

# UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



## POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

DISEÑO Y ANÁLISIS POR MEDIO DE VOLUMEN FINITO Y  
ELEMENTOS FINITOS DE UN SEGUIDOR SOLAR

### T E S I S

PRESENTADA POR

**LUIS BERNARDO ÁLVAREZ ROMERO**

Desarrollada para cumplir con uno de los  
requerimientos parciales para obtener  
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS  
DR. VÍCTOR MANUEL HERRERA JIMÉNEZ

CODIRECTOR  
DR. VICTOR HUGO BENITEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

AGOSTO 2019

# 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



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

Hermosillo, Sonora a 08 de agosto de 2019

**LUIS BERNARDO ALVAREZ ROMERO**

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado vigente, otorgamos a usted nuestra aprobación de la fase escrita del examen de grado, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestro en Ingeniería.

Por tal motivo este jurado extiende su autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **DISEÑO Y ANÁLISIS POR MEDIO DE VOLUMEN FINITO Y ELEMENTOS FINITOS DE UN SEGUIDOR SOLAR** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE

Dr. Víctor Manuel Herrera Jiménez  
Director de Tesis y Presidente del Jurado

Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar  
Codirector y Vocal del Jurado

M.C. Carlos Anaya Eredias  
Secretario del Jurado

Dr. Agustín Brau Ávila  
Vocal del Jurado

Hermosillo, Sonora, a 12 de agosto de 2019.

## LUIS BERNARDO ALVAREZ ROMERO

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado de la Universidad de Sonora, otorgo a usted mi aprobación de la fase escrita del examen de grado, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestro en Ingeniería: Ingeniería en Sistemas y Tecnología.

Por tal motivo, como sinodal externo y vocal del jurado, extiendo mi autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **DISEÑO Y ANÁLISIS POR MEDIO DE VOLUMEN FINITO Y ELEMENTOS FINITOS DE UN SEGUIDOR SOLAR** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE



**Dr. Iván Salgado Tránsito**  
Investigador

Grupo de Investigación e Ingeniería en Energía Solar  
Centro de Investigaciones en Óptica AC.  
Sinodal externo y vocal del Jurado



[www.cio.mx](http://www.cio.mx)



(01 477) 441.42.00 / Fax. (01 477) 441.42.09



León, Guanajuato, México. Apdo. Postal 1-948



Loma del Bosque 115 Col. Lomas del Campestre C.P. 37150



## RESUMEN

Una de las principales fuentes de energía alternativa es la solar, ya que es la más abundante y permanente. Para su aprovechamiento, existen 3 principales rutas de conversión: la fotovoltaica, fotoquímica y la fototérmica. En particular en la conversión fototérmica o termosolar la tecnología de torre central se destaca por su alta eficiencia térmica. Esta se integra de un campo de captadores solares denominados helióstatos, una torre en el centro del campo, un receptor solar en la zona focal y un bloque de generación de potencia convencional. El campo de helióstatos es uno de los componentes claves de la tecnología, ya que representa el 50% del costo de toda una planta de torre central. La estructura de los helióstatos se ve afectada principalmente por las cargas de viento, provocando deformaciones en la estructura y reduciendo la eficiencia óptica del sistema.

En este estudio se hace una propuesta de diseño de una estructura de un helióstato, como colaboración a un proyecto de concentración solar del Centro de Investigación en Óptica (CIO) unidad Aguascalientes. Primeramente, se realizó un modelo CAD con base a consideraciones de diseño establecidas por el centro e investigación. Posteriormente, se realizó un estudio de volumen finito para conocer la distribución de la presión sobre las facetas del helióstato en diferentes posiciones de operación y a diferentes velocidades de viento. Finalmente, estos resultados se retoman como parámetro de entrada para realizar el estudio de resistencia estructural mediante el método de elemento finito y conocer las deformaciones presentadas en la estructura de soporte del helióstato, afín de corroborar que se cumplen con los criterios de resistencia requeridos por el CIO.

# ABSTRACT

One of the main sources of alternative energy is solar, as it is the most abundant and permanent. For its use, there are 3 main conversion routes: photovoltaic, photochemical and photothermal. Particularly in photothermal or thermosolar conversion, the central tower technology stands out for its high thermal efficiency. This consists of a field of solar collectors called heliostats, a tower in the center of the field, a solar receiver in the focal zone and a block of conventional power generation. The heliostat field is one of the key components of the technology, representing 50% of the cost of an entire central tower plant. The heliostat structure is mainly affected by wind loads, causing deformations in the structure and reducing the optical efficiency of the system.

In this study a heliostat structure design proposal is made, as a collaboration to a solar concentration project of the Centro de Investigación en Óptica (CIO) Aguascalientes unit. Firstly, a CAD model was made based on design considerations established by the center and research. Subsequently, a finite volume study was carried out to determine the distribution of pressure over the facets of the heliostat in different operating positions and at different wind speeds. Finally, these results are taken up again as an input parameter to carry out the study of structural resistance by means of the finite element method and to know the deformations presented in the support structure of the heliostat, in order to corroborate that the resistance criteria required by the CIO are met.

# **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por haberme dado la oportunidad y el apoyo necesarios para poder formarme tanto personal como académicamente a lo largo de mi vida.

A mis maestros, personal administrativo y compañeros con los que me vi involucrado a lo largo de este proyecto.

A mi tutor de tesis Víctor Herrera por haberme dado la oportunidad de trabajar en este proyecto y haberme guiado en su elaboración.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Fortalecimiento de la Calidad Educativa (PFCE) por su apoyo económico brindado en mi estudio de posgrado.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	ii
ABSTRACT .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. Presentación .....	10
1.2. Planteamiento del problema .....	12
1.3. Objetivo general .....	12
1.4. Objetivos específicos .....	12
1.5. Hipótesis .....	13
1.6. Alcances y delimitaciones .....	13
1.7. Justificación.....	13
2. MARCO DE REFERENCIA .....	14
2.1 Energía renovable.....	14
2.1.1 Energía solar .....	15
2.2 Estructura de los helióstatos .....	18
2.3 Cargas de viento .....	20
2.4 Esfuerzos y deformaciones .....	21
2.5 Método de elemento finito.....	22
2.6 Dinámica de fluidos computacional (CFD) .....	23
2.6.1 Modelos de turbulencia.....	25
2.7 Método de volumen finito .....	26
2.8 Diseño mecánico.....	27
2.8.1 El proceso de diseño mecánico .....	27



2.8.2 Fases de diseño .....	28
2.8.3 Consideraciones de diseño.....	30
2.9 Sistemas CAD/CAE .....	30
2.10 Estudios previos.....	31
3 METODOLOGIA O MODELO .....	32
3.1 Diseño mecánico.....	33
3.1.1 Consideraciones de diseño.....	33
3.1.2 Diseño CAD .....	33
3.2 Dinámica de fluidos computacional.....	34
3.2.1 Puntos de operación .....	35
3.2.2 Dominio computacional.....	36
3.2.3 Mallado del dominio .....	38
3.2.4 Simulación y resultados .....	38
3.3 Simulación elemento finito .....	39
3.3.1 Mallado de elementos.....	39
3.3.2 Simulación y resultados .....	39
4 IMPLEMENTACIÓN .....	41
4.1 Diseño mecánico.....	41
4.1.1 Datos del diseño .....	42
4.2 Dinámica de fluidos computacional.....	42
4.2.1 Punto de operación 1 ( $\alpha=30^\circ$ , $V=9$ m/s).....	43
4.2.2 Punto de operación 2 ( $\alpha=45^\circ$ , $V=9$ m/s).....	45
4.2.3 Punto de operación 3 ( $\alpha=60^\circ$ , $V=9$ m/s).....	47
4.2.4 Punto de operación 4 ( $\alpha=0^\circ$ , $V=36.6$ m/s).....	49
4.3 Método de elemento finito.....	50
4.3.1 Mallado de elementos.....	50
4.3.2 Resultados.....	52
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	59
5.1 Conclusiones.....	59
5.2 Recomendaciones .....	59

5.3 Trabajo futuro.....	60
6. REFERENCIAS .....	61
7.ANEXOS .....	64

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 concentrador parabólico (Rosales, 2016).....	17
Figura 2.2 Discos parabólicos (Lofthouse, Simmons and Yonk, 2016) .....	17
Figura 2.3 Sistema de torre central (Rosales, 2016) .....	18
Figura 2.4. Superficie reflejante (Hernandez, 2013).....	19
Figura 2.5 ejes viento (Rosales, 2016).....	21
Figura 2.6 Ejemplo de discretización (Bhaskaran and Collins, 2015).....	24
Figura 2.7 Discretización de volumen (Ortega, 2016) .....	27
Figura 2.8 Fases de diseño (Shigley and Mischke, 2008).....	29
Figura 3.1 Metodología de la investigación .....	32
Figura 3.2 Modelo del heliostato .....	34
Figura 3.3 Dirección del viento y posición angular .....	36
Figura 3.4 Flujo de viento sobre la estructura .....	37
Figura 3.5 Dominio computacional (Jubayer and Hangan, 2012).....	37
Figura 3.6 Mallado del dominio computacional .....	38
Figura 4.1 Modelo virtual del heliostato .....	41
Figura 4.2 Flujo a través de la estructura punto 1 .....	43
Figura 4.3 Convergencia punto 1 .....	43
Figura 4.4 Presiones punto 1 .....	44
Figura 4.5 Flujo a través de la estructura punto 2 .....	45
Figura 4.6 Convergencia punto 2 .....	45
Figura 4.7 Presiones punto 2 .....	46
Figura 4.8 Flujo a través de la estructura punto 3 .....	47
Figura 4.9 Convergencia punto 3 .....	47
Figura 4.10 Presiones punto 3 .....	48
Figura 4.11 Flujo a través de la estructura punto 4 .....	49
Figura 4.12 Convergencia punto 4 .....	49
Figura 4.13 Presiones punto 4 .....	50
Figura 4.14 Mallado de elementos .....	51
Figura 4.15 puntos de sujeción .....	51
Figura 4.16 Punto 1 $\alpha=30^\circ$ gravedad .....	52
Figura 4.17 Punto 1 $\alpha=30^\circ$ gravedad y viento .....	53
Figura 4.18 Punto 2 $\alpha=45^\circ$ gravedad .....	54
Figura 4.19 Punto 2 $\alpha=45^\circ$ gravedad y viento .....	54
Figura 4.20 Punto 3 $\alpha=60^\circ$ gravedad .....	55
Figura 4.21 Punto 3 $\alpha=60^\circ$ gravedad y viento .....	56
Figura 4.22 Punto 4 $\alpha=0^\circ$ gravedad (Factor de seguridad) .....	57
Figura 4.23 Punto 4 $\alpha=0^\circ$ gravedad y viento (factor de seguridad) .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación de modelos de turbulencia (Chilvers, 2014) .....	26
Tabla 3.1 Escenarios de simulación .....	35
Tabla 4.1 Resultados finales .....	58

# 1. INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad mediante fuentes de energía renovables es una de las alternativas más factibles a la utilización de combustibles fósiles, que no solo cada vez son más caros y escasos, sino que provocan la emisión de gases de invernadero que afectan al medio ambiente.

El presente proyecto contempla la generación de electricidad por medio de energía solar, de manera específica, por medio de plantas de sistema de torre central, que concentran la radiación solar por medio de seguidores solares llamados helióstatos, que siguen la posición del sol en todo momento y reflejan la radiación solar hacia la parte superior de una torre, donde un sistema de varios procesos utiliza fluidos y agua para generar vapor que acciona turbinas generadoras de electricidad. La estructura de estos helióstatos se ve afectada en gran medida por la fuerza de gravedad y la fuerza de arrastre del viento, lo cual repercute en su capacidad concentradora de radiación y en su integridad física.

Con base a lo anterior, este trabajo de investigación se enfoca al diseño y análisis de la estructura de un helióstato para garantizar su funcionalidad y rigidez estructural. Para esto, se hace uso del método de volumen finito para determinar la distribución de presiones provocadas por la fuerza del viento sobre un modelo 3D de la propuesta de diseño realizada. Posteriormente, estos datos se utilizan en un estudio de elemento finito para observar las deformaciones de la estructura en su modo operacional y su resistencia física a condiciones de viento extremas.

## 1.1. Presentación

La investigación se realizará como apoyo al Centro de Investigaciones en Óptica, también conocido como CIO, ubicado en Aguascalientes, el cual desarrolla investigación básica y aplicada en el campo de la óptica y fotónica. Dentro de esta institución se ubica el Centro de Tecnologías de Concentración Solar para la producción de calor, electricidad y combustible. Este departamento de investigación

tiene como proyecto futuro colaborar en la instalación de un campo de concentración de energía solar en el estado de Sonora, por lo que se requiere realizar los estudios necesarios para determinar las especificaciones geométricas de las estructuras y proponer un diseño adecuadamente sustentado.

Para este proyecto, el CIO se encuentra vinculado con el campo experimental de torre central (CEToC), ubicado en Hermosillo, Sonora. Esta institución fue creada conjuntamente por la Universidad de Sonora y la Universidad Nacional Autónoma de México con el fin de llevar a cabo investigación, desarrollo e innovación sobre tecnología de plantas solares de potencia de torre central.

Estas instituciones definieron las condiciones y parámetros del diseño de los concentradores solares del proyecto de vinculación, estableciéndose como criterios de resistencia de diseño una deformación máxima de 1cm en corrientes de viento hasta 9 m/s en modo de funcionamiento, que según estudios previos, es la velocidad máxima de operación para los concentradores de este tipo (Pfahl, 2019). Además, de un factor de seguridad de 2 con una velocidad de viento de hasta 36.6 m/s en posición de abatimiento o supervivencia, esta velocidad máxima en la región fue obtenida por el CEToC (Rosales, 2016). Si el diseño no cumple con estas especificaciones la estructura corre el riesgo de sufrir deformaciones que pueden afectar el rendimiento óptico e integridad física de los concentradores, lo cual repercute en la eficiencia global de la planta.

Para sustentar la inversión que se realizará en el proyecto, la estructura de los helióstatos debe ser capaz de soportar su propio peso y cargas de viento externo, además, mantener su deformación por debajo de un cierto umbral de tal manera que la pérdida del ángulo de aceptación de sus módulos permanezca dentro de límites tolerables. Para predecir con precisión estos efectos, el centro de investigación busca respaldar el diseño de los concentradores solares por medio de un estudio de volumen finito y elemento finito.

## **1.2. Planteamiento del problema**

El centro de investigación tiene como interés participar, competir y obtener financiamiento e inversión para desarrollar tecnología de generación de potencia mediante el sol. Para realizar todo lo anterior, se debe de tener un diseño sustentado del helióstato y definir su estructura de manera que cumpla con los requerimientos de resistencia a la deformación para este tipo de estructura.

Las mayores fuerzas actuantes sobre la estructura de los helióstatos son su propio peso y la fuerza debida a la acción del viento, por lo que se deben de tomar en cuenta para tener un diseño con buen desempeño óptico y que no presente fallas estructurales. Para esto se deben de realizar estudios que garanticen su funcionalidad en condiciones de operación y su integridad estructural en situaciones extremas.

Tomando esto en cuenta, se puede definir el problema de la siguiente manera:

Diseñar la estructura de un helióstato que no supere una tonelada de peso, que sea fácil de construir utilizando materiales comerciales y que presente una deformación máxima de 1cm en funcionamiento con corrientes de viento de hasta 9 m/s y una resistencia en estado de reposo a corrientes de viento de hasta 36.6 m/s.

## **1.3. Objetivo general**

Realizar el diseño mecánico de la estructura de un helióstato y analizarlo por medio del método de volumen y elemento finito utilizando ingeniería asistida por computadora de la tal forma que se pueda tener un diseño que cumpla con los requerimientos y parámetros establecidos por la institución.

## **1.4. Objetivos específicos**

- Realizar el diseño mecánico inicial del helióstato.
- Analizar y evaluar la estructura mediante volumen finito y elemento finito.

- Tomar acciones de diseño con base a los resultados obtenidos en la etapa de análisis.

## **1.5. Hipótesis**

Es posible realizar el diseño y análisis de un helióstato de manera que se garantice un factor de seguridad de 2, cumpliendo con los criterios de diseño especificados por la institución.

## **1.6. Alcances y delimitaciones**

El propósito del proyecto queda delimitado al diseño de la estructura del concentrador solar, específicamente, a la parte superior de este, debido a que es la que se ve más afectada por a las fuerzas del viento. De manera específica, se realizarán análisis estáticos por medio de volumen finito y elemento finito en diferentes puntos de operación para predecir su comportamiento, asegurar que se cumplan con los requerimientos dispuestos por el CIO y que sirva como sustento previo a una construcción física.

## **1.7. Justificación**

El diseño y análisis por medio de volumen y elementos finitos posibilita realizar una predicción del comportamiento mecánico de la estructura del helióstato, esto permite a la institución tener un nivel de confianza mayor sobre el desempeño de los helióstatos en condiciones de operación y evitar fallas estructurales. Además, al obtener resultados de deformaciones y resistencia que cumplan con los criterios de evaluación, se podrán obtener las especificaciones geométricas que se requieren, lo cual, será de gran utilidad al momento de programar costos de materiales y de fabricación. De igual manera, una de las fuentes de energía renovables más importantes con las que contamos es el sol, por lo tanto, crear tecnologías e investigación para aprovechar esta energía resulta de gran beneficio para humanidad, generando además el impacto económico que podría llegar a generar estabilidad, bienestar y calidad de vida.



