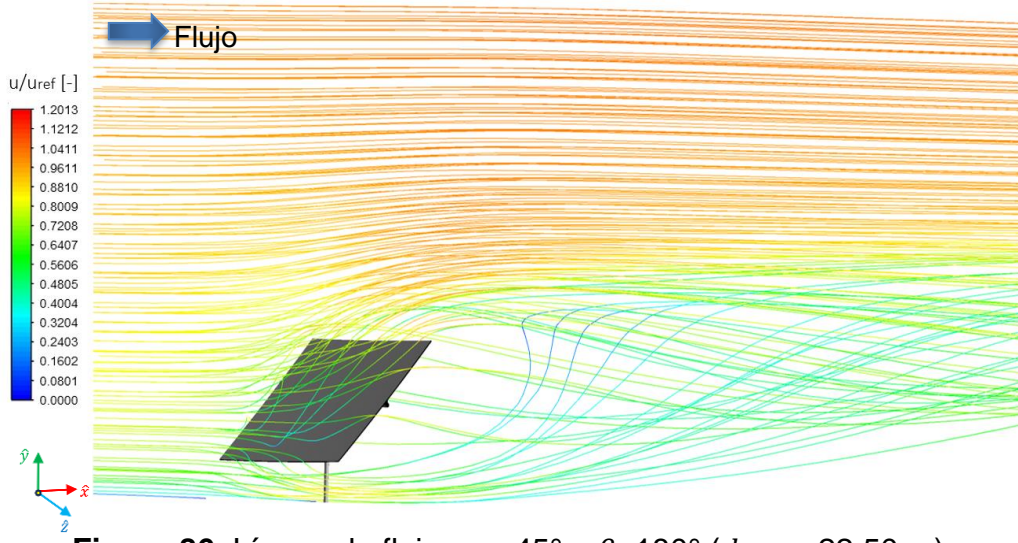
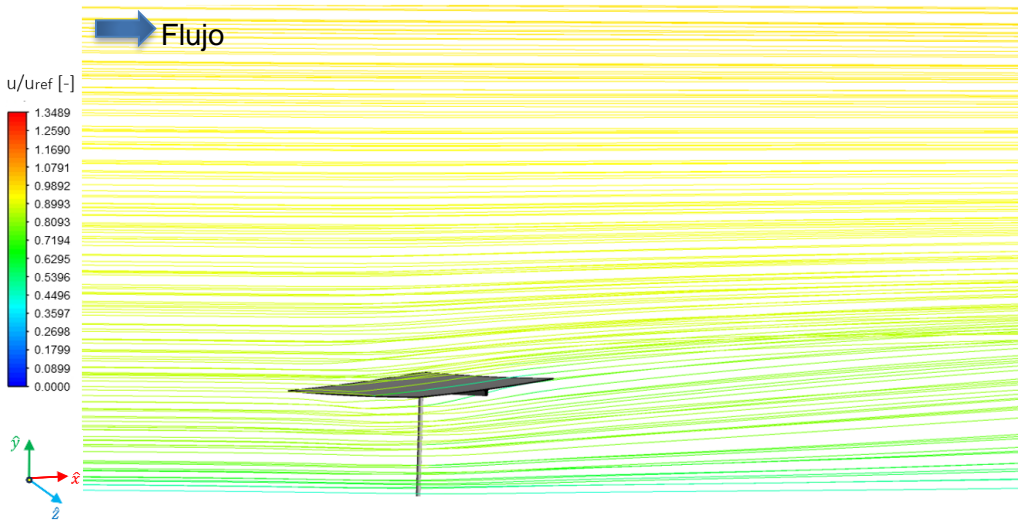


Figura 85. Líneas de flujo a  $\alpha=30^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  ( $d_{focal}=22.50$  m).





**Figura 86.** Líneas de flujo a  $\alpha=45^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  ( $d_{focal}=22.50$  m).

