



DISEÑO MECÁNICO DE UN HELIÓSTATO MODULAR

TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
MAESTRO EN OPTOMECASTRÓNICA

Asesor:
Dr. Iván Salgado Tránsito

Estudiante:
Felipe Cock Martínez

Versión definitiva. Incluye
cambios sugeridos por revisores

V.º B.º Dr. Iván Salgado
Asesor

Abril de 2018
León, Guanajuato, México

Nota de aceptación

Dr. Iván Salgado Tránsito
Asesor

Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano
Jurado

M.O. Diego Torres Armenta
Jurado

Firmado en Aguascalientes, Aguascalientes, México, el lunes 30 de abril de 2018.

A DIOS, A MIS DOS FAMILIAS Y A MIS AMIGOS.

Agradecimientos

En primer lugar le doy gracias a Dios Todopoderoso por permitirme vivir, conocer, investigar, aprender y servir.

A mis padres David y Agnes, por el incondicional apoyo que me brindaron durante toda la maestría y por la paciencia que conservaron desde mi partida de Colombia hasta la culminación de mis estudios en este posgrado. Un especial agradecimiento a mi padre por su

A mi hermano Nicolás, por su compañía a través de la distancia y por brindarme siempre su apoyo absoluto a cualquier hora del día y de la noche.

A mi familia paternalmente extendida Claudia, Teresa y Germán y a mi familia maternalmente extendida Juan Diego, Juan Pablo y José Luís por apoyarme, hacer parte de mi formación como persona y estar siempre con la disposición para rociar su afecto sobre quienes los rodean.

A mis tíos y tías que estuvieron siempre pendientes de mi progreso en la maestría y de las necesidades que me surgían.

A mi novia Diana y a su maravillosa familia, por todas las atenciones que tuvieron conmigo día a día y por su gran apoyo para lograr culminar de la mejor manera mi maestría.

A mis compañeros de maestría por su acogida en este maravilloso país, por su fraternidad y por todas las alegrías que me compartieron durante mi estancia en México.

A mi asesor, el Dr. Iván Salgado Tránsito por su especial apoyo, su amable comprensión y por su disposición constante para atender mis dudas.

Al Dr. Juan Sarabia por sus recomendaciones sobre los actuadores del helióstato.

Al Dr. Manuel Peña Cruz por su colaboración con los datos de la estación meteorológica del CIO de Aguascalientes y por el apoyo con la

interpretación de los resultados del software Tonatiuh.

Al Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO) por brindarme las herramientas necesarias para cursar este postgrado, por todas las atenciones que tuvieron conmigo y por haber sido parte de mi formación integral.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Organización de los Estados Americanos (OEA) y a la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) por promover e impulsar la cooperación educativa entre los países latinoamericanos y otorgarme la beca del Plan Nacional de Postgrados de Calidad (PNPC) para llevar a cabo el estudio de la presente maestría.

Agradezco también al CONACYT por el apoyo recibido a través del proyecto Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales 2015-01-1651: "Diseño y Construcción de Potabilizador Integral Solar de Agua para Comunidades Rurales".

A todas las personas que se me quedan por fuera de las anteriores líneas pero que aun así me brindaron en algún momento su apoyo y su compañía, muchísimas gracias, de verdad, y que Dios los bendiga.

Índice del Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	10
1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Definición de un heliostato.....	12
1.3 Estado del Arte.....	14
1.3.1 Origen.....	14
1.3.2 Evolución.....	15
1.4 Objetivos del proyecto.....	17
1.4.1 Objetivo general.....	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	17
1.4.3 Planteamiento del problema.....	17
1.4.4 Justificación.....	18
2 MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Geometría Solar.....	20
2.1.1 Trayectoria solar en Aguascalientes, Ags., México.....	21
2.2 Componentes principales de un heliostato.....	22
2.3 Tipos de Heliostatos.....	25
2.3.1 Según su morfología.....	25
2.3.2 Según su estructura.....	26
2.3.3 Según su alimentación y control.....	27
2.3.4 Según su tamaño.....	29
2.4 Variables operacionales.....	29
2.4.1 Cargas de viento.....	29
2.4.2 Dimensionamiento de los heliostatos.....	30
2.4.3 Precisión del seguimiento.....	31
2.4.4 Deformaciones durante la operación.....	31
2.4.5 Aberraciones.....	33
2.5 Aplicaciones.....	34
2.5.1 Plantas Solares de Torre Central.....	34
2.5.2 Hornos Solares.....	36
2.6 Simulación mediante el Método de Elementos Finitos.....	37
2.6.1 Validación del Diseño del Heliostato.....	39
3 DISEÑO Y MODELADO CAD.....	40
3.1 Parámetros de diseño.....	40
3.1.1 Condiciones del entorno.....	40
3.1.2 Requisitos de Concentración.....	40
3.2 Selección del tipo de heliostato.....	41
3.2.1 Heliostato tipo membrana.....	41
3.2.2 Heliostato de eje focal.....	41
3.2.3 Heliostato tipo T.....	41