## 2. MARCO DE REFERENCIA

El uso de las energías renovables beneficia el desarrollo sustentable que beneficia tanto al medio ambiente como a las regiones en donde se usa, por lo que se debe de avanzar en la investigación para el desarrollo de este tipo de proyectos. En este capítulo abarca temas de energía sustentable y herramientas para sustentar los proyectos de tecnología de helióstato de torre central.

### 2.1 Energía renovable

El consumo de energía a nivel global ha ido aumentando cada vez más en los últimos años, esto debido a la demanda de energía que se tiene con el desarrollo industrial, el crecimiento de la población y el incremento de los estándares de vida en el mundo. El carbón, el petróleo y el gas natural, han sido el motor para la industrialización en todo el mundo. Sin embargo, al igual que todos los recursos naturales, los combustibles fósiles son finitos. Se necesitaron millones de años para que se originara el carbón o el aceite mineral: condiciones perfectas, tales como altas las temperaturas y los niveles de presión son necesarios para que se acumulen. Debido a la explotación despiadada de los yacimientos, los combustibles fósiles se encuentran ahora bajo una fuerte presión, que se prevé que se agoten en un futuro próximo (Konstantin, 2017).

De una manera general, Badii et al. (2016) clasifican las fuentes de energía en dos grupos basándose en su disponibilidad en el tiempo. Primero, agrupan a las que se renuevan continuamente, llamadas energías renovables, como son la leña, el viento, agua y la energía solar. Y, por otro lado, las denominadas fuentes no renovables, las cuales provienen de reservas limitadas o de un proceso de regeneración extremadamente lento, como el carbón y los hidrocarburos.

Blaabjerg y Ionel (2017) explican que las tecnologías de energía renovable son vistas como algunas de las soluciones más viables e importantes para el futuro, y que estas deben desarrollarse aún más en este siglo para poder asumir la mayor parte de la

producción de energía. Además, exponen que, al existir diferentes métodos de aprovechamiento de las energías naturales, con diferentes niveles de madurez y escalas de implementación, se debe de escoger el tipo adecuado para cada región de acuerdo a las condiciones climáticas y a los requerimientos de nivel de energía.

En nuestro país, el plan nacional de desarrollo 2019-2024 plantea la renovación y el impulso a nuevos proyectos de energía sustentable, que sirvan para satisfacer la creciente demanda de las poblaciones urbanas y dotar de energía a poblaciones rurales aisladas que carecen de ella (Federación, 2019). De manera particular, México tiene una ventaja geográfica importante en cuanto a la radiación solar recibida, ya que está ubicado en el llamado cinturón solar, que se refiere al grupo de países que reciben mayor cantidad de radiación solar en el mundo.

### **2.1.1 Energía solar**

El sol es el objeto más grande de nuestro sistema solar, con todos los demás cuerpos celestes girando alrededor de él, y es fuente, directa o indirectamente, de la mayoría de las fuentes renovables y de algunas no renovables como los combustibles fósiles, que básicamente son energía solar almacenada hace millones de años. Una de las formas en las que se puede clasificar la energía solar es tanto como calor, en ondas electromagnéticas, o como luz (fotones), por lo que es responsable de producir directamente la mayor parte de las fuentes de energía sustentable (Tiwari et al. 2016). Esta fuente de energía es la más abundante y permanente, puesto que de manera aproximada, la cantidad de radiación solar incidente sobre nuestro planeta por un periodo de 36 minutos es equivalente al consumo anual mundial de energía (Pa, 2017).

La energía solar es generada al convertir la radiación solar en electricidad ya sea por el método fotovoltaico y por medio de concentración solar para generación eléctrica (CSP). En el método fotovoltaico los fotones de la radiación solar son responsables directos de la generación de energía. Estos sistemas generalmente resultan ser más viables económicamente en pequeña escala (menores a 1000 kWp), como en

calculadoras solares, alumbrado público, bombeo de agua, telecomunicaciones o como un respaldo de energía en caso de emergencias. Por otro lado, la CSP utiliza lentes o espejos y un sistema de seguimiento solar para enfocar la radiación en un área más pequeña para generar altas temperaturas que operen una turbina de generación eléctrica. Este es un método indirecto que resulta factible económicamente para la generación de electricidad en gran escala (Tiwari et al. 2016).

Las aplicaciones CSP pueden ser clasificadas de acuerdo a la temperatura a la cual operan, ya sea de baja, media o alta temperatura. Las de baja temperatura, menores a 100°C, se basan en colectores planos, no cubiertos y tubos evacuados empleados principalmente para el calentamiento de agua sanitaria o de alberca. Las de temperatura media, entre 100°C y 400°C, utilizan tubos evacuados y concentradores solares para uso industrial, enfriamiento y calefacción de espacios. Por último, las de alta temperatura, mayores a 400°C, utilizan espejos para concentrar la energía y lograr temperaturas suficientemente altas para la generación de electricidad y otros procesos industriales (SENER, 2018).

Dentro de los sistemas de generación de energía de alta temperatura existen 3 principales tipos de tecnologías. La primera es el concentrador lineal o de canal parabólico (Figura 2.1), donde espejos largos en forma de U enfocan la luz del sol en tubos llenos de líquido que corren a lo largo de cada espejo. Una vez que el fluido se calienta, fluye a un intercambiador de calor donde se utiliza para hervir el agua y convertirla en vapor. El vapor funciona con una turbina generadora que produce electricidad (Rosales, 2016).



Figura 2.1 concentrador parabólico (Rosales, 2016)

También se cuentan con los discos parabólicos, donde espejos en forma de disco concentran la luz en una unidad de conversión eléctrica. Dentro de esta unidad, se calienta un receptor térmico lleno de fluido para alimentar una pequeña turbina generadora de electricidad. En ejemplo se muestra en la figura 2.2 (Lofthouse, Simmons and Yonk, 2016).

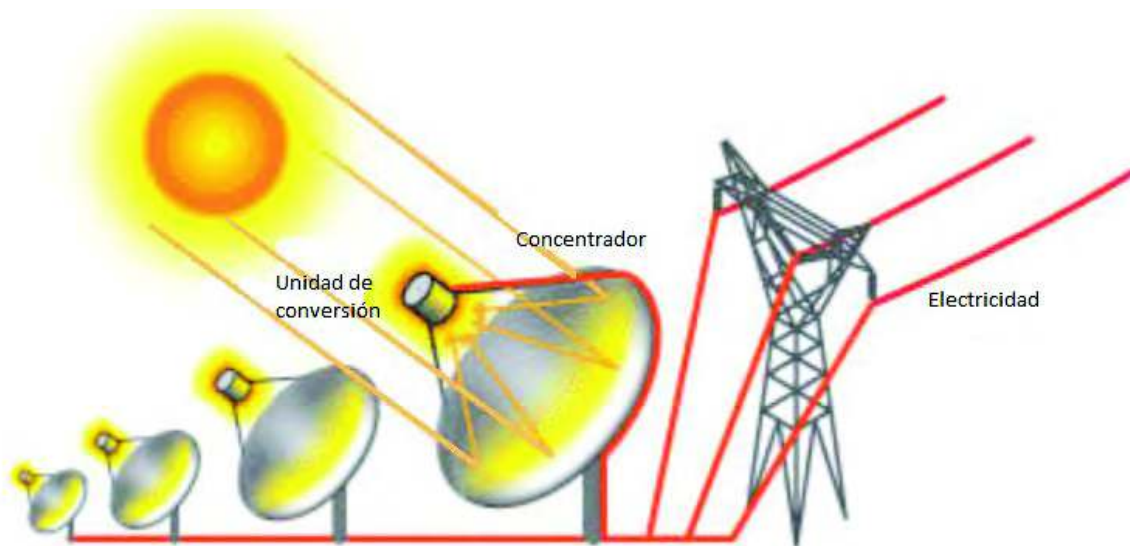
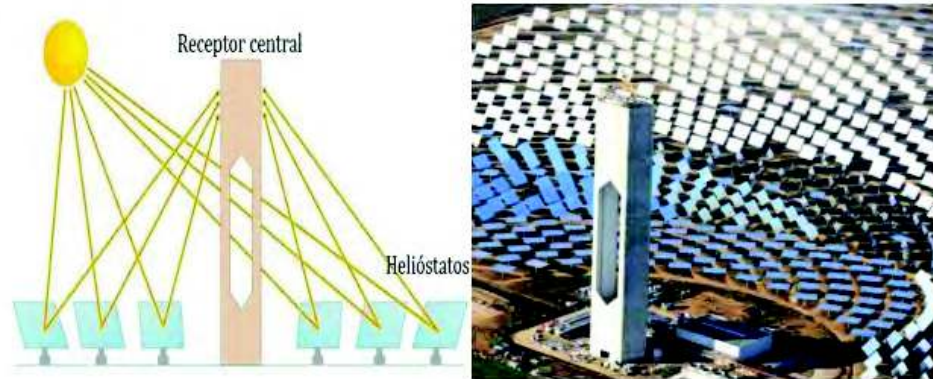


Figura 2.2 Discos parabólicos (Lofthouse, Simmons and Yonk, 2016)

Por último, se tienen los sistemas de torre central (Figura 2.3), que se caracterizan por estar compuestos de un grupo numeroso de concentradores individuales

llamados helióstatos, que siguen la posición del sol en todo momento y reflejan la radiación solar hacia la parte superior de una torre, donde se encuentra un receptor térmico, en donde un sistema de varios procesos utiliza fluidos y agua para generar vapor que acciona turbinas generadoras (Rosales, 2016).



*Figura 2.3 Sistema de torre central (Rosales, 2016)*

El principal objetivo de un helióstato es el de mantener siempre reflejados los rayos solares a la torre central, por lo que estos están montados sobre un mecanismo que permite un movimiento rotatorio y de elevación. Estos son el componente más importante de las plantas de torre central, ya que conforman aproximadamente el 50% del costo total de un proyecto de este tipo (Cock, 2018)

## **2.2 Estructura de los helióstatos**

De una manera general, el diseño típico de un helióstato consta de una superficie reflejante formada por espejos denominados facetas, que van de 1 a 3 metros cuadrados con un espesor de 1 a 4 milímetros (Figura 2.4). Estos están montados sobre una estructura de soporte formado por vigas las cuales caen sobre tubos horizontales que se apoyan sobre un pedestal que soporta toda la estructura (Carvajal, 2018).



*Figura 2.4. Superficie reflejante (Hernandez, 2013)*

La estructura de soporte consiste generalmente de elementos estructurales dispuestos de tal manera que soporten adecuadamente a las facetas. El tipo y material de estos elementos dependen del tamaño general del heliostato, ya que el momento de flexión en las vigas aumenta con el aumento de tamaño, por lo que heliostatos más grandes necesitan más cantidad de estructura de soporte para obtener la misma resistencia y rigidez estructural que los heliostatos pequeños (Björkman, 2014).

Según explica Pfahl (2019), la estructura del heliostato debe de ser lo suficientemente rígida para evitar deformaciones que afecten la orientación de la facetas, ya que en ciertas posiciones la estructura de soporte se orienta de forma diferente, lo que provoca una deformación y un ángulo diferente de las facetas en relación con la estructura, lo que da lugar a un error de inclinación significativo del panel del espejo. Además, expone que la velocidad de operación debe de estar por debajo de los 10 m/s, pasando ese límite, el concentrador debe de pasar a la llamada posición de supervivencia, orientándose de forma paralela al suelo, lo que permite tener una mejor resistencia a las corrientes de viento.

Cuando se diseña cualquier estructura, el factor más importante a tener en cuenta es la seguridad, basándose en las limitaciones de económicas y medioambientales que se tengan. Esto requiere la realización de diversos análisis y pruebas que sirvan como sustento a una propuesta final, por lo que el proceso de diseño se vuelva tanto

creativo como técnico. Cuando se tienen resultados de las pruebas realizadas, los componentes de la estructura se pueden rediseñar para tener un mejor desempeño de acuerdo a lo deseado, ya sea cambiando su geometría o su material (Hibbeler, 2015).

## **2.3 Cargas de viento**

La mayor carga externa que actúa sobre los helióstatos es el viento, el cual afecta su comportamiento mecánico. Estas cargas, tanto estáticas como dinámicas, alteran la posición y la forma del concentrador, por lo que es un requisito que el diseño tenga la capacidad de soportar ráfagas en posición de descanso y cualquier otra carga de viento en cualquier otra posición (Rosales, 2016). Como ejemplo de la importancia de tomar en cuenta estas consideraciones, tenemos la situación acontecida en septiembre de 2014, en donde el proyecto de energía renovable conocido como Aurora Solar, ubicado en Baja California Sur, quedó fuera de funcionamiento debido a las fuertes ráfagas del viento provocadas por el huracán Odile, esta planta tuvo una inversión de 100 millones de dólares y abastecía al 65% de las viviendas (ccee, 2016).

El viento, o el movimiento del aire con respecto a la superficie de la tierra, es causado fundamentalmente por las variaciones del calentamiento de la atmósfera, lo que provoca una fuerza mecánica que provoca presión sobre los diferentes objetos que se encuentren en la zona. Estas presiones deben de ser calculadas y ser tenidas en cuenta junto con la fuerza de la gravedad para poder determinar torsiones o deformaciones en los miembros de una estructura a diseñar (Simiu and Yeo, 2019).

Rosales (2016) explica que para analizar las cargas de viento sobre los helióstatos se toma como referencia el sistema llamado ejes viento (figura 2.5), en donde el viento se supone horizontal y paralelo al suelo. Como método de orientación, el eje x se hace coincidir con la dirección y sentido del viento, el eje z lleva la dirección de la vertical de la estructura y finalmente el eje y lleva la dirección y sentido adecuado

para completar el sistema de coordenadas. De esta forma, la posición del heliostato queda determinada por el ángulo formado entre la cara de las facetas con el suelo ( $\alpha$ ) y el del eje horizontal del heliostato con la dirección del viento ( $\beta$ ). En condiciones de funcionamiento, estos ángulos van variando para seguir la trayectoria aparente del sol y mantener un apuntamiento hacia la torre central. Para propósitos de diseño estructural, el ángulo  $\beta$  se toma con un valor de cero, ya que supone el caso en donde se tiene una mayor área de afectación del viento.

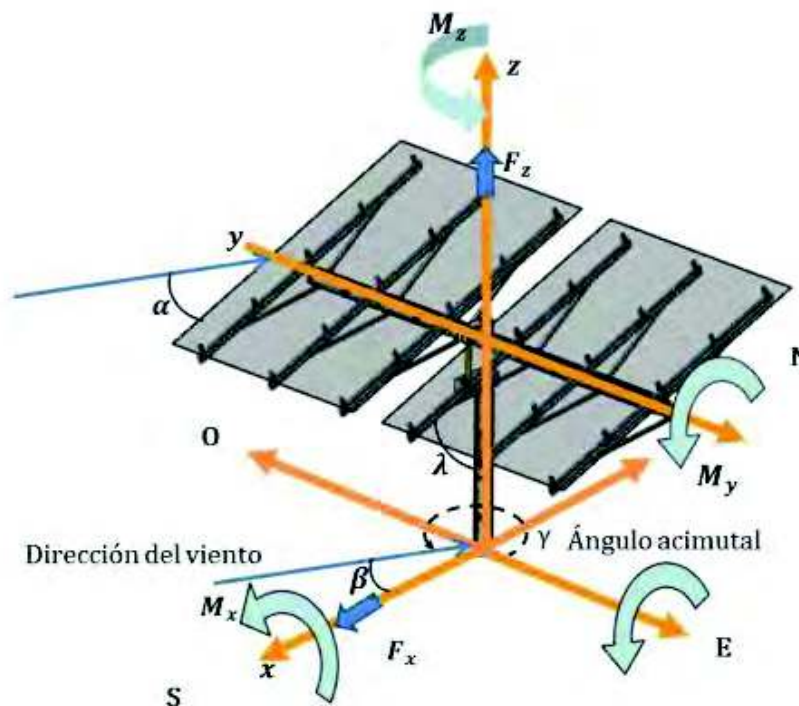


Figura 2.5 ejes viento (Rosales, 2016)

## 2.4 Esfuerzos y deformaciones

La acción de la fuerza de la gravedad afecta la estructura del heliostato, reflejándose como deformación. Para realizar un análisis estático, se cuenta con el método de elementos finitos, en donde se establecen las propiedades del material, sujeciones del modelo y las fuerzas actuantes sobre la estructura, como es su propio peso y carga debida a la acción del viento. Estas deformaciones se representan por (2.1), en



donde K es la matriz de rigidez global, la cual contiene principalmente los grados de libertad de cada elemento; F es la matriz que contiene las magnitudes de fuerzas localizadas en cada nodo de los elementos y Q es el vector que contienen los desplazamientos de todos los nodos de un elemento.

$$KQ = F \quad (2.1)$$

El cálculo de esfuerzo en los elementos del estudio estático se genera una vez obtenidas las deformaciones, mediante (2.2), donde  $\sigma$  es la matriz que contiene los esfuerzos de cada elemento, D es la matriz dada por las propiedades del material (Modulo elástico y relación de Poisson), B es la matriz de deformación unitaria y q es el vector de desplazamiento de los nodos de un elemento.

$$\sigma = DBq \quad (2.2)$$

Una vez obtenidos los resultados de esfuerzo y deformación es importante calcular el factor de seguridad en la estructura del helióstato. En (2.3) se muestra la expresión para el cálculo del factor de seguridad, donde  $\sigma_{limite}$  es el esfuerzo límite permisible y  $\sigma$  es el esfuerzo obtenido en los elementos de la estructura. Se busca encontrar una relación mayor a 1 (Nieblas moroyoqui *et al.*, 2012).

$$FOS = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma} \quad (2.3)$$

Para realizar este análisis de forma rápida y precisa, se cuenta con el uso de ingeniería asistida por computadora, o CAE, en donde se hace uso de tecnologías y herramientas de software para realizar evaluaciones como análisis estructural, fatiga y fractura, dinámica y cinemática o análisis de fiabilidad (Chnag, 2015).