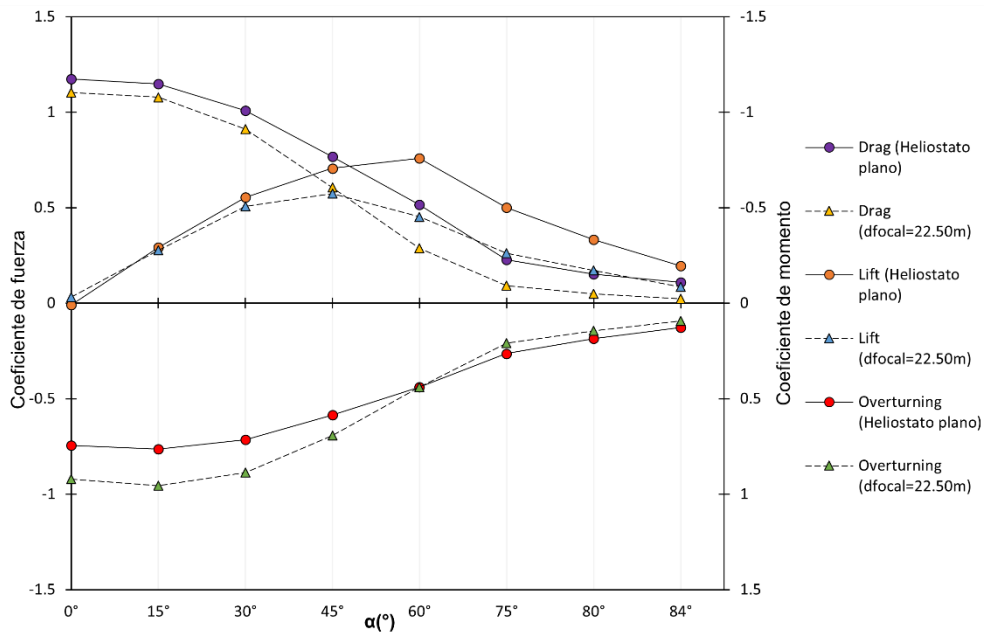


**Figura 87.** Líneas de flujo a  $\alpha=84^\circ$  y  $\beta=180^\circ$  ( $d_{focal}=22.50$  m).

### 4.5 Comparación de resultados del heliostato concentrador a mayor distancia focal y el heliostato plano

Se realizó una comparación de los coeficientes aerodinámicos obtenidos en los estudios del heliostato plano con los del heliostato concentrador a una distancia focal de 22.50m.

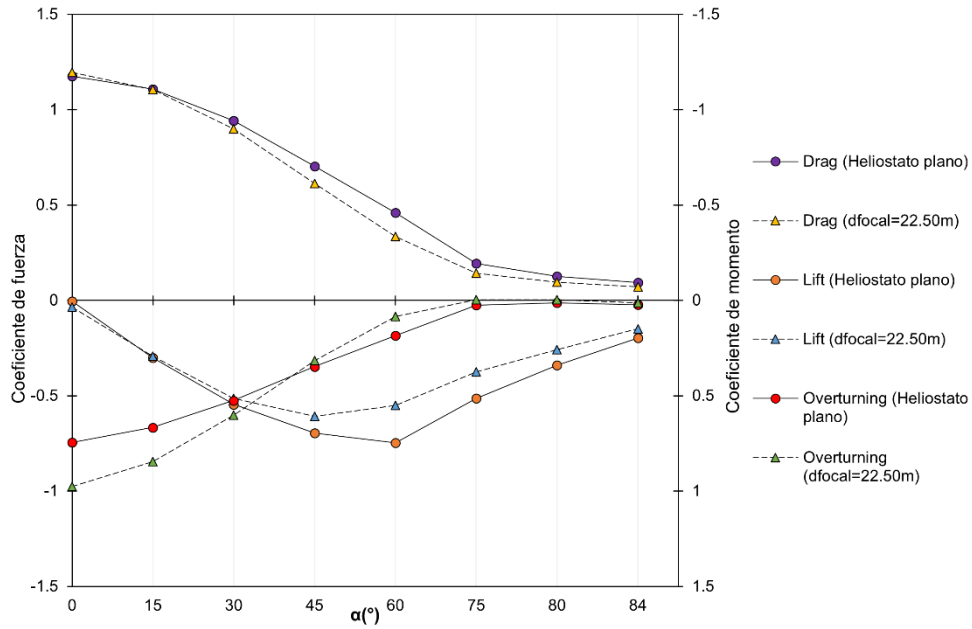
En la Figura 88 se presenta la gráfica comparativa de los coeficientes para un  $\beta=0^\circ$ . Se observan coeficientes mayores para las fuerzas de arrastre y sustentación en el heliostato plano, a excepción de  $\alpha=0^\circ$  en el coeficiente de sustentación. Se obtuvieron mayores coeficientes de volcamiento para el heliostato concentrador en elevaciones menores de  $60^\circ$ .



**Figura 88.** Comparación de los coeficientes aerodinámicos del heliostato plano y el heliostato concentrador en  $d_{focal}=22.50m$  para  $\beta=0^\circ$ .