3.3	Diseño de las facetas.....	43
3.4	Diseño del soporte de las facetas.....	44
3.5	Diseño del bastidor.....	45
3.5.1	<i>Balanceo estático en el eje de elevación.....</i>	46
3.6	Diseño del eje torsor.....	48
3.7	Diseño del cabezal.....	48
3.8	Diseño del pedestal.....	49
3.9	Selección de rodamientos.....	50
3.9.1	<i>Eje Vertical.....</i>	50
3.9.2	<i>Eje Horizontal.....</i>	54
3.10	Selección de los actuadores.....	57
3.10.1	<i>Sistema de transmisión azimutal.....</i>	57
3.10.2	<i>Sistema de transmisión de elevación.....</i>	62
3.10.3	<i>Numeración de las facetas y orientación del heliostato.....</i>	66
3.11	Diseño asistido por computadora (CAD).....	66
4	VALIDACIÓN DEL DISEÑO.....	67
4.1	Simulación mediante el método de elementos finitos.....	67
4.1.1	<i>Generación del modelo.....</i>	67
4.1.2	<i>Resultados de la simulación.....</i>	69
4.2	Simulación de trazado de rayos.....	73
4.2.1	<i>Generación del modelo.....</i>	73
4.2.2	<i>Adaptación de los resultados de ANSYS.....</i>	74
4.2.3	<i>Trazado de rayos del heliostato deformado.....</i>	74
5	CONCLUSIONES.....	77
6	REFERENCIAS.....	78
7	ANEXOS.....	82
7.1	Diseño CAD de HORACIO V.....	82
7.2	Simulación mediante el Método de Elementos Finitos.....	83
7.3	Tabla de datos de los motores NEMA 32 – 2.5 Nm.....	84
7.4	Tonatiuh_Data_Analyser.m.....	90
7.5	Slope_Calculator_ANSYS_Data.m.....	100
7.6	STL_Splitter.m.....	102
7.7	Set_Relative_Reference_ANSYS_Data.m.....	105
7.8	Tonatiuh_Component_CAD_Replacer.m.....	109
7.9	Tabla de costos de las piezas de HORACIO V.....	115

Índice de Ilustraciones

Figura 1.	Diagrama simplificado de un heliostato.....	13
Figura 2:	Impacto del tamaño de los heliostatos en el costo de <i>HelioTower</i>	19
Figura 3.	Esfera celeste con los planos de sección. (Gorocica 2014).....	20
Figura 4:	Eventos solares en la traslación de la tierra. (Caliver 2010).....	21
Figura 5:	Carta solar de Aguascalientes, México. (Mendoza 2014).....	22