## 2.5 Método de elemento finito.

Para facilitar el análisis de las estructuras, se cuenta con técnicas como el método de volumen y elemento finito, el cual, reduce el problema a un número determinado de incógnitas, divide el dominio en elementos e interpola los resultados en los puntos entre cada uno de ellos. Estos puntos son denominados nodos y su densidad en relación al total del modelo, se le denomina malla. (Madenci and Guven, 2015). Para realizar este análisis de forma rápida y precisa, se cuenta con el uso de ingeniería

asistida por computadora, o CAE, en donde se hace uso de tecnologías y herramientas de software para realizar evaluaciones como análisis estructural, fatiga y fractura, dinámica y cinemática, predicción de probabilidad de falla o análisis de fiabilidad (Chnag, 2015).

## 2.6 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Un fluido puede ser compresible o incompresible, viscoso o no viscoso, constante o inestable y laminar o turbulento. Por otra parte, un fluido puede ser newtoniano (si la viscosidad depende sólo de la temperatura y la presión, y el esfuerzo cortante es una función lineal de la velocidad de deformación del fluido) o no newtoniano (el esfuerzo cortante es una función no lineal de la velocidad de deformación del fluido). Todos los fluidos son compresibles en cierta medida, pero se puede considerar a los fluidos más comunes como incompresibles, cuyo movimiento se rige por la siguiente ecuación (2.4) de Navier-Stokes (N-S):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = u\nabla u + v\nabla^2 u - \frac{\nabla p}{\rho} + f \quad (2.4)$$

lo que demuestra que la aceleración  $\partial u / \partial t$  de una partícula de fluido se puede determinar por el efecto combinado de advección  $u\nabla u$ , difusión  $v\nabla^2 u$ , gradiente de presión  $\nabla p / \rho$ , y la fuerza del cuerpo  $f$ . Las ecuaciones N-S se pueden derivar directamente de las leyes de conservación de masa, momento y energía. Se debe tener en cuenta que para cada partícula de un campo fluido tenemos un conjunto de ecuaciones N-S. El cambio en la velocidad de una partícula depende de cómo las partículas que la rodean están presionando a su alrededor, de la resistencia a su movimiento, cambios en el gradiente de presión, y cómo las fuerzas externas como la gravedad actúan sobre él.

En coordenadas cartesianas en 3D, las ecuaciones N-S están dadas por la ecuación (2.5):

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) = v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + f_x$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) = v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \quad (2.5)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) = v \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + f_z$$

donde  $u$ ,  $v$  y  $\omega$  son componentes de velocidad de la partícula de vector  $u$  (Herrera Jiménez, 2016).

Bhaskaran y Collins (2015) explican de manera general, que la estrategia de la CFD es reemplazar el dominio de problema continuo con un dominio discreto mediante ecuaciones diferenciales parciales (EDP) en una cuadrícula (Figura 2.). Con esta discretización, cada variable de estudio se resuelve solo en los puntos de la cuadrícula y los puntos fuera de esta se determinan por medio de interpolación de los puntos más cercanos.

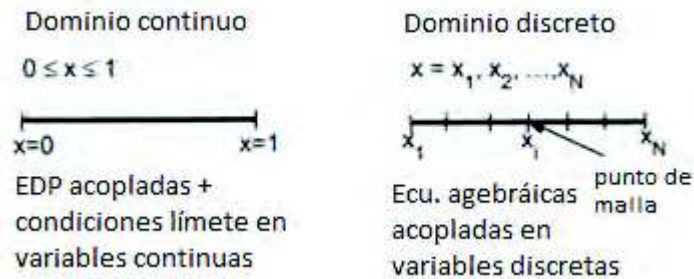


Figura 2.6 Ejemplo de discretización (Bhaskaran and Collins, 2015)

Cuando las ecuaciones discretizadas se resuelven para obtener los valores de la variable dependiente en los nodos de la red, el resultado admite diferentes enfoques, como el método de los elementos finitos, el método de diferencias finitas o el método de los volúmenes finitos (FVM). En el caso del método de elemento finito y de diferencias finitas, las ecuaciones son discretizadas o transformadas en ecuaciones algebraicas integrándolas sobre cada elemento discreto, para después ser resuelto para calcular los valores de la variable dependiente para cada uno de los elementos.

Por otro lado, en el FVM, algunos de los términos en la ecuación de conservación se convierten en flujos faciales y se evalúan en las caras de volumen finito. Porque el flujo La entrada de un volumen determinado es idéntica a la salida del volumen adyacente, el FVM es estrictamente conservador. Esta propiedad inherente a la conservación convierte al FVM en el preferido para resolver problemas de CFD (Moukalled, Mangani and Darwish, 2016).

Este enfoque a la se ajusta a la discretización de ecuaciones diferenciales parciales, ya que permite la conservación a nivel local en los diferentes subdominios discretizados. Por esta razón el FVM es utilizado en muchos campos de la ingeniería, como la mecánica, aeroespacial, civil o nuclear, y en otros que no lo son, como la meteorología, el medio ambiente y el medio ambiente ciencias del mar o medicina (Stabile and Rozza, 2019). Esto, junto con los avances que se van generando a nivel computacional, permite simular sistemas cada vez más complejos y que mayor precisión en una gran variedad de fenómenos físicos.

### **2.6.1 Modelos de turbulencia**

La relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas de un fluido puede provocar el surgimiento de turbulencia en su flujo. Si la viscosidad es suficientemente mayor con respecto a la fuerza inercial, esta es capaz de amortiguar los pequeños remolinos y el flujo tiende a ser laminar. Si por el contrario las fuerzas viscosas son pequeñas con relación a las inerciales, esta amortiguación no tiene lugar, lo que provoca remolinos tanto a pequeña como a mayor escala (Capote, Alvear and Abreu, 2008).

Con el desarrollo de la CFD, ha provocado la necesidad de modelar estos flujos de una manera precisa, aunque actualmente no es posible una resolución exacta de ellas, existen diversos modelos basados en las escalas espaciales y temporales, la tridimensionalidad, estacionariedad o en fluctuaciones rápidas del flujo, por lo que se debe elegir el que más se adapta al caso de estudio. (Cerpa, Nieto and Londoño,

2016). La tabla 2.1 muestra algunos de los modelos más usados y sus ventajas y desventajas que presentan de acuerdo a los diferentes casos de aplicación.

Modelo	Ventajas	Desventajas
Modelo de longitud mixta	*Fácil de implementar, requiere menos tiempo computacional *Bien establecido *Adecuado para capas de flujo delgadas	*Incapaz para flujos con separación o recirculación
Spalart-Allmaras	*Cálculo algebraico lo que provee cómputo económico *Buen desempeño en muchos flujos de gradiente de presión adverso *Adecuado para aerodinámica externa	*Complicaciones con geometría compleja
Standard k- $\epsilon$	*Solo necesita la introducción de los límites de frontera *Buen desempeño en muchos flujos industriales relevantes *Es el modelo más validado	*Muy pobre desempeño en flujos con gradiente de presión adverso
Wilcox k- $\omega$	*No requiere amortiguación extra en los límites para flujos con bajo número de Reynolds *Predicción de flujos turbulento cerca de las condiciones de frontera	*La predicción de la separación es precoz y excesiva
SST k- $\omega$	*Las funciones de mixtas permiten el uso del modelo k- $\omega$ cerca de la pared y k- $\epsilon$ en una región totalmente turbulenta lejos de ella *Adecuado para flujos con o sin gradientes de presión adversos	*Las funciones adicionales aumentan la complejidad y los recursos computacionales necesarios

Tabla 2.1 Comparación de modelos de turbulencia (Chilvers, 2014)

## 2.7 Método de volumen finito

El método de volumen finitos (FVM) permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Se puede considerar como alternativa a los métodos de diferencias finitas y elementos finitos. El FVM debe gran parte de su flexibilidad y popularidad al hecho de que la discretización se lleva a cabo directamente en el espacio físico, sin necesidad de ninguna transformación entre el sistema de coordenadas físico y computacional. El primer paso de este método integrar las EDP sobre los elementos (o volúmenes) sobre el cual el dominio ha sido discretizado, después, se usa transforman los integrales de volumen en integrales de superficie, para posteriormente ser convertidas en discretas e integradas numéricamente mediante el uso de puntos de integración (Moukalled, Mangani and Darwish, 2016).

La integración sobre los volúmenes de control es lo que distingue al FVM de otros métodos. Las ecuaciones que resultan de la integración expresan el principio de conservación para cada volumen de control, de la misma forma en que la ecuación diferencial expresa esto mismo para un volumen de control infinitesimal. Como los

puntos de integración para volúmenes de control adyacentes están en la misma ubicación (en las caras), los flujos son exactamente iguales y opuestos; en consecuencia, no se crean cambios en la variable de conservación a nivel local (Cardiff and Demirḋ, 2018).

La figura 2.7 ilustra la discretización del volumen, Las letras mayúsculas P, E, W, N, S, F, B identifican los centros de los volúmenes de control, mientras que las letras minúsculas e, w, n, s, f, b a las caras de los mismos.

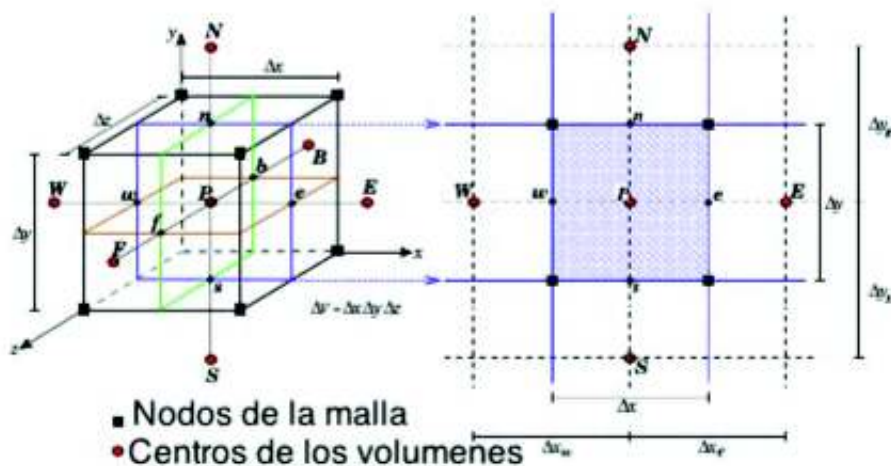


Figura 2.7 Discretización de volumen (Ortega, 2016)

## 2.8 Diseño mecánico

En esta sección se definen los conceptos de diseño mecánico con base a Shigley (2008), el cual ha sido desde su primera edición, uno de los libros más referenciados en varias disciplinas de la ingeniería.

### 2.8.1 El proceso de diseño mecánico

El diseño mecánico como una tarea compleja que requiere muchas habilidades, en donde es necesario subdividir grandes relaciones en una serie de tareas simples, por lo que se vuelve un proceso iterativo con muchas fases interactivas. Así mismo, se cuentan con un gran número de recursos para apoyar al diseñador, entre los que se incluyen numerosas fuentes de información y una gran abundancia de herramientas

de diseño por computadora como las anteriormente mencionadas. Hay funciones que deben realizarse mediante códigos y normas, por la siempre presente economía, seguridad y consideraciones de responsabilidad legal del producto. La supervivencia de un componente mecánico está frecuentemente relacionada con el esfuerzo y la resistencia. Los aspectos de incertidumbre siempre han estado presentes en el diseño en la ingeniería y se abordan de manera típica mediante el factor de diseño y el factor de seguridad. El ingeniero de diseño no sólo necesita desarrollar competencia en su campo, sino que también debe cultivar un fuerte sentido de responsabilidad y ética de trabajo profesional.

### **2.8.2 Fases de diseño**

El proceso completo que a menudo se bosqueja como se muestra en la figura 2.8, comienza con la identificación de una necesidad y la decisión de hacer algo al respecto. Después de muchas iteraciones, termina con la presentación de los planes para satisfacer la necesidad. De acuerdo con la naturaleza de la tarea de diseño, algunas fases de éste pueden repetirse durante la vida del producto, desde la concepción hasta la terminación. Por lo general, el proceso de diseño comienza con la identificación de una necesidad. Con frecuencia, el reconocimiento y la expresión de ésta constituyen un acto muy creativo, porque la necesidad quizá sólo sea una vaga inconformidad, un sentimiento de inquietud o la detección de que algo no está bien. A menudo la necesidad no es del todo evidente; el reconocimiento se acciona por una circunstancia adversa particular o por un conjunto de circunstancias aleatorias que se originan casi de manera simultánea.

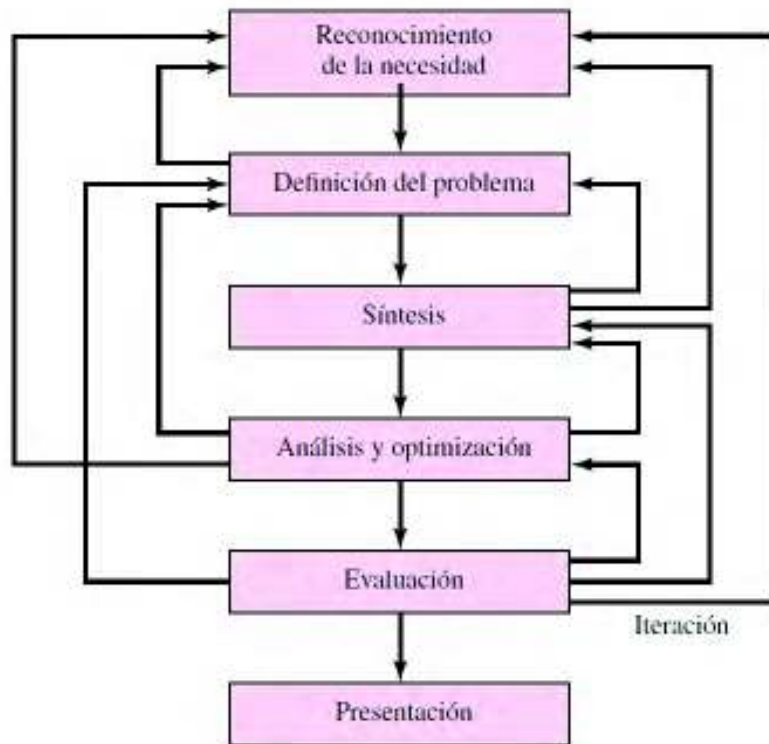


Figura 2.8 Fases de diseño (Shigley and Mischke, 2008)

Puede observarse y debe destacarse, que el diseño es un proceso iterativo en el cual se procede a través de varios pasos, se evalúan los resultados y luego se regresa a una fase inicial del procedimiento. De esta manera, es posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizar y optimizarlos y regresar a la síntesis para ver qué efectos tiene sobre las partes restantes del sistema y tomar acciones de rediseño.

Tanto el análisis como la optimización requieren que se construyan o inventen modelos abstractos del sistema que admitirá alguna forma de análisis matemático. A estos modelos se llama modelos matemáticos. Cuando es creado, se espera que sea posible encontrar uno que simule muy bien al sistema físico real. Como se indica en la figura 2.8, la evaluación es una fase significativa del proceso de diseño total que representa la prueba final de un diseño exitoso.



### **2.8.3 Consideraciones de diseño**

Algunas veces la resistencia que requiere un elemento de un sistema significa un factor importante para determinar su geometría y dimensiones. En esa situación se dice que la resistencia es una consideración de diseño importante. Cuando se emplea la expresión consideración de diseño, se involucra de manera directa una característica que influye en el diseño del elemento, o tal vez en todo el sistema. A menudo se deben considerar muchas de esas características en una situación de diseño específica. Las propiedades se relacionan de manera directa con las dimensiones, el material, el procesamiento y la unión de los elementos del sistema. Las características pueden estar interrelacionadas, lo que afecta la configuración del sistema total.

## **2.9 Sistemas CAD/CAE**

Para facilitar y agilizar el proceso de diseño del concentrador solar, se empleará el uso de sistemas CAD/CAE. Macko *et al* (2016) explican que el hacer uso de estos programas es un apoyo fundamental la hora de realizar un diseño estructural, ya que reduce el tiempo de documentación del proyecto y permiten enfocarse en la parte creativa. Además, ofrecen la posibilidad de presentar productos no existentes y realizar sobre ellos diferentes análisis variando tanto su geometría y los materiales con los que se pueden fabricar.