En la Figura 89 se tiene la comparación de ambos heliostatos en un ángulo azimutal de  $180^\circ$ . Al igual que en un valor de  $\beta=0^\circ$ , se observa que los coeficientes de arrastre y sustentación son mayores para el heliostato plano.

Mientras que el coeficiente de volcamiento es mayor en el heliostato concentrador cuando este se encuentra en elevaciones menores de 45°. Esto se debe a las esquinas más curvadas que presenta el heliostato concentrador.



**Figura 89.** Comparación de los coeficientes aerodinámicos del heliostato plano y el heliostato concentrador en  $d_{focal}=22.50m$  para  $\beta=180^\circ$ .

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del presente estudio teórico sobre las cargas aerodinámicas promedio en un heliostato de una faceta y en dos heliostatos concentradores debido a un flujo con propiedades de capa límite atmosférica, se puede concluir lo siguiente:

- Se obtiene una buena homogeneidad horizontal en los perfiles de velocidad e intensidad turbulenta al implementar funciones modificadas de pared rugosa.
- Es importante que las propiedades del flujo estén en equilibrio en la zona de estudio, pero no es requisito para todo el dominio.
- Se logró una buena concordancia con los resultados experimentales reportados por Peterka (1986), con un error promedio menor al 3%.
- Las diferencias de presión son los principales responsables en los resultados de los coeficientes aerodinámicos en la superficie del heliostato.
- Los coeficientes de arrastre y volcamiento son máximos entre  $\alpha=0^\circ$  y  $\alpha=15^\circ$ , mientras que el coeficiente de sustentación es máximo entre  $\alpha=45^\circ$  y  $\alpha=60^\circ$  para todos los heliostatos.
- Se observó el valor mínimo de todos los coeficientes cuando  $\alpha$  tiende a  $90^\circ$ .
- En su mayoría, cuando el flujo del aire incide en la cara posterior de la estructura del heliostato ( $\beta=0^\circ$ ), los coeficientes aerodinámicos aumentan, debido a las diferencias de presión que se forman en las partes superior e inferior del heliostato.
- Conforme se aumenta la curvatura en  $\beta=0^\circ$ , se logra una reducción en los coeficientes de arrastre y sustentación, pero un aumento en los de volcamiento.
- En  $\beta=180^\circ$ , la curvatura provoca un aumento en el coeficiente de volcamiento, así como también, aumenta el arrastre en  $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ .

Disminuye el arrastre en elevaciones mayores a  $30^\circ$  y en la fuerza de sustentación.

Como conclusión general, al analizar dos heliostatos concentradores a distintas distancias focales utilizando dinámica de fluidos computacional, se encontró un comportamiento similar al de un heliostato plano. Al realizar una comparación entre las diferentes curvaturas y una superficie plana, se encontró que los coeficientes aerodinámicos variaban dependiendo de la orientación azimutal, observando aumentos y disminuciones.

Para el desarrollo del tema y la mejora de este estudio, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Implementar otro heliostato al estudio de las cargas aerodinámicas en el mismo dominio computacional, para lograr una aproximación más exacta al fenómeno aerodinámico en un campo de heliostatos.
- Investigar los efectos de las cargas del viento en un heliostato concentrador de varias facetas.
- Se recomienda realizar un estudio para evaluar los esfuerzos estructurales en el marco del heliostato y su superficie reflectante, debido a las cargas del viento.
- Analizar el efecto de las deformaciones estructurales y relacionarlo con la pérdida de concentración solar o tamaño del spot.
- Agregar el efecto de la extinción de las perturbaciones generadas por el heliostato, para obtener información de la separación entre ellos, longitud y arreglo entre puntos P