Figura 6. Ejemplo de un helióstato con actuadores lineales (Pfahl 2013).....	24
Figura 7: Principales componentes de un helióstato.....	25
Figura 8. Conexión de los espejos a la estructura de soporte de acero mediante ventosas y pines.....	26
Figura 9. Campo de helióstatos centralizados.....	27
Figura 10. Ejemplo de helióstato autónomo (Pfahl 2013).....	28
Figura 11. Helioestato autónomo del campo CRS de la Plataforma Solar de Almería. (PSA 2015).....	28
Figura 12. Ejemplos de túnel de viento. (Peterka et al. 1989).....	30
Figura 13. Detalle de la ubicación del eje de elevación de un helióstato. (Pfahl 2013).....	32
Figura 14. Pretensionado del motor en eje azimutal. (Pfahl 2013).....	33
Figura 15. Helioestato de eje focal con alineación individual de las facetas. (Pfahl 2013).....	34
Figura 16. Diagrama de una planta solar de torre central.....	35
Figura 17: Subdivisión representativa del campo de helióstatos. (Kistler 1986).....	36
Figura 18. Diagrama simplificado de un horno solar.....	37
Figura 19. Principales componentes del helioestato HORACIO V.....	42
Figura 20. Estructura de conformación de los espejos.....	44
Figura 21. Faceta con soporte.....	45
Figura 22. Distribución de las ventosas en la faceta.....	45
Figura 23. Vista posterior del bastidor ensamblado.....	45
Figura 24. Detalle fijación de facetas.....	46
Figura 25. Eje de rotación del bastidor.....	46
Figura 26. Vista en corte del eje torsor.....	48
Figura 27. Cabezal (Vista en isométrico).....	49
Figura 28. Cabezal (Vista lateral en corte).....	49
Figura 29. Sistema de fijación del rodamiento inferior del cabezal. (Vista en isométrico).....	50
Figura 30. Sistema de fijación del rodamiento inferior del cabezal. (Vista en corte).....	50
Figura 31. Dibujo acotado del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a)(SKF Group 2017a).....	51
Figura 32. Cabezal vista en corte (rodamiento 6220-2Z).....	53
Figura 33. Dibujo acotado de los resaltes del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a)(SKF Group 2017a).....	53
Figura 34. Dibujo acotado del rodamiento 6214. (SKF Group 2017b).....	54
Figura 35. Dibujo acotado del rodamiento FYJ 70 TF. (SKF Group 2017c).....	55
Figura 36. Rodamiento del eje de elevación acoplado al bastidor. (Vista en corte del soporte vertical).....	57
Figura 37. Componentes del subsistema de rotación azimutal.....	58
Figura 38. Rampa de aceleración movimiento azimutal rápido.....	59
Figura 39. Desviación angular de rayos en superficies reflectantes.....	60
Figura 40. Sistema de transmisión del movimiento azimutal.....	62
Figura 41. Componentes del subsistema de rotación en elevación.....	63
Figura 42. Rampa de aceleración movimiento de elevación rápido.....	64
Figura 43. Numeración de las facetas de HORACIO V. (Vista Frontal).....	66
Figura 44. Modelo de la simulación en ANSYS.....	67
Figura 45. Detalle del mallado en las facetas.....	68
Figura 46. Deformación total del helioestato sin contrapesos. [360x] (Gravedad).....	69
Figura 47. Deformación total del helioestato con contrapesos. [360x] (Gravedad).....	69
Figura 48. Deformación total de facetas sin contrapesos. [1x] (Gravedad).....	70
Figura 49. Deformación total de facetas con contrapesos. [1x] (Gravedad).....	70

Figura 50. Deformación total del helióstato con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 10km/h).....	70
Figura 51. Deformación total de la faceta A1 con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 10km/h).....	70
Figura 52. Deformación total del helióstato. [34x] (Viento 50 km/h).....	71
Figura 53. Deformación total del helióstato con contrapesos. [34x] (Viento 50 km/h).....	71
Figura 54. Deformación de facetas con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 50 km/h).....	72
Figura 55. Deformación de la faceta C3 con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 50 km/h).....	72
Figura 56. Modelo del helióstato y de la torre central en Tonatiuh.....	73
Figura 57. Impacto de los rayos sobre la superficie de pruebas en la torre central.....	73
Figura 58. Concentración solar - Sin Cargas.....	75
Figura 59. Concentración solar - Gravedad y Viento 10 km/h.....	75
Figura 60. Perfiles de irradiancia - Sin Cargas.....	76
Figura 61. Perfiles de irradiancia - Gravedad y Viento 10 km/h.....	76

Índice de tablas

Tabla 1. Plantas solares de torre central mundiales más relevantes.....	16
Tabla 2. Estimaciones de la reducción de costo de las subfunciones básicas de un helióstato.....	18
Tabla 3: Condiciones del entorno.....	40
Tabla 4: Requisitos de concentración.....	40
Tabla 5. Reflectancia especular normal solar de diversas superficies (Duffie and Beckman 2013).....	43
Tabla 6. Propiedades físicas de los contrapesos.....	47
Tabla 7. Centros de masa de los elementos del bastidor. (Balanceado).....	47
Tabla 8: Dimensiones del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a).....	51
Tabla 9. Propiedades mecánicas del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a).....	51
Tabla 10: Dimensiones de los resaltes del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a).....	53
Tabla 11: Dimensiones del rodamiento 6214. (SKF Group 2017b).....	54
Tabla 12: Dimensiones del rodamiento FYJ 70 TF. (SKF Group 2017c).....	55
Tabla 13. Propiedades mecánicas del rodamiento FYJ 70 TF. (SKF Group 2017c).....	55
Tabla 14. Cálculos de cada etapa de la transmisión azimutal.....	61
Tabla 15. Cálculos de cada etapa de la transmisión de elevación.....	65
Tabla 16. Costo de los componentes del helióstato.....	119

Resumen

Los altos costos de la infraestructura civil requerida en las plantas de energía solar de concentración de torre central, la centralizada dependencia de los helióstatos y la complejidad de la ampliación de la planta, han vuelto necesario el surgimiento de helióstatos autónomos como alternativa a los convencionales en las plantas solares (García Navajas and Egea Gea 2000).