El hacer uso de programas CAE ha impulsado el desarrollo de diferentes campos de la ingeniería, ya que permite simular sistemas que por otros medios sería demasiado complejos de analizar. Particularmente, en el caso de la CFD, ya que le permite simular situaciones con flujos complejos o hasta peligrosos de una manera sencilla, en poco tiempo y poco costosa. Además, permite presentar los resultados de una forma visual dinámica por medio de animaciones, gráficas, mapas de calor o vectores, con lo que se logra un mejor descripción del sistema analizado (Versteeg and Malalasekera, 2007)

## 2.10 Estudios previos

Diversos estudios se han realizado sobre las cargas provocadas por la fuerza del viento y su efecto sobre la estructura de los heliostatos. Zang, Wang y Liu (2009) analizan la respuesta mecánica de la estructura de los heliostatos bajo cargas de viento por medio de software de elemento finito, en donde realiza un estudio estático describir la intensidad y uno dinámico para presentar las órdenes de frecuencia natural y modo de vibración. Cock (2018) realizó un estudio similar en su diseño de un heliostato modular, en donde se toman velocidades de viento operacionales y de supervivencia de la estructura para sustentar el diseño. en estos casos, las presiones del viento se toman de estudios previos realizados sobre modelos a escala en túneles de viento o directamente como una fuerza sobre las facetas del heliostato, por lo que no necesariamente reflejan de manera precisa el comportamiento del flujo del viento sobre la estructura y como se distribuyen las presiones sobre ella.

Por otro lado, Vázquez (2016) establece en su disertación doctoral, una metodología para determinar las corrientes de viento dinámicas en condiciones atmosféricas turbulentas y en una tesis similar, Hariram (2015) realiza un estudio extenso del comportamiento de las ráfagas de viento alrededor de un heliostato. En ambos casos, los estudios se basan solo en estudiar el comportamiento del viento sobre la estructura a través de la dinámica de fluidos computacional y en qué puntos se reciben las presiones, pero no comprenden un estudio mecánico de los elementos acerca la respuesta de esta a las cargas presentadas

Un estudio en que se realizan ambos estudios es el realizado por Herrera (2016) en donde primeramente se realiza un estudio CFD para simular el flujo del viento y los datos obtenidos se utilizan como datos de entrada para un estudio de elemento finito y observar la respuesta de la estructura a estas fuerzas. En esta tesis, se sigue una metodología similar a esta, ya que logra representar el sistema completo de una manera más cercana a la realidad y se puede tener un mejor sustento de los diseños.

### 3 METODOLOGIA O MODELO

En este capítulo se presentan las diferentes actividades a realizar para cumplir con los objetivos planteados en el primer capítulo. La metodología se divide en 3 secciones principales, diseño mecánico, dinámica de fluidos computacional (CFD) y análisis de elemento finito. En la primera etapa se busca establecer las consideraciones generales y realizar un modelo CAD. En la siguiente etapa, se determinan las presiones presentadas sobre la superficie de la estructura. Por último, se exportan los resultados de la etapa anterior para analizar el efecto de la presión generada por el viento y obtener las deformaciones sobre la estructura por medio del método de elemento finito, con el fin de cumplir con los requerimientos definidos en la primera etapa. Como se muestra en el capítulo 2, el proceso de diseño es altamente iterativo, por lo que constantemente se regresa a fases anteriores, como realizar ajustes en el modelo CAD dependiendo del análisis a analizar o cambiar aspectos del diseño general dependiendo de los resultados de estos. La metodología se resume en la figura 3.1.



Figura 3.1 Metodología de la investigación

### **3.1 Diseño mecánico**

En esta etapa se busca definir el diseño estructural del helióstato. Se toman consideraciones iniciales mecánicas y se realiza un modelo 3D en un sistema CAD.

#### **3.1.1 Consideraciones de diseño**

Para poder definir la propuesta inicial del helióstato es necesario definir las condiciones del entorno operacional y los requisitos que se esperan que se cumplan. Estas condiciones fueran establecidas por la institución con base a las necesidades de instalación, funcionamiento y resistencia de la estructura. A continuación, se enuncian con las condiciones establecidas:

1. Restringir el peso de la estructura a no más de una tonelada.
2. Relativamente fácil de transportar instalar y dar mantenimiento.
3. Emplear materiales disponibles en el mercado.
4. Fácil y barato de fabricar.
5. Deformación máxima no mayor a 1 cm. en operación con velocidad de viento pico de 9 m/s.
6. Resistir fuerzas debido al viento de 36.6 m/s en estado de reposo sin sufrir deformaciones plásticas.
7. Protección contra la corrosión.

#### **3.1.2 Diseño CAD**

Para poder definir la estructura del helióstato, además de las consideraciones de diseño, se deben de revisar reportes técnicos e investigaciones similares, así como información sobre los diferentes tipos, tamaños y aplicaciones de diferentes seguidores solares para poder seleccionar la que más se adecue al caso. En esta investigación, se utiliza el software de diseño Solidworks para poder diseñar la geometría de las piezas y su material, teniendo en cuenta los perfiles estructurales comerciales disponibles en el mercado. El ensamble de los diferentes componentes de la estructura mediante un modelo virtual permite realizar una evaluación de las características relevantes como peso, dimensiones o relaciones entre ángulos. Esto

permite plantear diferentes versiones, variando aspectos como dimensiones, calibres o materiales de los componentes, y seleccionar la que mejor se ajuste a los criterios de diseño (Herrera Jiménez, 2016). La figura 3.2 muestra el modelo del heliostato.

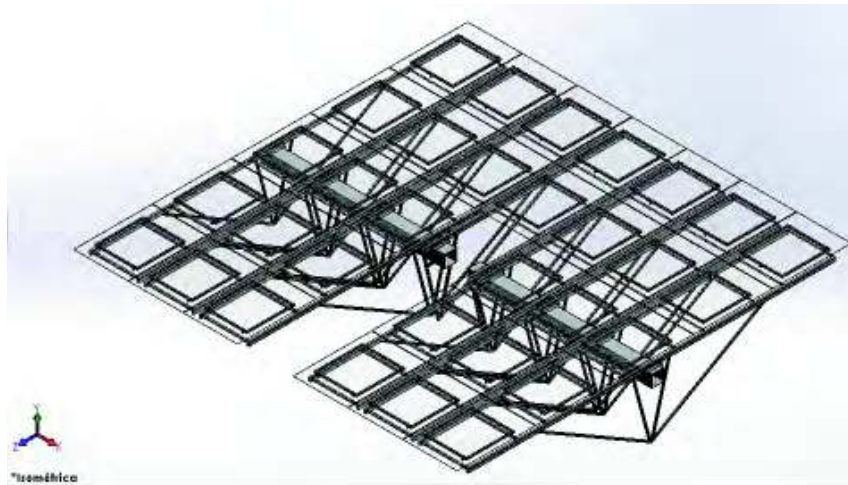


Figura 3.2 Modelo del heliostato

### 3.2 Dinámica de fluidos computacional

Para poder realizar la CFD, se debe de elegir los modelos con los cuales el sistema trabaja, esto permite definir las ecuaciones que el software resolverá. Primeramente, se tomará el flujo del viento de una manera turbulenta para modelar de mejor manera el flujo que se forma al impactar la estructura. Como ecuación de turbulencia, se utilizará el modelo SST  $k-\omega$ , el cual fue propuesto inicialmente para solucionar problemas dentro del campo de la ingeniería aeronáutica, pero con el paso del tiempo ha sido aceptado dentro de otros sectores (Uslu, 2014). Hariram (2015), en su tesis doctoral, explica que este modelo presenta buenas características para simular el flujo sobre los heliostatos, ya que conjunta modelos similares ( $k-\epsilon$  y  $k-\omega$ ), lo que da como resultado una mejor precisión en los límites del dominio y una baja sensibilidad a la turbulencia en el flujo libre.

En esta etapa, la ecuación de continuidad (2.5) se ejecuta en conjunto con el modelo de turbulencia de manera reiterada un número de veces determinadas llamadas iteraciones, cada una tomando datos de la secuencia anterior hasta llegar a una solución estable. Se sabe que se llegó a esta solución cuando la suma de los

residuales de la ecuación de conservación llega a un mínimo computable, esto es conocido como convergencia de resultados (Stolarski, Nakasone and Yoshimoto, 2006).

En esta etapa, a petición de la institución, se usará el módulo ANSYS fluent, el cual utiliza el método de volumen finito para resolver problemas de dinámica de fluidos computacional, desde la discretización del volumen de control, la formulación de las ecuaciones integrales, su aproximación y la solución del sistema algebraico final (Osses, 2016)

### 3.2.1 Puntos de operación

Se analizarán 4 puntos (Tabla 3.1) de posición con ángulos diferentes y a velocidades diferentes con el viento de forma frontal a las facetas del concentrador (Figura 3.3). Los primeros 3 son de operación y representan diferentes casos del heliostato cuando está en funcionamiento, en donde se toma una velocidad de viento de 9 m/s. El último punto es de supervivencia, a una velocidad de viento de 36.6 m/s para evaluar la integridad del concentrador en posición de abatimiento o reposo, esto es, normal al viento de forma paralela al suelo.

Punto	Posición del heliostato ( $\alpha$ )	Velocidad del viento (V) (m/s)
1	30	9
2	45	9
3	60	9
4	0	36.6

*Tabla 3.1 Escenarios de simulación*

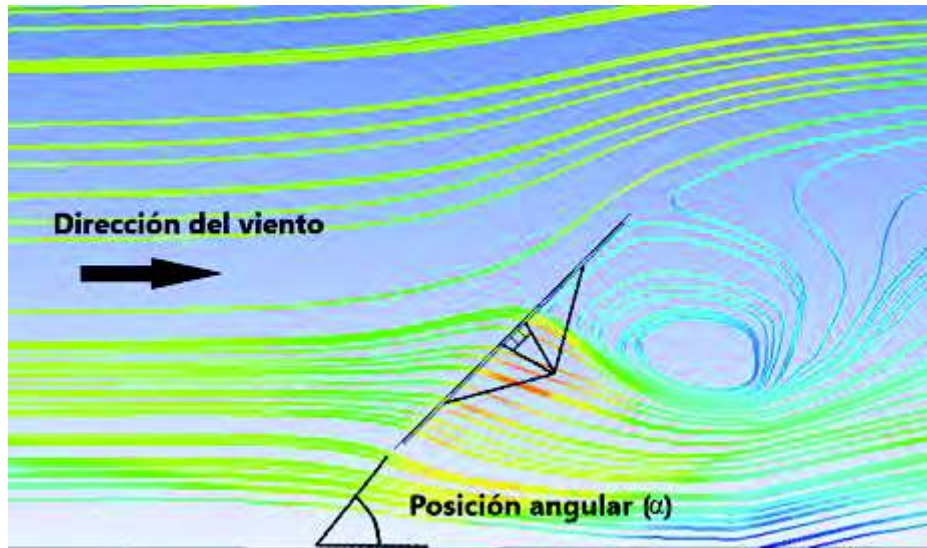


Figura 3.3 Dirección del viento y posición angular

### 3.2.2 Dominio computacional

Se debe de seleccionar un dominio alrededor del heliostato que permita delimitar el espacio con el cual se trabaja. Para esto, existen algunas consideraciones y recomendaciones para lograr que el volumen con el cual se trabaja sea el indicado y cumpla con los requerimientos de continuidad. Hariram (2015) explica en su tesis, que, para definir el volumen de una manera adecuada, es necesario que las líneas de flujo no se compriman cerca de los límites de la región. De igual manera, resalta la importancia de definir correctamente las condiciones de frontera, por las cuales el flujo entra y sale del sistema. El comportamiento del viento alrededor de la estructura se muestra en la figura 3.4.

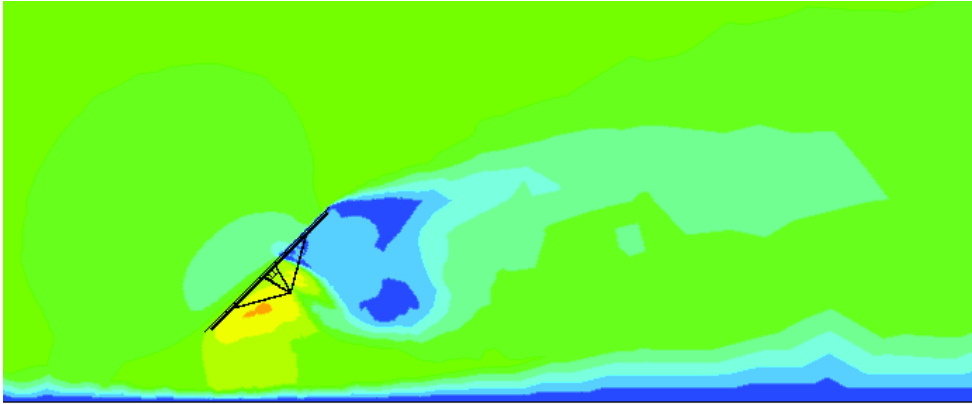


Figura 3.4 Flujo de viento sobre la estructura

Franke *et al.* (2007) en su manual de lineamientos para simulación CFD, presenta un método para determinar el dominio computacional basado en la altura de la estructura a analizar, definiendo como  $H_n$  la distancia desde el piso hasta el punto más alto de la estructura. Como límite vertical, se concreta que el punto más alto del dominio debe de estar a una altura de  $5H$ , por lo tanto, la altura total de la región es de  $6H$ . En cuanto a la extensión longitudinal, recomiendo una distancia de  $5H$  frente a la estructura y una de  $15H$  después de ella. Para las regiones laterales, se aconseja una distancia de por lo menos  $2.3H$  entre la región lateral de la estructura y los límites transversales de la región.

Jubayer y Hangan (2012) hacen uso de estas recomendaciones para su artículo sobre cargas de viento en paneles fotovoltaicos, en donde presentan de manera gráfica la forma de representar el dominio computacional, como se muestra en la figura 3.5.

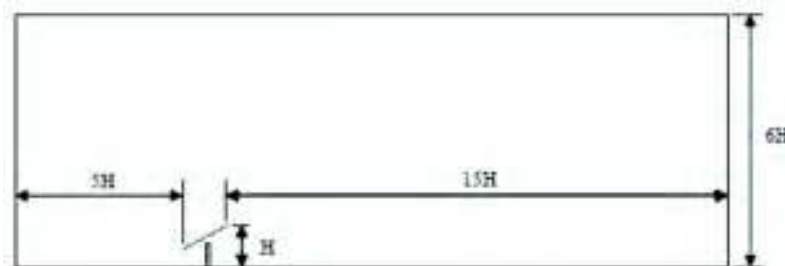


Figura 3.5 Dominio computacional (Jubayer and Hangan, 2012)



### 3.2.3 Mallado del dominio

Teniendo definido el dominio de control, el siguiente paso es definir el mallado necesario para la simulación. En esta etapa se divide la región en pequeños volúmenes que permiten que las ecuaciones discretas se resuelvan de forma iterativa para todo el dominio. Uslu (2014) explica que, para el caso de los helióstatos, como el volumen de la estructura es muy reducido en comparación el volumen de dominio total, la densidad de la malla alrededor de los elementos del helióstato debe de ser más densa, para poder capturar con precisión el flujo de aire turbulento que se forma en esta región. El mallado del dominio se muestra en la figura 3.6.

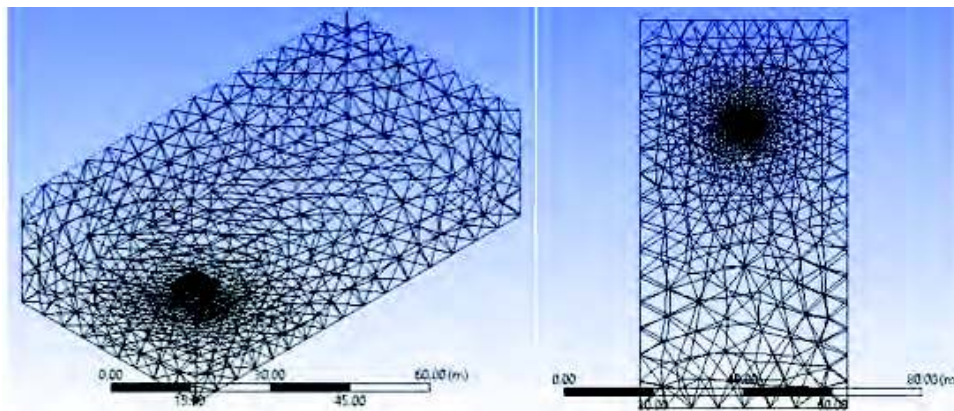


Figura 3.6 Mallado del dominio computacional

Para la calidad de la malla, Franke *et al.* (2007), explica que para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, una calidad de malla de entre 0.75 a 0.85 es aceptable para la mayoría de aplicaciones de ingeniería.

### 3.2.4 Simulación y resultados

Con los parámetros anteriores, se realizará la simulación de fluidos computacional hasta alcanzar la convergencia de los resultados. Estos determinarán la distribución de presiones sobre la estructura del concentrador solar y se mostrarán por medio de mapas de calor para visualizar las zonas con mayor carga alrededor de la estructura del helióstato. Estos datos serán exportados a la siguiente etapa de elemento finito.

### **3.3 Simulación elemento finito**

Teniendo las cargas resultantes de la etapa de CFD, la respuesta de la estructura se puede analizar por método de elemento finito. Al tratarse de 2 estudios diferentes, estos se llevan a cabo en su dominio físico particular, por lo que estos se deben conectar apropiadamente por las regiones de frontera adecuadas, de manera que se interrelacionen correctamente y que los resultados de salida de la primera simulación sirvan directamente de datos iniciales para la segunda (Votyakov and Papanicolas, 2017). En esta etapa se utilizará el módulo ANSYS mechanical, tanto para el mallado de elementos, como para la resolución del sistema.