---

---

## CAPÍTULO 6

### BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, E., Inge, A., Brunet, M., Peterson, T., Wieringa, J. (2003). Guidance of Metadata and Homogenization. Universidad Rovira i Virgili. Tarragona, España.
2. Anderson, J. (2011). Fundamentals of Aerodynamics (Fifth Edition ed.). New York, NY.: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-33-9810-5.
3. ANSYS, Inc. (2013). ANSYS Fluent User's Guide.
4. ANSYS, Inc. (2003). ANSYS Fluent Theory Guide.
5. Bitsuamlak, G.T., Stathopoulos, T., Bedard, C. (2004). Numerical evaluation of wind flow over complex terrain: Review. *Journal of Aerospace Engineering* 17 (4), 135–145.
6. Blocken, B., Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92 (13), 1079–1130
7. Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J. (2007). CFD Simulation of the atmospheric boundary layer: Wall Function Problems. *Atmospheric Environment*. 41, 238-252.
8. Cermak, J. E., Peterka, J. A., Kareem, A. (1978). Heliostat Field Array Wind Tunnel Test (CER78-79JEC-JAP-AK2). Solar Energy Research Institute. Recuperado de: OSTI.GOV (office of scientific and technical Information).
9. Cindori, M., Juretic, F., Kozmar, H., Dzijan, I. (2018). Steady RANS model of the homogeneous atmospheric boundary layer. *Journal of Engineering and Industrial Aerodynamics*.173, 289-301.
10. Crasto, G. (2007). Numerical Simulations of the Atmospheric Boundary (Tesis de Doctorado). Universidad de Cagliari, Italia.
11. Currie. I. G. (2003). Fundamental Mechanics of Fluids (Third Edition ed.). New York, NY.: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-088-5.

- 
12. Durán, R. (2020). *Estudio Teórico-Experimental del Efecto de las Cargas del Viento sobre los Elementos Estructurales de Heliostatos*. Master Thesis, Universidad de Sonora.
  13. Durbin, P., Pettersson, A. (2011). *Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flow (Second Edition)*. United Kingdom. Wiley. ISBN 978-0-470-68931-8.
  14. Emes, J. M., Jafari, A., Ghanadi, F., Arjomandi, M. (2019). Hinge and overturning moments due to unsteady heliostat pressure distributions in a turbulent atmospheric boundary layer. *Solar Energy*. 193, 604-617.
  15. Espejo, C. y García, R.. (2010). La energía solar termoeléctrica en España (Vol. 30, núm.2). *Anales de Geografía*. 30, 81-105. ISSN 0211-9803.
  16. Franke, J., Frank, W. (2005). Numerical simulation of the flow across an asymmetric street intersection. In: Na'prstek, J., Fischer, C. (Eds.), *Proceedings of the 4EACWE, 11–15 July 2005, Praga, República Checa*.
  17. Ghanadi, F., Yu, J., Emes, M., Arjomandi, M., Kelso, R. (2016). *Numerical Investigation of Wind Loads on an Operating Heliostat*. Department of Mechanical Engineering. Universidad de Adelaide, Australia.
  18. González, M., Cárdenas, V. y Álvarez, R. (2019). Inversiones inteligentes en sistemas de energía solar Fotovoltaica. *Universitarios Potosinos*, 25.
  19. Google. (2011). *Heliostat Wind Tunnel Experiments*. Recuperado de: [Google.org](https://www.google.org).
  20. Hinkley, J.T., Hayward, J.A., Curtin, B., Wonhas, A., Boyd, R., Grima, C., Tadros, A., Hall, R., Naicker, K., (2013). An analysis of the costs and opportunities for concentrating solar power in Australia. *Renewable Energy* 57, 653–661.
  21. IEA. (2011). *Solar Energy Perspectives*. París: OECD Publishing.
  22. IEA (2014). *Technology Roadmap Solar Thermal Electricity*. París: IEA.
  23. Instituto Mexicano del Petróleo. (2018). *Reporte de Inteligencia Tecnológica: Energía Termosolar*. SENER.
-

- 
24. IRENA, (2010). Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Concentrating Solar Power, Volume 1: Power Sector Issue 2/5. International Renewable Energy Agency.
  25. Iriarte, C. (2020). Evaluación teórica y experimental del efecto de los errores de pendiente y canteo en heliostatos concentradores sobre la distribución del flujo solar concentrado. Tesis de doctorado. Universidad de Sonora.
  26. Jürgens, B., Haek, A., Herrero Solana, V., Lobo Márquez, G., Silva Pérez, M., Silva García, S., Colinet, M. (2011). Estudio Sectorial: Sector Energías Renovables. Junta de Andalucía, *Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía (IDEA)*. Andalucía: Coria Gráfica.
  27. Kaimal J.C., Finnigan J.J. (1994). Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurement. Oxford University Press. New York, NY.
  28. Kolb, G.J., Ho, C.K., Mancini, T.R., Gary, J.A., (2011). Power Tower Technology Roadmap and Cost Reduction Plan. In: Sandia Report SAND2011-2419. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico, USA.
  29. Luna, Carlos. (2016). Concentradores Termosolares para Generación Eléctrica. Informe de Vigilancia Tecnológica. Red Tecnoparque Neiva. Centro de La Industria la Empresa y los Servicios, SENA, Regional Huila. 10.13140/RG.2.2.36466.45769.
  30. Marais, M. D., Craig, K. J., Meyer, J. P. (2015). Computational flow optimization of heliostat aspect ratio for wind direction and elevation angle. *Energy Procedia*. 69, 148-157.
  31. Meroney, R.N., 2004. Wind tunnel and numerical simulation of pollution dispersion: a hybrid approach. Working paper, Croucher Advanced Study Institute on Wind Tunnel Modeling, Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong, 6–10 December 2004, 60pp.
  32. Méndez, J. (2013) Canteo de helióstatos utilizando la fotogrametría como método de caracterización. Master Thesis. Universidad de Sevilla. España. Recuperado de: [biblus.us.es](http://biblus.us.es)
-