El presente trabajo propone un nuevo diseño de helióstato autónomo tipo T de 9 m² denominado HORACIO V, el cual pretende reducir los costos de fabricación, instalación y mantenimiento de los actuales helióstatos autónomos, de tal manera que incremente la viabilidad de su aplicación en países en vías de desarrollo (Fondo Monetario Internacional 2017).

Se realizó el diseño del helióstato partiendo de una serie de especificaciones meteorológicas típicas en la región de Aguascalientes, Ags., México y de un factor de concentración solar $C \geq 7$ para una ubicación del helióstato a 100 metros horizontales del receptor. El diseño se llevó a cabo teniendo en cuenta los estándares de perfilería y de tubería estructural de gran disponibilidad comercial en México, con el fin de minimizar la cantidad de piezas personalizadas y acelerar el tiempo de fabricación de éstos. Además de ello, se buscó que el diseño del nuevo helióstato fuese lo más modular posible para abrir campo a la investigación sobre el prototipo diseñado y poder ser construido como banco de pruebas en la unidad de Aguascalientes del Centro de Investigaciones en Óptica A.C.

Una vez concluida la etapa de diseño, se empleó un análisis estructural mediante el método de elementos finitos (MEF), con el software de simulación ANSYS, para estimar las deformaciones de la superficie reflectante causadas por la gravedad y por cargas de viento de 10 km/h para operación y 50 km/h para supervivencia, posteriormente se exportó la geometría de las facetas deformadas a un archivo estándar de CAD (.STL), que mediante una serie de algoritmos de GNU Octave, se acondicionó para ser incorporado en un modelo de prueba para el trazado de rayos en el software Tonatiuh, con el fin de validar la calidad de concentración óptica del modelo propuesto bajo las condiciones de operación aplicadas.

Finalmente, se obtuvo un factor de concentración pico de 10 soles en el foco del helióstato para las condiciones preestablecidas y una distribución aceptable de la radiación sobre el receptor, gracias a la rigidez de la estructura y al balanceo del bastidor.

1 Introducción

1.1 Introducción

Uno de los grandes problemas que enfrenta la sociedad actual es la creciente demanda energética ligada al aumento significativo de la población y al consumo de energía inherente a la era tecnológica en la que vivimos (Gwiazda and DiBella 2005). Lo anterior ha implicado una dependencia a los combustibles fósiles para satisfacer la necesidad energética, y a su uso se le atribuye el calentamiento global y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Previsualizando que esta tendencia no cambie en un futuro próximo (Gwiazda and DiBella 2005), soluciones variadas se han estado buscando en las últimas décadas para mitigar esta problemática con un especial énfasis en el uso de energías renovables, y así numerosos investigadores de todo el mundo han dirigido su enfoque al aprovechamiento de la energía solar como fuente alternativa de energía.

Las distintas fuentes de energía renovable tienen una distribución global más uniforme en comparación con las fuentes convencionales de energía cuyos yacimientos se concentran en determinadas regiones del planeta. Por ello la energía solar ha tomado una gran importancia, debido a que ha demostrado ser una de las principales fuentes renovables con mayor disponibilidad, así como la flexibilidad que brinda para la obtención de energía eléctrica y la generación de calor para aplicaciones tanto domésticas como industriales (Ledesma-Jaime et al. 2016).

Según el aprovechamiento que se le dé, la energía solar, *grosso modo*, se clasifica en energía solar térmica (aprovecha la radiación solar para producir calor) y solar fotovoltaica (aprovecha de la luz del Sol para producir electricidad). En segundo lugar, aunque ambas tecnologías aprovechan la energía solar también presentan numerosas diferencias; particularmente el uso de energía fotovoltaica (PV, por sus siglas en Inglés "*Photovoltaic*") proporciona durante las horas de Sol energía eléctrica con un bajo costo operativo en una planta PV, pero si ésta cuenta con almacenamiento eléctrico para operar en horario nocturno su costo incrementa debido al uso de las baterías para el almacenamiento; en contraparte, las plantas de energía solar concentrada (CSP, por sus siglas en inglés "*Concentrated Solar Power*") permiten acumular la energía obtenida mediante sistemas de almacenamiento térmico más económicos que las baterías de estado sólido (Hernández-Moro and Martínez-Duart 2013).