#### **3.3.1 Mallado de elementos**

Al tratarse de análisis estructural, los diferentes elementos y su unión pueden recibir diversos tratamientos dentro del método de elemento finito. Rosales (2016) realiza la segmentación de los diferentes elementos de la estructura del helióstato y su tratamiento dentro del método de elemento finito. Cada elemento estructural que mantiene su forma de manera constante durante toda su longitud y que esta sea mayor sea al menos 10 veces mayor que su sección transversal más grande es tratada como viga; los elementos de rigidez como los componentes de unión son elementos sólidos; finalmente, las facetas pueden ser tratadas como elementos sólidos o como elementos de superficie.

#### **3.3.2 Simulación y resultados**

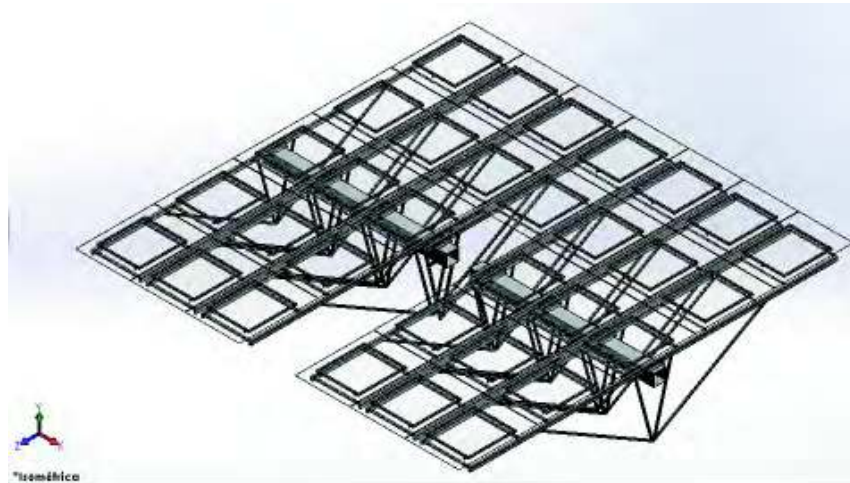
Con base a los resultados de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional y de elementos finitos, se presentarán los resultados finales de deformaciones para los puntos de operación y de factor de seguridad para la posición de reposo. Primeramente, se presentarán los resultados con la estructura sometida solamente a la fuerza de gravedad para visualizar el comportamiento de la estructura al soportar su propio peso. Posteriormente, se presentarán los resultados del análisis con la estructura sometida tanto a la fuerza de gravedad como a las presiones resultantes de la fuerza del viento.

Para los 3 puntos de operación, solo se busca determinar las deformaciones presentadas a lo largo de la estructura, ya que a esta velocidad solo se ve afectada la funcionalidad del concentrador y no representa un riesgo sobre la integridad de la estructura (Pfahl, 2019). Por otro lado, para el punto 4, el de supervivencia, solo es de importancia el factor de seguridad, ya que a esta velocidad el helióstato no está en funcionamiento y solo se busca asegurar la integridad de la estructura.

## 4 IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología descrita en el segmento anterior. Primeramente, se presenta el modelo del helióstato y sus características de diseño. Posteriormente se presentan los datos obtenidos de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional y de elemento finito. La figura 4.1 muestra el modelo CAD del helióstato. Esta propuesta se basó en modelos previos similares estudiados por el CEToC, pero con la intención de reducir su peso, hacerlo más fácil de ensamblar e instalar.

### 4.1 Diseño mecánico



*Figura 4.1 Modelo virtual del helióstato*

El diseño de la estructura se conforma de secciones desmontables sujetadas por tornillos, lo cual facilita su transporte, instalación y labores de mantenimiento de posibles piezas defectuosas o desgastadas. además, los componentes se definieron utilizando perfiles estándar.

De manera general, la estructura está montada sobre 2 secciones cuadradas transversales principales de 8 pulgadas. Sobre de estas, se ensamblan 8 largueros longitudinales, los cuales, soportan un marco en cuadro que sirve de base para los espejos reflejantes.

### 4.1.1 Datos del diseño

- Peso total del heliostato: 908.78 Kg.
- Peso de la estructura: 632.74 Kg.
- Peso de espejos: 276.16 Kg.
- Área de captación de radiación solar: 37.44 m<sup>2</sup>.

## 4.2 Dinámica de fluidos computacional

A continuación, se describen los resultados obtenidos de la simulación de volumen finito para los diferentes puntos de operación y de abatimiento o supervivencia. Para cada uno, se presenta primeramente la gráfica de convergencia para mostrar la estabilidad de los resultados y que se logró llegar al mínimo computable de los residuales de la ecuación de conservación en conjunto con el modelo de turbulencia elegido. Posteriormente, se muestra el mapa de calor de la estructura para visualizar la distribución de presión sobre la estructura, el cual se basa en una escala de colores para señalar las zonas de mayor presión.

En esta etapa, se utilizó una calidad de malla de 0.78, que según lo establecido en el capítulo 3, es aceptable. Se utilizó una forma tetraédrica adaptativa, la cual es más densa en las zonas cercanas a la estructura y aumenta de tamaño según se acerca a los límites del dominio computacional.

### 4.2.1 Punto de operación 1 ( $\alpha=30^\circ$ , $V=9$ m/s)

Para lograr la convergencia de resultados se necesitaron 1046 iteraciones, el flujo a través de la estructura se muestra en la figura 4.2.

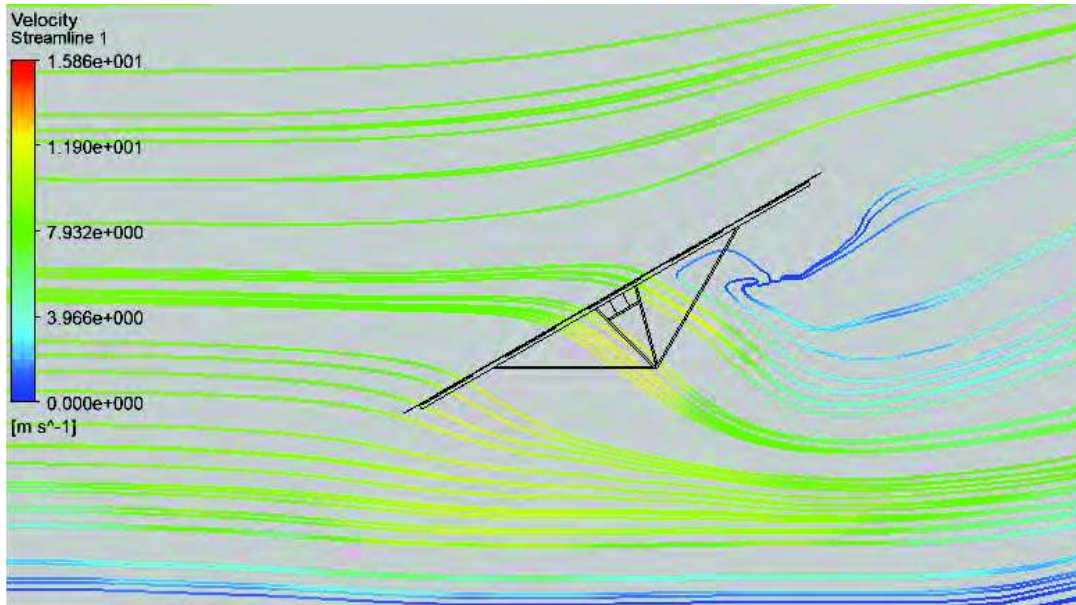


Figura 4.2 Flujo a través de la estructura punto 1

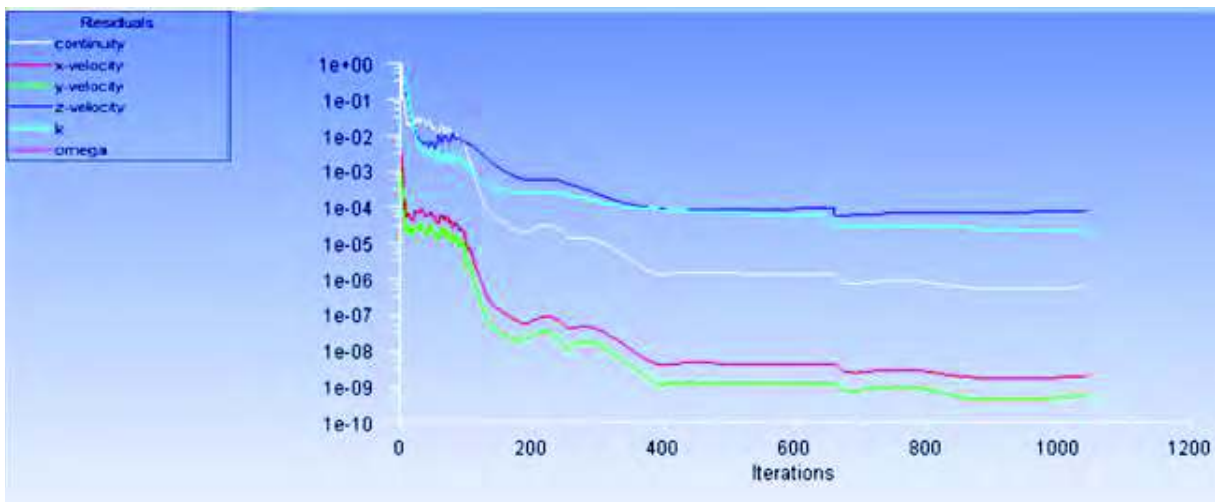


Figura 4.3 Convergencia punto 1

La figura 4.3 muestra cómo se llega a un mínimo computable de los residuales de la ecuación de conservación de energía y de los componentes del modelo de turbulencia en la iteración 1046.

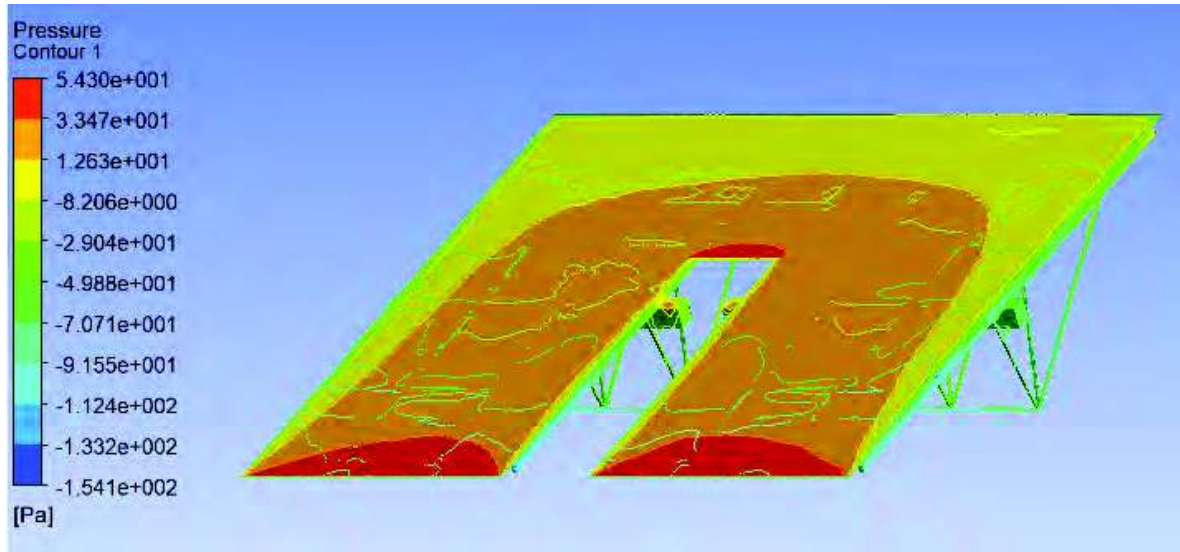


Figura 4.4 Presiones punto 1

Para este punto de operación se obtuvo una presión máxima de  $5.42 \times 10^1$  Pa, presentándose en las zonas inferiores de las facetas inferiores y de la parte central (Figura 4.4).

### 4.2.2 Punto de operación 2 ( $\alpha=45^\circ$ , $V=9$ m/s)

La figura 4.5 muestra el flujo a través de la estructura y donde se formaron áreas de mayor velocidad y turbulencia.

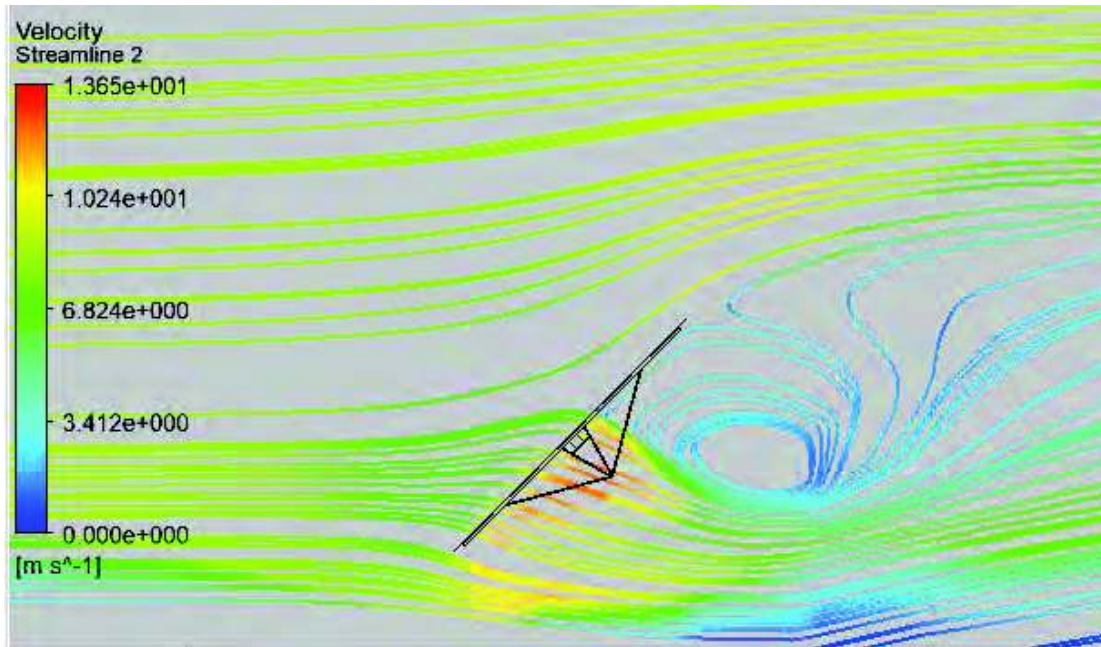


Figura 4.5 Flujo a través de la estructura punto 2

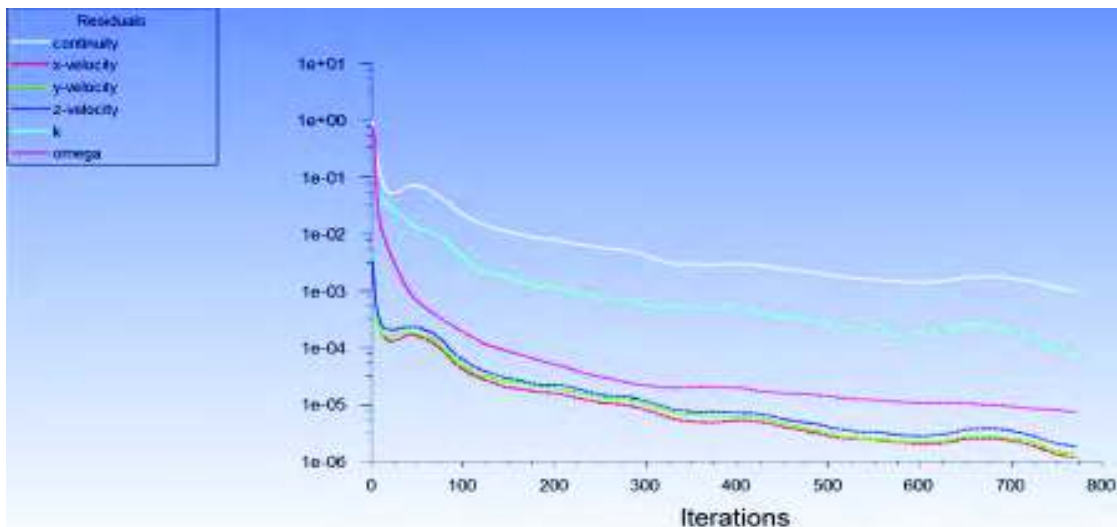


Figura 4.6 Convergencia punto 2

En este caso, se necesitaron 771 iteraciones para llegar a la convergencia de los residuales de todos los componentes (Figura 4.6).