- 
33. Parente, A., Benocci, C., 2010, May. On the RANS simulation of neutral ABL flows. Paper presented at the Fifth International Symposium of Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA.
  34. Pfahl, A., Coventry, J., Röger, M., Wolfertstetter, F., Vásquez-Arango, J.F., Gross, F., Arjomandi, M., Schwarzbözl, P., Geiger, M., Liedke, P., (2017). Progress in heliostat development. *Sol. Energy* 152, 3–37.
  35. Peterka, J. A., Hosoya, N., Bienkiewicz, B., Cermak, J. E. (1986). Wind Load Reduction for Heliostat (SERI/STR-253-2859). Solar Energy Research Institute. Recuperado de OSTI.GOV (Office of Scientific and Technical Information).
  36. Peterka, J. A., Tan, Z., Bienkiewicz, B., Cermak, J. E. (1987). Mean and Peak Wind Load Reduction on Heliostats (SERI/STR-253-3212). Solar Energy Research Institute, A Division of Midwest Research Institute. Recuperado de OSTI.GOV (Office of Scientific and Technical Information).
  37. Peterka, J., Derickson, R.G. (1992) Wind Load Design Methods for Ground Based Heliostats and Parabolic Dish Collectors (SAND92-7009). Sandia National Laboratories. Recuperado de OSTI.GOV (Office of Scientific and Technical Information).
  38. Reichrath, S., Davies, T.W. (2002). Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present, and future. *Agronomie* 22 (1), 3–19.
  39. Richards, P. J., Hoxey, R. P. (1993). Appropriate boundary conditions of computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145-153.
  40. Richards, P. J., Norris, S. E. (2010). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering. Chapel Hill, North Carolina, USA.

- 
41. Richards, P. J., Norris, S. E. (2015). Appropriate boundary conditions for a pressure driven boundary layer. *Journal of Engineering and Industrial Aerodynamics*.142, 43-52.
  42. Romero, Y. (7 de septiembre de 2016). Newton se Degrada a Tormenta Tropical. *El Sol De Hermosillo*.
  43. Rosales, M. (2014). *Diseño, Puesta en operación y Evaluación de un Heliostato con Facetas Deformables*. Máster Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
  44. Ruíz, V., Pérez, M. y Lillo, I. (2009). Guía técnica de energía y medio ambiente. Fundación Gas Natural. Barcelona, España. ISBN: 978-84-613-0406-6.
  45. Salas, R. (2022). *Desarrollo de Espejos Curvos Concentradores para un Heliostato de Torre Central*. Máster Tesis, Universidad de Sonora.
  46. Secretaría de Energía (2016). Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios. *Diario Oficial de la Federación*. SEGOB.
  47. Secretaría de Energía. (2017). Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE). Obtenido de <https://dgel.energia.gob.mx/inere/>
  48. Stathopoulos, T., 1997. Computational wind engineering: past achievements and future challenges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67–68, 509–532.
  49. Stewart, R. W. (1979). *The atmospheric boundary layer*. Geneva: World Meteorological Organization
  50. The International Renewable Energy Agency (2010). Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Concentrating Solar Power. Operation and maintenance Costs. IRENA. 1, 17-18.
  51. Topolar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., Van Heijst, G. (2019). CFD Simulation of the near-neutral atmospheric boundary layer: New Temperature inlet profile consistent with wall functions. *Journal of Engineering and Industrial Aerodynamics*. 191, 91-102.
-