Numerosas investigaciones han dado a conocer un futuro prometedor en la generación y distribución energética en combinación de PV y CSP, por lo tanto no sería sorpresa en un par de años encontrarse con sistemas híbridos de torres solares y paneles solares (Parkinson 2015).

Actualmente la energía solar concentrada, también conocida como termosolar concentrada tiene el potencial necesario para la generación de electricidad a través de sistemas de espejos, en donde la radiación solar directa es concentrada, logrando temperaturas de entre 40 a 1000°C (Pfahl et al. 2017).

El mercado de CSP ha tenido un notable aumento, esto debido a todas las ventajas que posee, la principal es su capacidad de almacenamiento de energía para su futuro por medio de un portador de calor (Sepúlveda and Matías 2013).

Así mismo los sistemas de concentración solar están clasificadas de acuerdo a las temperaturas que llegan a alcanzar (Hernández Martínez 2013). Entre ellos se puede mencionar a los colectores de baja temperatura (logrando temperaturas menores de 65 °C), colectores de temperatura media (entre 100°C y 300°C) y los colectores de alta temperatura, que logran temperaturas mayores a los 300°C (Ledesma-Jaime et al. 2016).

En la actualidad, los colectores de alta temperatura, también llamados de alta potencia, se componen de sistemas como: torres receptoras centrales, colectores cilíndrico-parabólicos, de disco parabólico, entre otros. Siendo algunos de los anteriores ejemplos de captación sistemas con seguimiento solar de alta precisión con capacidad de seguimiento de la trayectoria solar (Torres Roldán 2016).

Las plantas solares de torre central son sistemas de concentración de alta temperatura de gran escala y constan de dispositivos con el objetivo de reflejar los rayos solares que inciden en éstos y canalizar esa energía solar en un concentrador ubicado en la parte superior de la torre receptora (Ledesma-Jaime et al. 2016), dichos aparatos reciben el nombre de heliostatos y se ubican alrededor de la torre, generando un arreglo tipo Fresnel de disco parabólico (Duffie and Beckman 2013).

En el presente trabajo, el objeto principal de estudio, diseño y análisis es un heliostato de 9 m² de bajo costo, utilizando materiales comerciales y reduciendo al máximo los procesos de manufactura complejos, ésto debido a que los heliostatos son el componente más importante de las plantas de torre central y hacen parte de aproximadamente el 50% del costo total de toda la planta solar de torre central (Gwiazda and DiBella 2005).

1.2 Definición de un heliostato

Un heliostato se define como un *“aparato que, mediante un servomecanismo, hace que un espejo siga el movimiento diurno del Sol, recogiendo así la máxima energía para su utilización calorífica.”* (RAE 2016). Luego de este acercamiento hacia lo que en la actualidad es un heliostato, se explicará con mayor detalle su funcionamiento.

Los heliostatos están compuestos por al menos una superficie reflectante, la cual se mueve durante el día mediante un sistema de control de inclinación que le permite reflejar en todo momento la radiación solar directa hacia un objetivo estático determinado (Figura 1). Es

usualmente empleado en plantas solares de torre central en donde se encuentran replicados en un arreglo circular alrededor de la torre. Sin embargo, su aplicación no se limita a este tipo de centrales, sino que también es utilizado en hornos solares y en sistemas de iluminación solar donde es más común verle de forma individual o al menos, en una menor cantidad que en las plantas solares de torre central.

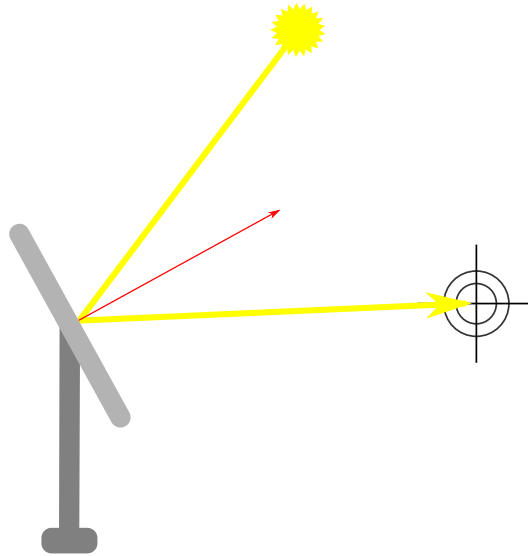


Figura 1. Diagrama simplificado de un helióstato.