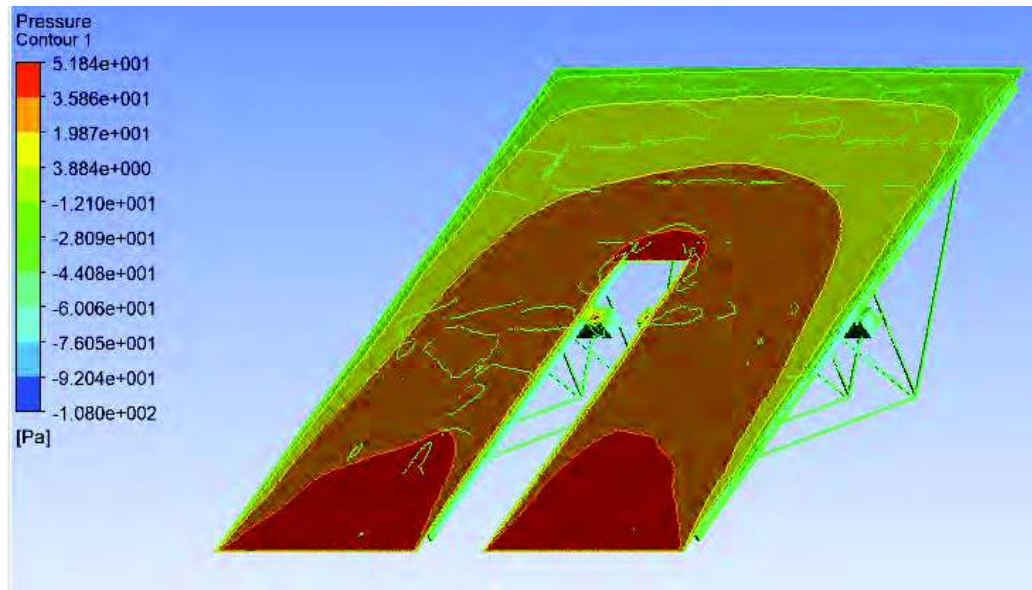


Figura 4.7 Presiones punto 2

Como se puede apreciar en la figura 4.7, en este caso se obtuvo una presión máxima ligeramente menor al punto anterior, de  $5.18 \times 10^1$  Pa, pero las zonas donde se presentaron estos valores y los cercanos ellos se incrementaron, abarcando más área de las facetas inferiores.

### 4.2.3 Punto de operación 3 ( $\alpha=60^\circ$ , $V=9$ m/s)

La representación del comportamiento del flujo a través del heliostato se visualiza en la figura 4.8.

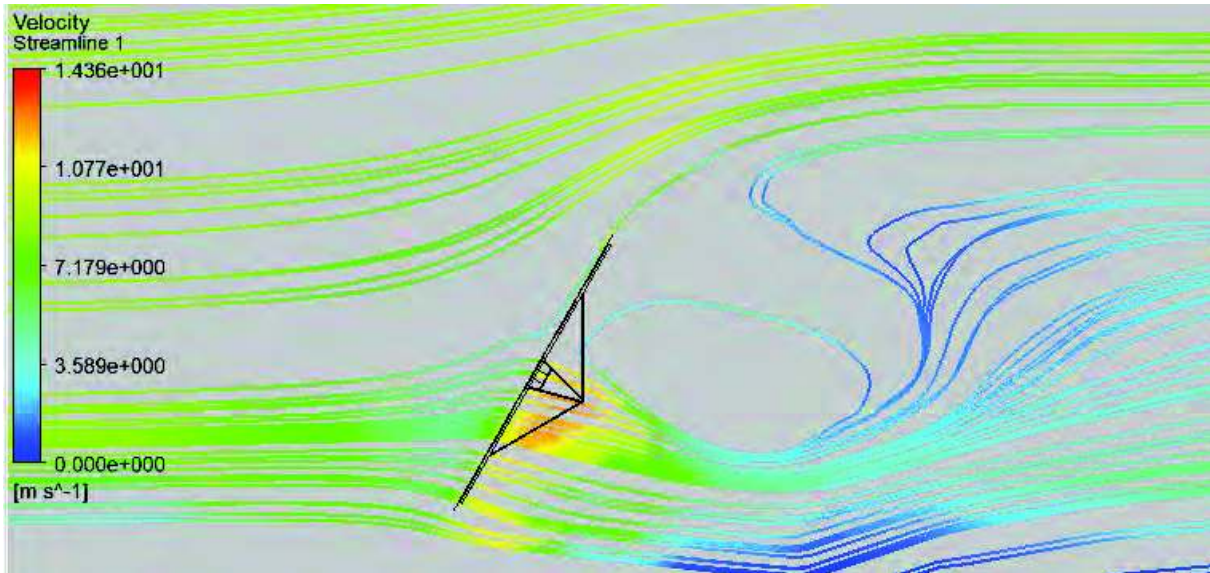


Figura 4.8 Flujo a través de la estructura punto 3

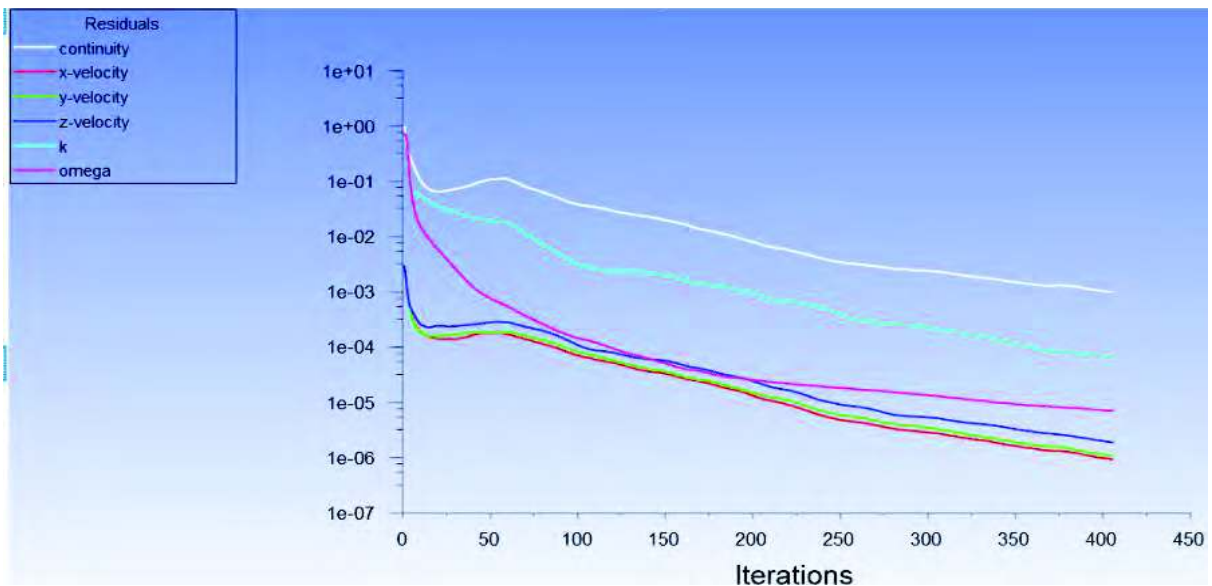


Figura 4.9 Convergencia punto 3

En este escenario solo fueron necesarias 406 iteraciones para lograr la convergencia como su muestra en la figura 4.9.

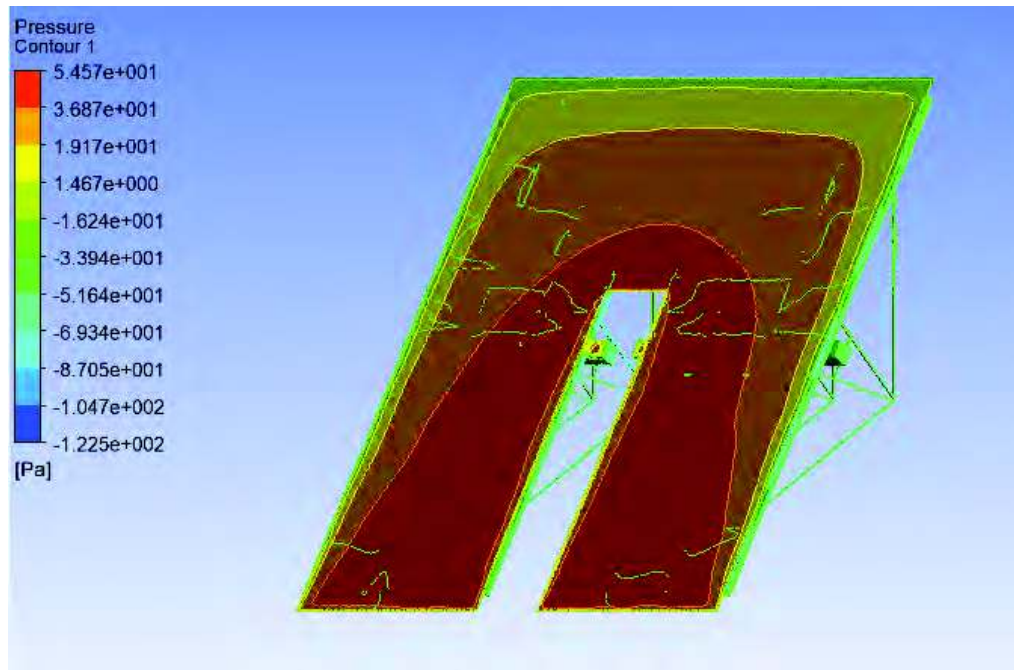


Figura 4.10 Presiones punto 3

Este punto de operación con la mayor inclinación presenta tanto los valores más altos de presión como las mayores zonas afectadas, se obtuvo un resultado de  $5.46 \times 10^1$  Pa en todas en las zonas inferiores y alrededor de la parte central (Figura 4.10).

#### 4.2.4 Punto de operación 4 ( $\alpha=0^\circ$ , $V=36.6$ m/s)

La posición de supervivencia y el flujo a través de la estructura se presentan en la figura 4.11.

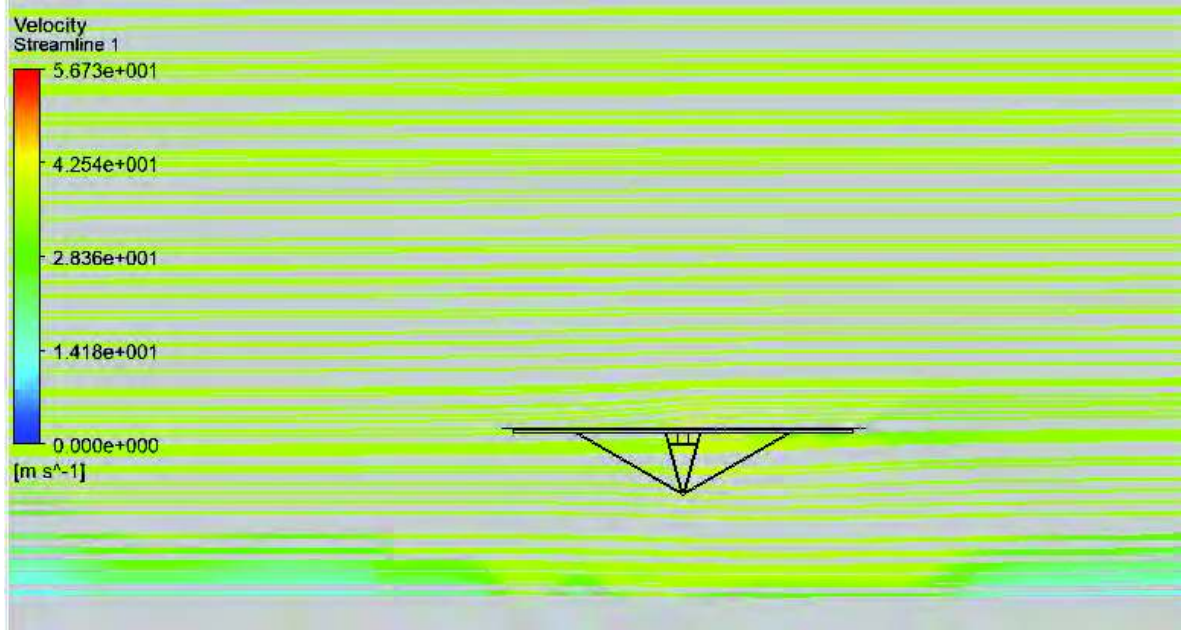


Figura 4.11 Flujo a través de la estructura punto 4

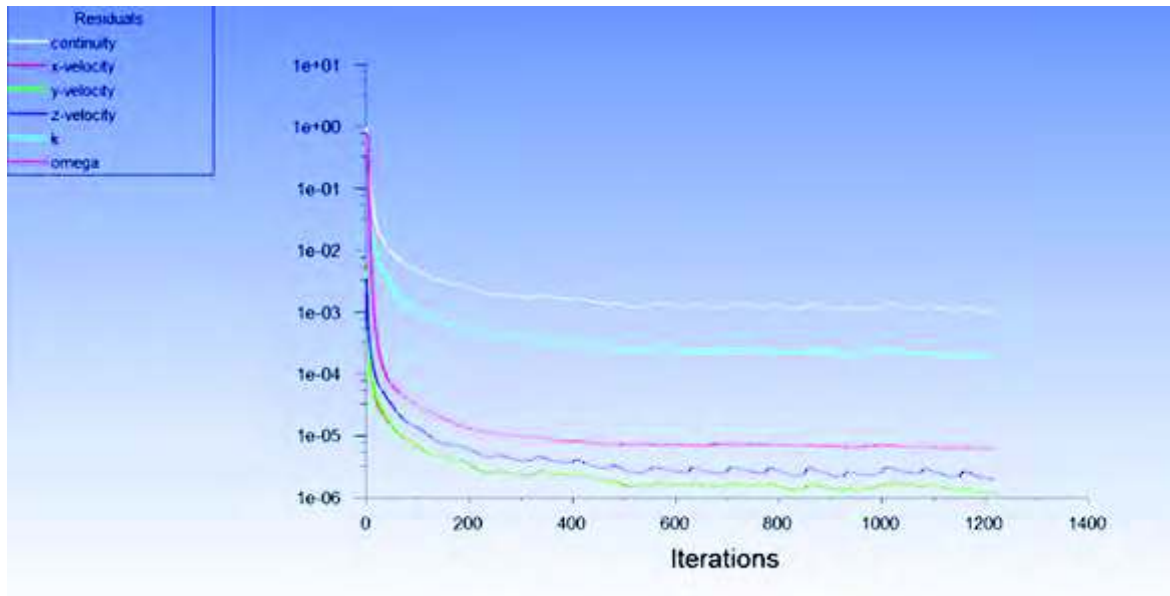


Figura 4.12 Convergencia punto 4

Como se muestra en la figura 4.12, se necesitaron 1219 iteraciones de simulación para lograr la convergencia de los resultados.

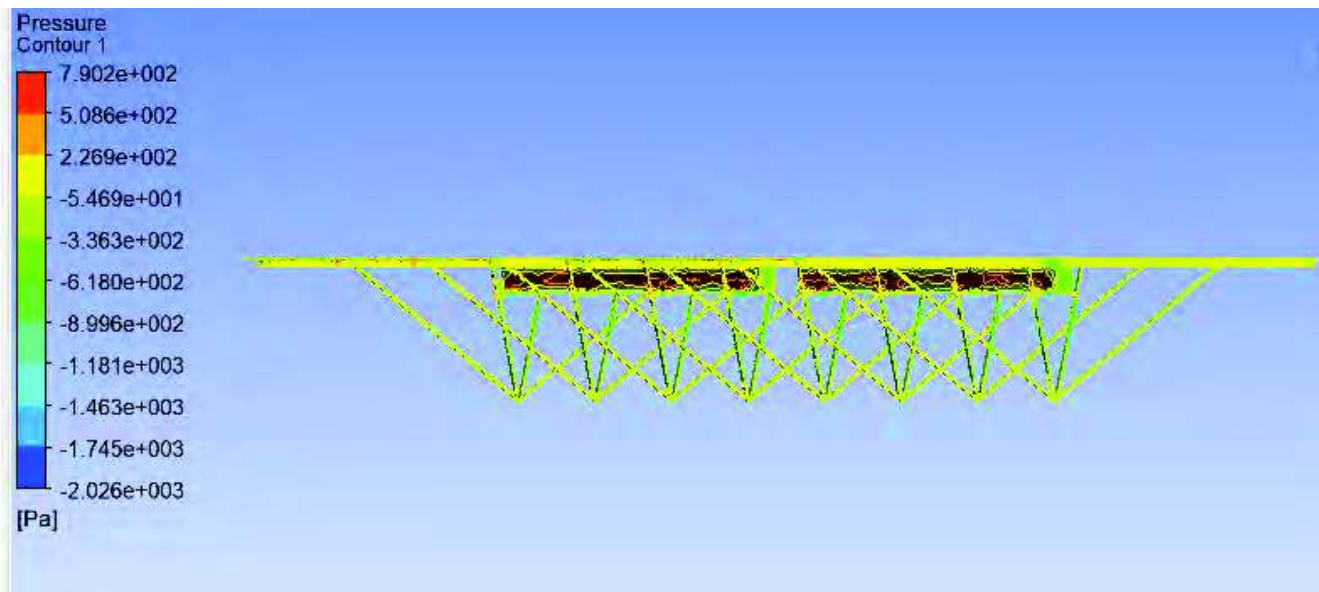


Figura 4.13 Presiones punto 4

La figura 4.13 muestra las zonas de mayor presión para este punto de abatimiento, la cual tuvo un valor máximo de  $7.90 \times 10^2$  Pa, el cual es elevado con respecto a los demás puntos, pero concentrado en zonas menores de las secciones transversales.

### 4.3 Método de elemento finito

Teniendo los resultados de la simulación de fluidos computacional, se pueden obtener resultados de esfuerzos y deformaciones en la estructura en los diferentes puntos de operación.

#### 4.3.1 Mallado de elementos

Tomando en cuenta lo descrito en el capítulo 3, los diferentes componentes de la estructura se definieron de diferente manera de acuerdo a su geometría. Las facetas se definieron como cuerpos de superficie y se empleó un mallado cuadrilateral. Los elementos compuestos por piezas con perfil uniforme se establecieron como cuerpos de línea, con su respectiva sección transversal, la malla de estos varía según la geometría de cada uno. Finalmente, los componentes de unión que no presentan geometrías ideales para simplificar se establecieron como cuerpos sólidos con un mallado tetraédrico para lograr una adaptación a su forma. La figura 4.14 muestra un detalle de los diferentes mallados.