52. Vishaykanth, A. (2015). The use of CFD for Heliostat Wind Load Analysis (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería en la Universidad de Stellenbosch, Sudáfrica.
53. Weather Spark (2023) El clima y el tiempo promedio en todo el año en Hermosillo. Consultado el 22 de Junio de 2023.
54. World Bank Group. (2019). Mapa de Recurso Solar: Irradiación Directa Normal. Obtenido de: [globalsolaratlas.info](http://globalsolaratlas.info)
55. Xiong, Q., Li, Z., Luo, H., Zhao, Z. (2019). Wind tunnel test study on wind load coefficients variation law of heliostat based on uniform design method. *Solar Energy*. 184, 209-229.
56. Yang, Y., Gu, M., Chen, S., Jin, X. (2009). New inflow boundary conditions for modeling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering. *Journal of Engineering and Industrial Aerodynamics*. 97, 88-95.
57. Zou, Q., Li, Z., Wu H., Kuang, R., Hui, Y., (2015). Wind pressure distribution on trough concentrator and fluctuating wind pressure characteristics, *Solar Energy*, Volume 120, Pages 464-478, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.014>.

**APÉNDICE. Constancias de presentación en Congreso Nacional.**



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

**RECONOCIMIENTO**

A

**HINOJOSA TRUJILLO MARIA ELIZABETH; PADILLA GUCHO EMILIANO;  
DURÁN RESTY L; HINOJOSA PALAFOX JESÚS FERNANDO**

POR LA PRESENTACIÓN EN EL ÁREA INGENIERÍA MECÁNICA DEL ARTICULO:  
ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE CARGAS AERODINÁMICAS EN HELIOSTATOS CONCENTRADORES  
EN EL MARCO DE LA X JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA, CELEBRADA DEL 26 AL 26  
DE ABRIL DE 2023, EN EL TECN/CENIDET

CUERNAVACA, MORELOS, 28 DE ABRIL DE 2023



JCYTA043923  
<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

**DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA**  
**DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Sello Digital:

ZyRupT4CfwmolZ1lrXT1/QmvFMZOE7xfrlrrii6WdDly6ncJzdALDJCJiBbxkdzjV0TC/rQA34JGEIA8iYEPcao  
4uyq6WdmEEIyFATdo2vm8qX3C0P06LGt8c9i6MxJFv/8eT6RU+dM8JtJQp7fY7mGdbMvrXu1x+Vdkqg3CZKmec  
aEt;padvcMO7OKqSx456cPP5suCHqP8DiDU1aOhyV6zthVX8cvf9ch+xpboiW1+fVpFOGz5FyTsn1YD40DvLIF  
fatYWD18tBsAZXqdb8AQMaynX6AVrwECLpPK19QoEjv+Y1U97NR0z710sMrSLNVAE5cwmWzQqdBpuSIFnkFw==





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

## EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

### RECONOCIMIENTO

A

**MARIA ELIZABETH HINOJOSA TRUJILLO, EMILIANO PADILLA  
GUCHO, RESTY DURÁN, JESÚS FERNANDO HINOJOSA PALAFOX**

POR LA PRESENTACIÓN DEL MEJOR ARTÍCULO EN EL ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DENOMINADO:

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE CARGAS AERODINÁMICAS EN HELIOSTATOS CONCENTRADORES  
EN EL MARCO DE LA X JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA QUE SE LLEVÓ A CABO  
DEL 26 AL 28 DE ABRIL DEL 2023, DE FORMA HÍBRIDA EN EL TECN/CENIDET

CUERNAVACA, MORELOS, 27 DE ABRIL DE 2023



JCYTA039223

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

**DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA**  
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Sello Digital:

aJC3mHtwsLOD9Xi7eFswQf0jw4Vgz6sB4b39N1Vm5hAV6Id/hNjT8At4+oDVw+LeriZ11ELkZBLG8FCU+W5DOh  
w1bbVVeAT93un62Mf6S+bMLbMnyh77nI11KWB+Ey4zr1PPmhuk2N7OaGncn+CeyNYVdo4EZCd+t5uuYXLvzYwQ  
Et+z2hmfNxRnz7IvF0LrNSbjqfE6Emi4+Xj2fmANZKSDR1NdEh1rXQC/cw66dT07ySHWuCU5PeKxTFvFNsj58Q  
h0+GqTbZ0zA0Lz6G1n+g2qo2PqxdIvvETnz1JqRoQ007z6FpjeE4g+1+Wq8W+91gaCIMEQfT0Hr10oNDRcg==

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

**X** JORNADA DE  
CIENCIA Y  
TECNOLOGÍA  
APLICADA  
DEL 26 AL 28 DE ABRIL DEL 2023  
CUERNAVACA, MORELOS