El seguimiento solar existente en los helióstato y en sus espejos se da gracias a 2 mecanismos de accionamiento que permiten el movimiento en el azimut y la elevación. Previamente es necesario saber que el par de ejes azimut-elevación son aquellos que definen la posición de un astro en el cielo en un momento dado, y desde una localización determinada (Collado Hernández, Gracia Grijota, and Fort I Comaposada 2014).

Un primer mecanismo permite el posicionamiento azimutal, es decir, el ángulo que se mide desde el punto cardinal norte sobre el plano de proyección de la superficie terrestre, esto se da gracias a un movimiento rotatorio del helióstato sobre el pedestal sobre el cual está soportado al suelo *in situ*. Por otra parte, el segundo mecanismo que permite el accionamiento en el ángulo de elevación por el cual se entiende como la distancia angular vertical desde el plano horizontal, este movimiento es como consecuencia al tubo de torsión en donde se encuentran las vigas transversales como la estructuras de soporte de los espejos (Collado Hernández, Gracia Grijota, and Fort I Comaposada 2014).

Siendo el principal objetivo de los helióstatos el mantener siempre reflejados los rayos solares al colector solar, una función a cuidar es seguimiento solar, por ello el sistema del seguidor solar consta de motores, los cuales controlan el seguimiento primario y secundario del helióstato, reflejando los rayos del Sol a un foco. La energía solar recogida en el receptor se puede enviar a almacenarse directamente, o bien como fuente de energía renovable (Mancini 2000).

Existen diversos tipos y configuraciones de helióstatos, cada uno de ellos posee sus pro y sus contra. Sin embargo el desarrollo tecnológico entorno a las plataformas de concentración solar ha ido incrementado la eficiencia y viabilidad de este tipo de proyectos; haciendo de los nuevos modelos de helióstatos, dispositivos con grandes ventajas para las centrales de generación termoeléctricas.

1.3 Estado del Arte

1.3.1 Origen

La idea de desviar la luz del Sol mediante diversos espejos planos hacia un mismo objetivo con el fin de concentrar la radiación solar, es tan antigua que aún se desconoce su origen exacto, sin embargo una leyenda afirma que Arquímedes utilizó un "vidrio ardiente" para concentrar la luz del Sol sobre la flota invasora romana, logrando repelernos de Siracusa.

A pesar de ello el inventor oficial del aparato hoy conocido como helióstato fue el científico holandés *Willem Jacob 's Gravesande* (1688-1742), creador de la idea conceptual de un dispositivo con la capacidad de hacer girar un espejo a la velocidad adecuada y mantenerlo en la orientación correcta para asegurar un rayo de Sol constante. El nombre de "helióstato" tiene su origen en las palabras griegas *helio* y *stato*, las cuales significan Sol y estático, respectivamente, haciendo referencia a mantener el Sol en una sola posición.

En aquel momento su uso se veía principalmente reflejado en laboratorios de investigación con el objetivo del estudio de fotones que vibran en un solo plano/dirección, del estudio del comportamiento del espectro electromagnético en la materia, para mantener siempre cierta iluminación en el uso de microscopios, etc.

Conforme se dio el paso del tiempo, el desarrollo de los helióstatos ha pasado a cambiar considerablemente el concepto inicial de lo que era ese aparato del siglo XVIII, siendo ahora un concepto que describe un instrumento que tiene como objetivo el mismo que antes, es decir, el mantener el haz de luz reflejado sobre un objetivo específico, pero lo diferencia el diseño de actual que incluye servomotores para el control de los movimientos para una orientación precisa, se le añaden controlares electrónicos y actuadores para el seguimiento solar, facetas como el área adecuada de reflexión, la estructura de soporte para los espejos, el pedestal y la cimentación adecuada.

Esta misma evolución ha buscado resolver los problemas de cargas de viento, estabilidad del helióstato, deformaciones por gravedad, modificaciones dadas por los coeficientes térmicos de los materiales usados, la mayor eficiencia en cuanto a las dimensiones de las facetas, entre otros, pero siempre en busca de obtener la mayor cantidad radiación solar al menor costo y con la mayor eficiencia posible; esto ha traído consigo una serie de periodos, los cuales se pueden conocer como generaciones.

1.3.2 Evolución

La primera generación inició a partir de 1970, donde se buscaba por medio de I+D+i mejorar los sistemas de seguimiento solar, así como la estructura de soporte. La segunda generación se caracterizó por la exploración en cuanto a los materiales para la superficie reflectante. La tercera y última generación tuvo un significativo impacto, en cuanto a que ya se habían resuelto algunos de los principales retos que se encontraron, así que esta generación se enfocó en buscar superficies reflectantes que se caracterizaran por la ligereza y la mayor reflectancia posible con capacidad de soportar grandes cargas de viento (Torres Roldán 2016).