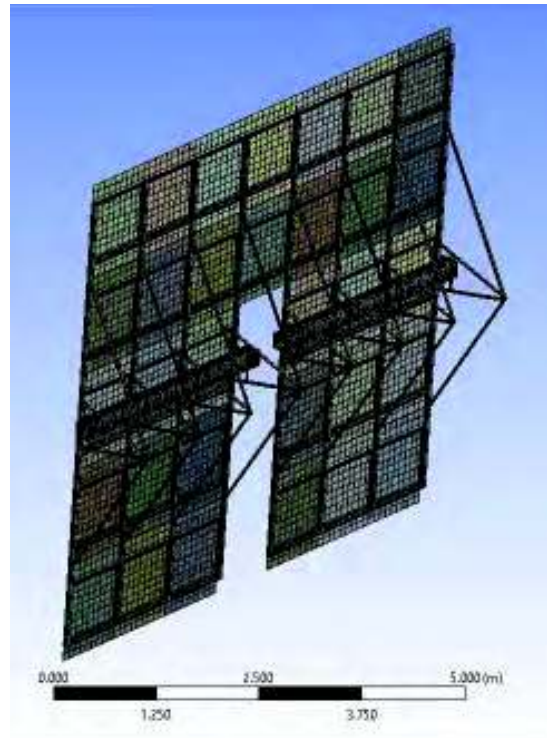


Figura 4.14 Mallado de elementos

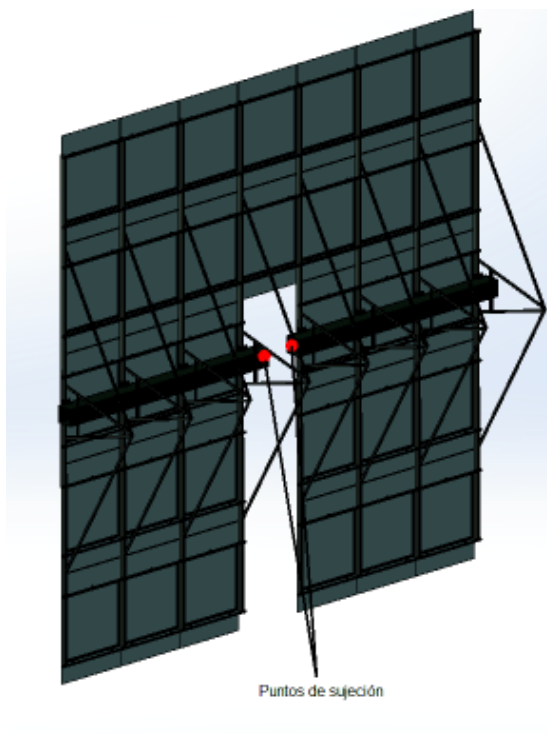


Figura 4.15 puntos de sujeción

Para todos los casos, se tomó como punto de sujeción las caras internas de las secciones transversales, ya que de ahí es donde se ensambla con la estructura de soporte central (Figura 4.15).

### 4.3.2 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de deformaciones para los puntos de operación y de factor de seguridad para la posición de reposo. Primeramente, se muestran los resultados de la estructura solamente sometida a la fuerza de la gravedad y posteriormente, tanto con gravedad y las presiones resultantes por las fuerzas del viento.

Los esfuerzos fueron calculados con base a la ecuación (2.1), la cual toma en cuenta la matriz de rigidez global y los grados de libertad y desplazamientos de todos los nodos de un elemento. De igual manera, el factor de seguridad está basado en las ecuaciones (2.2) y (2.3), en donde se obtiene el esfuerzo de cada elemento y se compara con el máximo esfuerzo permisible.

#### a) Punto de operación 1 ( $\alpha=30^\circ$ gravedad)

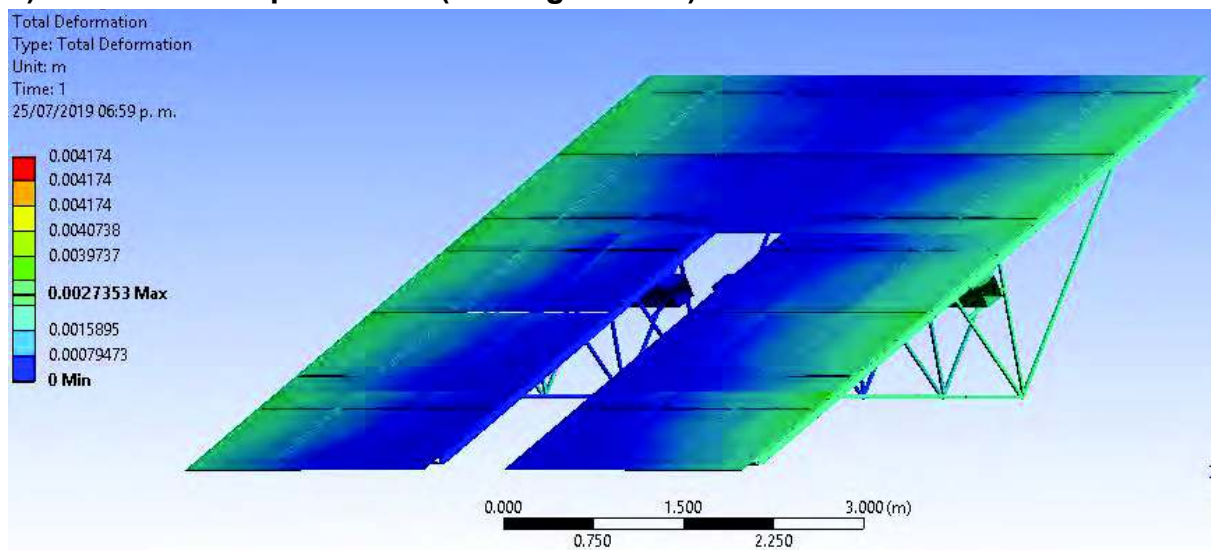


Figura 4.16 Punto 1  $\alpha=30^\circ$  gravedad

La figura 4.16 muestra las zonas de mayor deformación por la fuerza de gravedad a un ángulo  $\alpha$  de  $30^\circ$ , presentándose estas en los elementos perimetrales que se

encuentran lejos de los puntos de sujeción, se tiene un valor de deformación máxima de  $2.73 \times 10^{-3}$  m.

**b) Punto de operación 1 ( $\alpha=30^\circ$  V=9 m/s gravedad y presión de viento)**

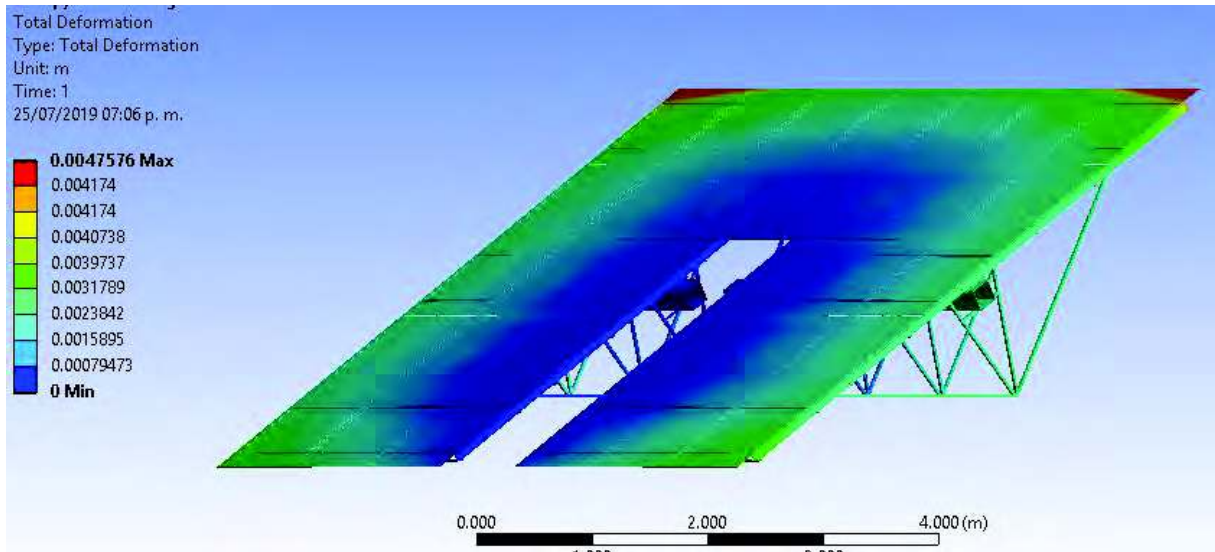


Figura 4.17 Punto 1  $\alpha=30^\circ$  gravedad y viento

Se presenta un aumento significativo de la deformación con respecto al análisis donde solo se tomó en cuenta la gravedad para este punto, presentándose los valores máximos sobre las facetas superiores externas de la estructura, el valor de la deformación máxima es de  $4.75 \times 10^{-3}$  m (Figura 4.17), la cual es aceptable ya que se encuentra por debajo del límite de 1cm.



c) Punto de operación 2 ( $\alpha=45^\circ$  gravedad)

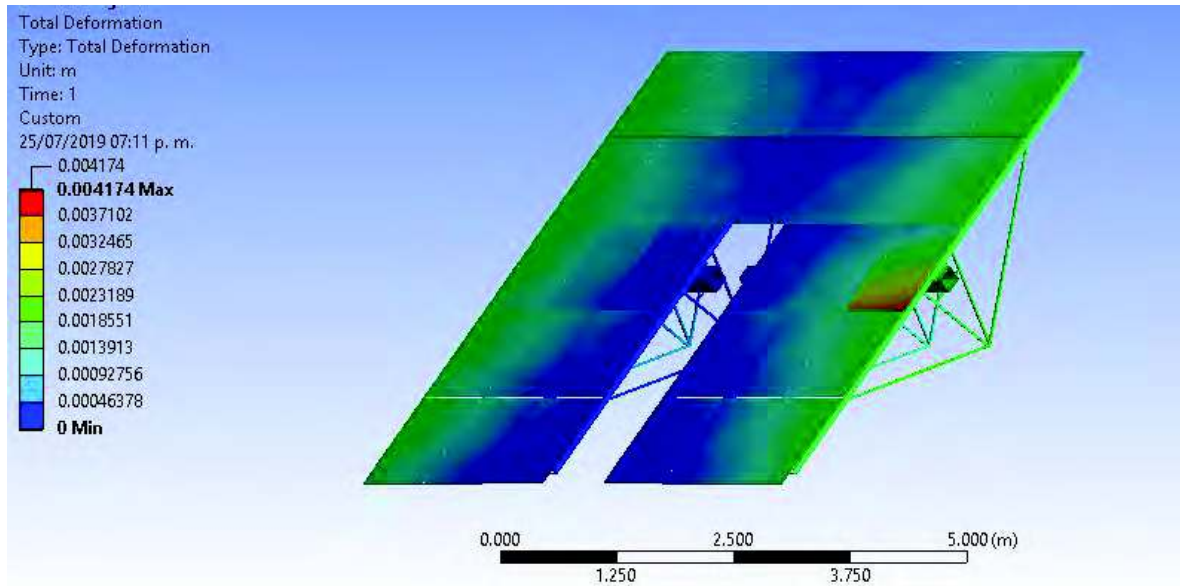


Figura 4.18 Punto 2  $\alpha=45^\circ$  gravedad

Con el aumento del ángulo  $\alpha$  se tiene un incremento de la deformación con respecto al inciso a, las zonas más afectadas se mantienen en la periferia de la estructura, pero con valores más altos. Se presenta una deformación máxima  $4.17 \cdot 10^{-3}$  m (Figura 4.18).

d) Punto de operación 2 ( $\alpha=45^\circ$  V=9 m/s gravedad y presión de viento)

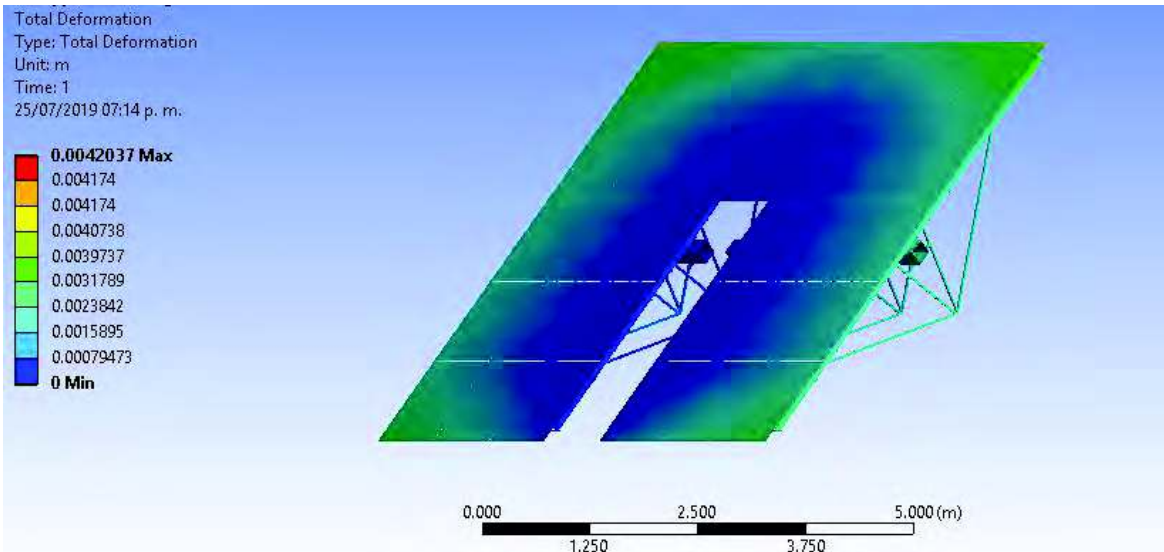
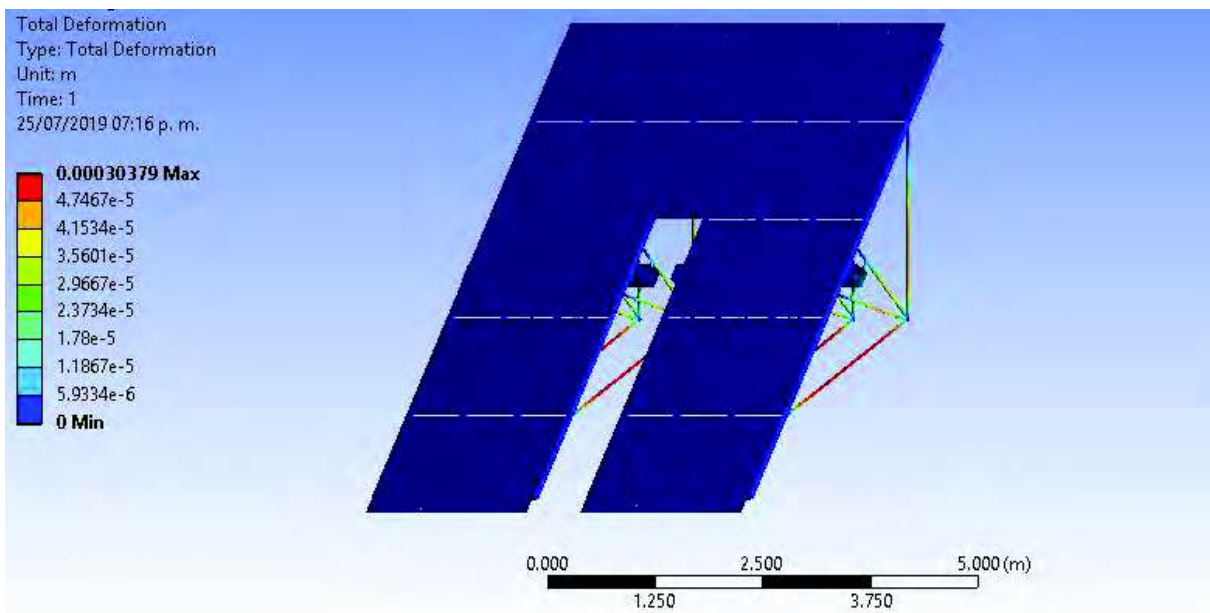


Figura 4.19 Punto 2  $\alpha=45^\circ$  gravedad y viento

Como se muestra en la figura 4.19, en este caso la influencia del viento no afecta de gran manera la deformación de la estructura, ya que solo se presenta un aumento leve en su valor máximo, siendo este de  $4.20 \cdot 10^{-3}$  m. De igual manera, las zonas afectadas son similares al análisis en donde solo se consideró a la gravedad. En ambos casos se sigue estando por debajo de la deformación máxima permisible.