Recapitulando lo anterior, el principal desarrollo aplicado al uso de sistemas de concentración solar térmica se dio a partir de 1975, en donde se empezaron a reportar más y más publicaciones con distintos enfoques hacia el progreso de los helióstatos como lo fue con: *Jaime Ledesma* en su publicación *Análisis dinámico estructural de un helióstato concentrador de energía solar*, reporta los avances en la prolongación de la vida útil, en la relación calidad-precio y el mejoramiento del rendimiento hecho (Ledesma-Jaime et al. 2016). Otros como los son *Griffith* en *Modal Analysis of a Heliostat for Concentrating Solar Power* hablan acerca del análisis modal en MEF que se hizo en condiciones delimitadas de la estructura, el cual cuenta con sistema independiente de las facetas en cuanto a la rotación (Griffith et al. 2012) por otra parte, en su artículo *Diseño de un helióstato empleando técnicas computacionales*, *Chacón* logró un diseño en CAD que tiene como adición el análisis de elementos finitos del soporte de cristal reflectante (Chacón et al. 2010); a su vez *Kribus* menciona el diseño de helióstatos enfocados a los sistemas de control en su reporte *Continuous Tracking of Heliostats* para el mejoramiento del seguimiento solar y el posicionamiento de acuerdo a las trayectorias (Kribus et al. 2004); en cambio *Torres Roldan* en *Design of an innovative and simplified polar heliostat for integration in buildings and urban environments* habla de la propuesta para implementar, como el nombre de la publicación lo menciona, un diseño de un sistema polar simple e innovador con 1 grado de libertad, lo que trae consigo un nuevo desarrollo en función de la variable del tiempo (Torres-Roldán, López-Luque, and Varo-Martínez 2015) en contraste en la publicación *A review of studies on central receiver solar thermal power plants*, *Behar* reporta el uso, propósitos, aplicaciones, importancia de uso y evolución de sistemas de concentración de energía solar, mencionando el potencial de este tipo de sistemas, en los que encaja perfectamente los helióstatos como dispositivos ópticos de concentración solar (Behar, Khellaf, and Mohammedi 2013).

Dados todos estos desarrollos, se llegaron a implementar grandes proyectos de receptores centrales de torre, entre ellos se pueden mencionar los más importantes hasta el momento en la Tabla 1.

Planta	Ubicación	Año de operación	Capacidad instalada (MW)	Área de colectores (m ²)	Almacenamiento energético
Khi Solar One	Uppington	2014	50	580,000	2 horas
Rice Solar Energy	Mojave	2013	150	1'071,361	7 horas
Ivanpah Solar	California	2013	392	2'600'000	-
Crescent Dunes Solar	Nevada	2013	110	1'071,361	10 horas
Gaskell Sun Tower	California	2012	245	-	-
Gemasolar	Sevilla	2011	19.9	304,750	15 horas
Planta Solar 20	Sevilla	2009	20	150,000	1 hora
Sierra SunTower	California	2009	5	27,670	NO
Jülich Solar Tower	Jülich	2008	1.5	17,650	1.5 horas
Planta Solar 10	Sevilla	2007	11	75,000	1 hora

*Tabla 1. Plantas solares de torre central mundiales más relevantes.
(NREL 2017)*

En cuanto a los heliostatos autónomos, se consideran un invento relativamente reciente. La primera patente de un heliostato con las características que le da la autonomía fue dado a *Andreas Muehe* en 1997, sin embargo, su desarrollo se fundamenta en el diseño de un heliostato patentado por *Vicent Noto* en 1986 con el título “*Reflective solar tracking system*” (Noto 1986).

Posteriormente se puso en marcha en el año de 1999 un heliostato llamado COLON6 que cumple hasta el día de hoy con la autonomía de trabajar con tensión continua bajo el funcionamiento de un panel FV, libre de cableado para la comunicación, y con medidas de seguridad propia, junto con sus sensores individuales y su vez tiene comunicación con la sala de control de la Plataforma Solar de Almería que se encuentra a casi medio kilómetro de distancia (García Navajas and Egea Gea 2000).

Otras patentes relativas al diseño de heliostatos han tomado lugar como las de mayor impacto, algunas a mencionar son:

- *Automatic heliostat track alignment method*, por *Kenneth W. Stone*.
- *Heliostat device*, por *Yaoming Zhang*.
- *Solar tracking system*, por *Ivan Pawlenko y Larry Samson*.
- *Autonomous heliostat*, por *Katsushige Nakamura*.