**e) Punto de operación 3 ( $\alpha=60^\circ$  gravedad)**



*Figura 4.20 Punto 3  $\alpha=60^\circ$  gravedad*

En esta ocasión el aumento del ángulo  $\alpha$  no presenta una mayor deformación máxima, si no lo contrario. Además, la zona de mayores valores recae ahora en los soportes longitudinales de la estructura, mientras que las facetas presentan valores mínimos. Se tiene una deformación máxima  $3.03 \cdot 10^{-4}$  m (Figura 4.20)

f) Punto de operación 3 ( $\alpha=60^\circ$   $V=9$  m/s gravedad y presión de viento)

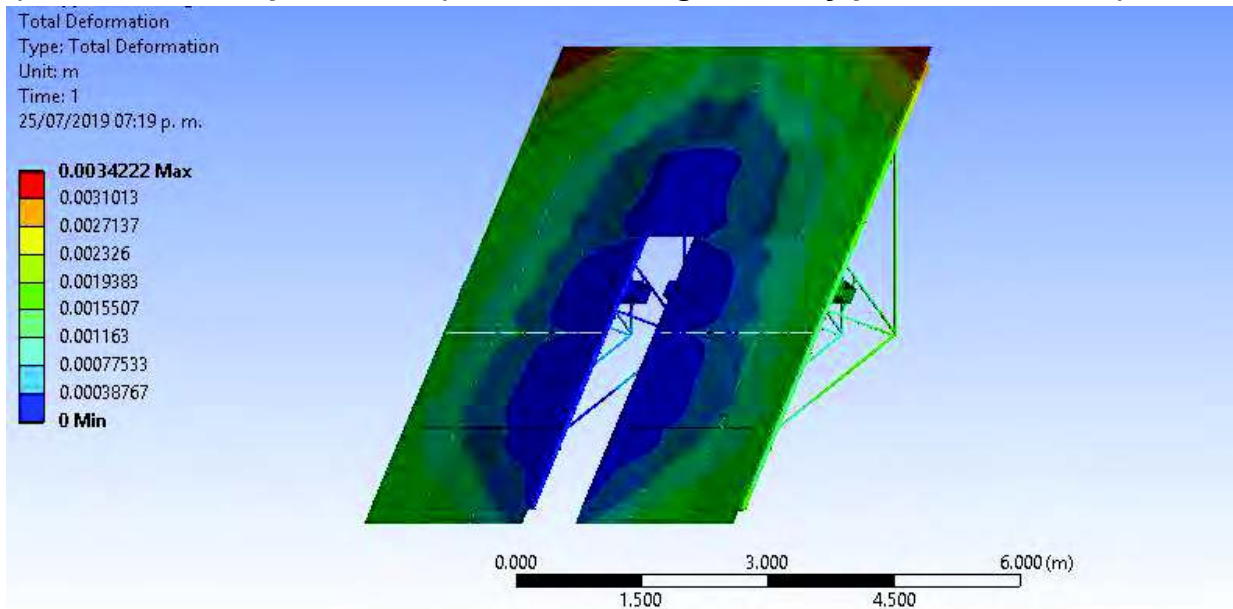
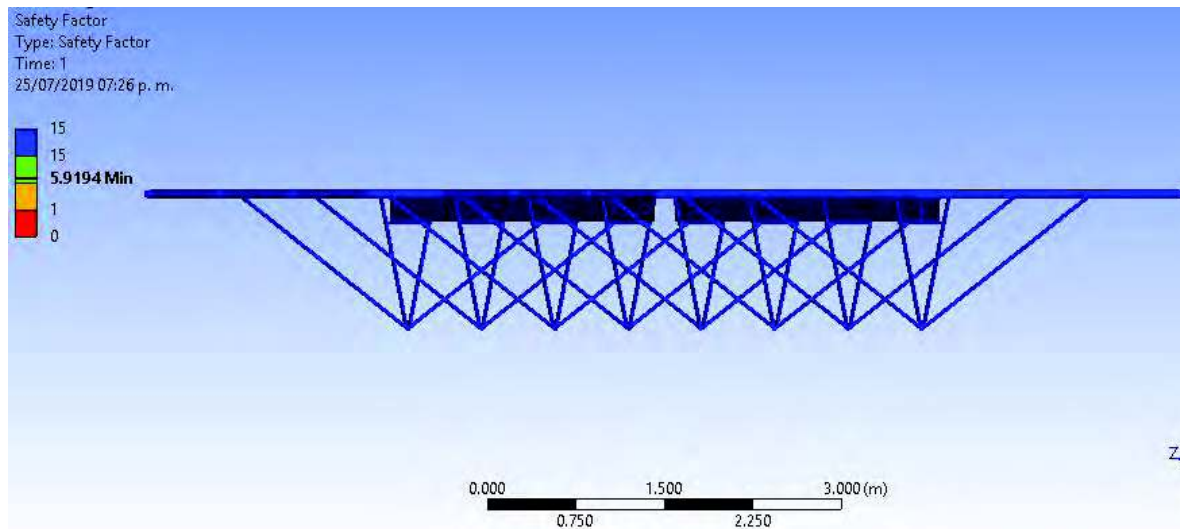


Figura 4.21 Punto 3  $\alpha=60^\circ$  gravedad y viento

Como se puede apreciar en la figura 4.21, la inclusión de las presiones del viento trae consigo un aumento significativo tanto en los valores máximos de deformación como en las zonas más afectadas. Aunque tanto las facetas como las secciones longitudinales se ven afectadas, se sigue estando dentro de los valores permisibles, ya que se tiene una deformación máxima de  $3.42 \cdot 10^{-3}$  m.

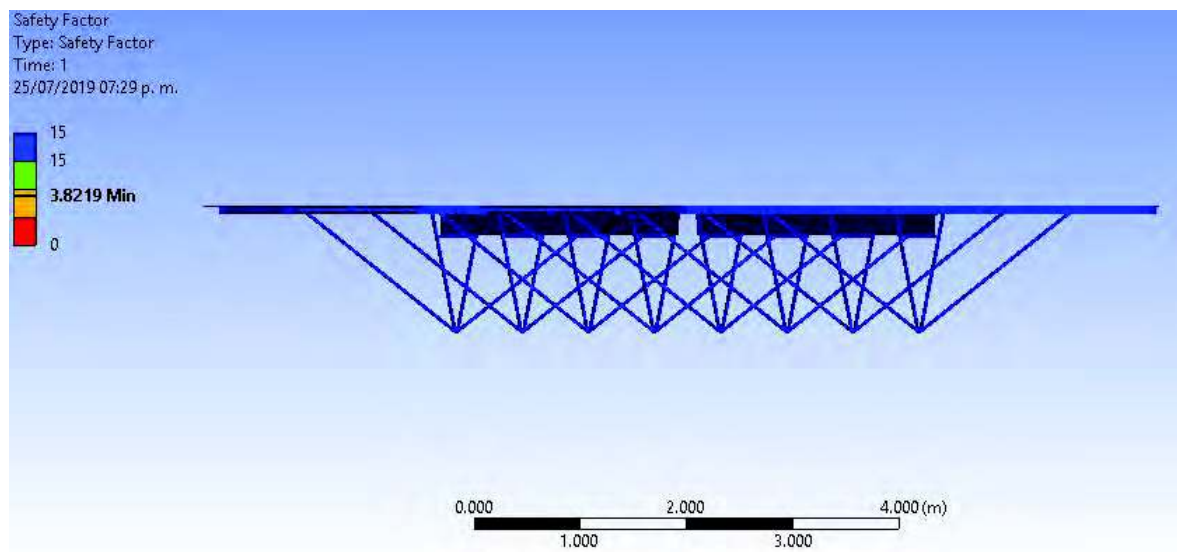
**g) Punto de operación 4 ( $\alpha=0^\circ$  gravedad)**



*Figura 4.22 Punto 4  $\alpha=0^\circ$  gravedad (Factor de seguridad)*

En esta posición de abatimiento con ángulo  $\alpha$  igual a cero, se busca evitar fallos estructurales, por lo que nos es de interés el factor de seguridad. Como es de esperarse, la sola acción de la gravedad no presenta mayor riesgo para la estructura, ya que se cuenta con un factor de seguridad mínimo de 5.9 (figura 4.22).

**h) Punto de operación 4 ( $\alpha=0^\circ$  V=9 m/s gravedad y presión de viento)**



*Figura 4.23 Punto 4  $\alpha=0^\circ$  gravedad y viento (factor de seguridad)*

Con la adición de la fuerza del viento, se tiene una disminución en el factor de seguridad mínimo, pero aun estando por encima del mínimo aceptable. Las zonas más vulnerables se encuentran cerca de los puntos de sujeción, pero el valor mínimo de 3.82 nos indica que se tiene un nivel de confianza elevado para la integridad de la estructura (figura 4.23).

La tabla 4.1 resume los resultados finales obtenidos para cada punto de operación. Como se mencionó en la metodología, los primeros 3 puntos son de operación y solo se busca predecir sus deformaciones máximas, mientras que, en el último punto, de supervivencia, solo su integridad estructural por medio del factor de seguridad.

<b>Punto</b>	<b>Deformación máxima debido a la gravedad (mm)</b>	<b>Deformación máxima debido a la gravedad y a la presión del viento (mm)</b>	<b>Factor de seguridad</b>
1	2.73	4.75	-
2	4.17	4.20	-
3	3.03	3.42	-
4	-	-	3.82

*Tabla 4.1 Resultados finales*

## **5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En este capítulo se presentan las conclusiones finales y los beneficios que se obtuvieron a lo largo de la investigación. De igual manera, se realizan recomendaciones de oportunidades de seguimiento al proyecto.

### **5.1 Conclusiones**

En el presente trabajo se desarrolló el diseño mecánico de un concentrador solar y se sustentó su integridad estructural contra las fuerzas de la gravedad y del viento. El modelo de la estructura se propone con base a las necesidades y consideraciones de diseño establecidas el CIO. Para determinar las deformaciones presentadas, se establecieron 3 puntos de operación y uno más de supervivencia, se calcularon las presiones debidas a la fuerza del viento para cada uno de ellos y con diferentes velocidades por medio de dinámica de fluidos computacional (CFD). Posteriormente, estos datos se tomaron como entrada para realizar un estudio de elementos finitos que proporcionó los resultados obtenidos. De lo anterior, es posible apreciar que la propuesta realizada es aceptable, ya que las deformaciones presentadas fueron menores al criterio establecido de 1cm y el factor de seguridad fue superior a 2. Por lo tanto, no es necesario tomar acciones de rediseño.

### **5.2 Recomendaciones**

En proyectos de este tipo, en donde se involucran el diseño CAD y simulaciones sobre este, es importante realizar las adecuaciones necesarias al modelo 3D para cada tipo de análisis. El modelo base, para construcción, para una simulación CFD, de elemento finito o de cualquier tipo, debe de adecuarse correctamente a las condiciones de cada caso. De igual manera, es de vital importancia realizar una malla adecuada para los elementos de simulación, se deben de considerar diferentes técnicas y controles de mallado para lograr que esta se adecue correctamente a la geometría a analizar y que se pueda llegar a una convergencia de resultados.

### **5.3 Trabajo futuro**

Como trabajos futuros se deja abierta la posibilidad de realizar un análisis dinámico de la estructura, para conocer con detalle el comportamiento de esta a las fuerzas del viento mientras cambio su posición angular. De igual manera, los resultados muestran que posiblemente se puedan realizar algunos cambios en el diseño de la estructura sin comprometer la integridad física de esta.

Con el presente trabajo, se entrega información de todos los datos generados en las simulaciones a solicitud del centro de investigación en óptica, debido a que se tiene el interés de llevar a cabo simulaciones de trazado de rayos para analizar la capacidad de reflejar la luz del sol de la estructura propuesta.

## 6. REFERENCIAS

Badii, M. H., Guillen, A. and Abreu, J. 2016 ‘Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation)’, *International Journal of Good Conscience*. Abril, 11(1), pp. 141–155.

Bhaskaran, R. and Collins, L. 2015 *Introduction to CFD Basics, Using HPC for Computational Fluid Dynamics*. Universidad técnica Santa María. doi: 10.1016/B978-0-12-801567-4.00001-5.

Björkman, N. 2014 *Heliostat Design*. Maestría. Kungliga Tekniska Högskolan.

Blaabjerg, F. and Ionel, D. M. 2017 *renewable energy devices and systems with simulations in matlab® and ansys® pdf*. Edited by T. & Francis. Taylor & Francis.

Capote, J. A., Alvear, D. and Abreu, O. V 2008 ‘Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios’, 24, pp. 227–245.

Cardiff, P. and Demirdöğ, I. 2018 ‘Thirty years of the finite volume method for solid mechanics’, m, pp. 1–93.

Carvajal, E. 2018 ‘Diseño y construcción de un helióstato con seguimiento solar en dos ejes para re-direccionar radiación incidente hacia un disco concentrador parabólico’. Licenciatura. Universidad técnica Santa María.

cceea 2016 *Aura solar: El gran proyecto que ahora está abandonado – CCEEA*. Available at: <https://cceea.mx/energia-solar/aura-solar-el-gran-proyecto-que-ahora-esta-abandonado/> (Accessed: 30 October 2017).

Cerpa, R., Nieto, E. and Londoño, L. 2016 ‘Turbulence models study in an external vehicle aerodynamics , using a computational fluid dynamics software Estudio de los modelos de turbulencia aplicados a la aerodinámica externa de un automóvil , mediante software de dinámica computacional de fluidos’, 2, pp. 168–175.

Chilvers, J. 2014 *The Right RANS | the Tame Aerodynamicist*. Available at: <https://tameaero.wordpress.com/2014/11/11/the-right-rans/> (Accessed: 12 August 2019).

Chnag, K.-H. 2015 *e-Design, Computer Aided Engineering Design*. Edited by J. Chelsea. Elsevier.

Cock, F. 2018 *Diseño mecánico de un helióstato modular*. Centro de investigación en óptica.

Franke, J. *et al.* 2007 *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, COST action*. Available at:



<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=23892111%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Best+practice+guideline+for+the+CFD+simulation+of+flows+in+the+urban+environment#0>.

Hariram, A. V 2015 *The use of CFD for Heliostat Wind Load Analysis*. Maestría. Stellenbosch University.

Hernandez, M. 2013 *Diseño De Un Microhorno Solar Y Campo De Helióstatos Para Diversas Aplicaciones*. Licenciatura. Universidad Autónoma de México.

Herrera Jiménez, V. M. 2016 *Diseño de mecanismo de seguimiento solar para generación de electricidad mediante disco parabólico y fotoceldas de alta eficiencia*. Doctorado. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

Hibbeler, R. C. 2015 *Structural Analysis*. Ninth. Pearson Prentice Hall.

Jubayer, C. M. and Hangan, H. 2012 'Numerical Simulation of Wind Loading on Photovoltaic Panels', *Structures Congress 2012*, p. 10.

Konstantin, H. 2017 *Japan's Renewable Energy Potential*. Maestría. Ritsumeikan Asia Pacific University.

Loffthouse, J., Simmons, R. T. and Yonk, R. M. 2016 'reliability of renewable energy : solar'.

Macko, M. *et al.* 2016 'CAD / CAE Applications in Mill ' s Design and Investigation', (February 2018). doi: 10.1007/978-3-319-50938-9.

Madenci, E. and Guven, I. 2015 *The finite element method and applications in engineering using ANSYS*. 2nd edn. Springer.

Moukalled, F., Mangani, L. and Darwish, M. 2016 *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics An Advanced Introduction with*. Edited by A. U. of Beirut. Beirut.

Nieblas moroyoqui, C. *et al.* 2012 'Modelación de la deformación de un helióstato sometido a cargas de viento mediante análisis de elemento y volumen finito', (Forma 1).

Ortega, C. 2016 *Modelos de simulación de yacimientos basados en leyes de conservación hiperbólica, aplicando el método de seguimiento de frentes sobre líneas de corriente*. Licenciatura. UNAM.

Osses, J. 2016 *El método de volúmenes finitos - ESSS*. Available at: <https://www.esss.co/blog/es/el-metodo-de-volumenes-finitos/> (Accessed: 12 June 2019).

Pa, W. 2017 'Climatology & Weather Forecasting', 5(1), pp. 3–6. doi: 10.4172/2332-

2594.1000191.

Pfahl, A. 2019 *Wind Loads on Heliostats*. Eindhoven Technische Universiteit.

Rosales, M. 2016 *Diseño, puesta en operación y evaluación de un helistato con facetas deformables*. Maestría. UNAM.

Secretaría de gobernación, 2019. 'Plan nacional de desarrollo 2019-2024'. Ciudad de México

Secretaría de energía. 2018 '*Energía termosolar*'. Ciudad de México

Shigley, E. J. and Mischke, C. R. 2008 'Diseño e ingeniería mecánica', *McGraw Hill*, 1. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Simiu, E. and Yeo, D. 2019 *Wind effects on structures*. Fourth. Wiley Blackwell.

Stabile, G. and Rozza, G. 2019 'Efficient geometrical parametrization for finite-volume based reduced order methods', pp. 1–21.

Stolarski, T., Nakasone, Y. and Yoshimoto, S. 2006 *Engineering Analysis with ANSYS Software*.

Tiwari, G. N., Tiwari, A. and Shyam 2016 *Handbook of Solar Energy*. doi: 10.1007/978-981-10-0807-8.

Uslu, V. E. 2014 *Computational Fluid Dynamic Analysis of Wind Loads Acting on Ground Mounted Solar Panels*. Middle East Technical University.

Vázquez, J. F. 2016 *Dynamic Wind Loads on Heliostats Dynamische Windlasten auf Heliostaten*. Doctorado. RWTH Aachen University.

Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. 2007 *Conservation laws of fluid motion and boundary conditions, An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. doi: 10.2514/1.22547.

Votyakov, E. V. and Papanicolas, C. N. 2017 'Consistent multiphysics simulation of a central tower CSP plant as applied to ISTORE', *AIP Conference Proceedings*, 1850. doi: 10.1063/1.4984561.

Zang, C., Wang, Z. and Liu, X. 2009 'Design and analysis of a novel heliostat structure', *1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09*, pp. 1–4. doi: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348182.

## 7.ANEXOS