1.4 Objetivos del proyecto

1.4.1 *Objetivo general*

Diseñar un heliostato modular de 9 m², mediante componentes comerciales de fácil adquisición, que permita reducir el costo de prototipado y sea flexible a modificaciones estructurales que permitan facilitar la modernización, el mantenimiento y su investigación.

1.4.2 *Objetivos específicos*

- Investigar sobre el estado del arte de los heliostatos autónomos, así como sus ventajas y desventajas.
- Plantear los parámetros de partida para el diseño del heliostato, tales como área reflectante, distancia máxima a la base del concentrador solar, elevación o altura del concentrador, velocidades máximas permisibles del viento en condiciones de trabajo y de supervivencia.
- Identificar los factores más críticos, desafíos e inconvenientes que se presentan en una central solar termoeléctrica de heliostatos autónomos.
- Diseñar un heliostato que se adapte a condiciones típicas del entorno ambiental de Aguascalientes, Ags, México.
- Modelar mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD) el prototipo de heliostato diseñado.
- Simular mediante un software de análisis de elementos finitos (FEA), las concentraciones de esfuerzos y las deformaciones máximas que se presentan en las regiones más críticas del ensamble.
- Realizar una simulación de trazado de rayos para evaluar la concentración y deformación del punto focal a partir de las deformaciones obtenidas en la simulación de elementos finitos.

1.4.3 *Planteamiento del problema*

Los elevados costos de fabricación y mantenimiento de los heliostatos en las plantas solares de torre central implican una gran inversión para su implementación, lo cual dificulta que este tipos de proyectos sean implementados en países con economías de mercados emergentes.

1.4.4 Justificación

Los helióstatos son el componente más importante de las plantas de torre central y hacen parte del aproximadamente el 40-50% del costo total de una toda la planta (Gwiazda and DiBella 2005), (Mancini 2000), (Kolb et al. 2007) lo que representa un área de oportunidad interesante para la optimización de la distribución de la inversión para llegar a ser de las plantas de torre central un competidor justo con los combustibles fósiles.

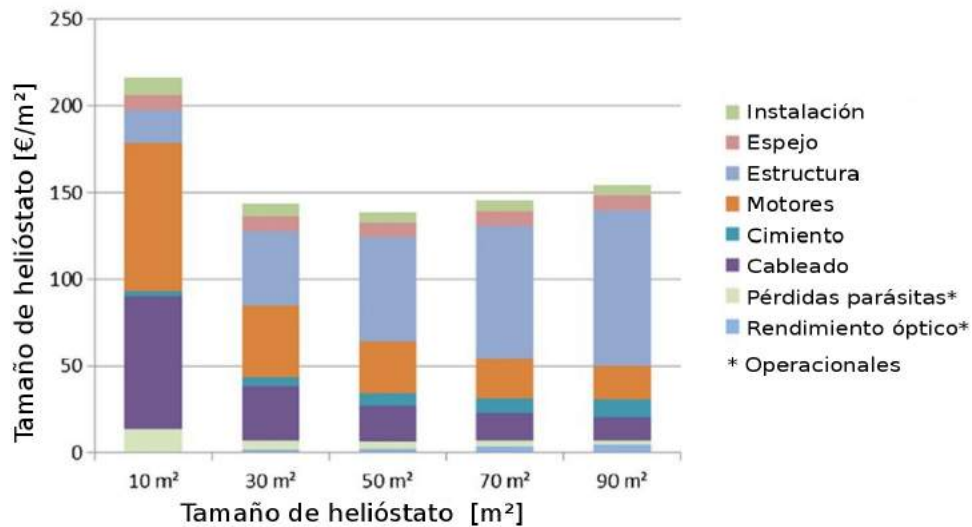
Subfunción	Componentes convencionales	Porcentaje del costo	Reducción del costo al reducir	Reducción del costo al incrementar
Reflejar la luz solar	Arreglo de facetas	25%	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas. • Costo del material. 	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad del haz. • Estabilidad.
Ajustar la forma del material reflectante.	Estructura de soporte	15%	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas. • Brazo de palanca. • Costo del material. 	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad del haz. • Brazo de palanca para mover el bastidor.
Conectar el sistema al suelo.	Cimentación y pedestal	15%	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas. • Brazo de palanca. • Costo del material. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso. • Brazo de palanca para mover el bastidor. • Cierre del formulario.
Determinar la orientación del plano principal.	Sensores de posición, controlador.	5%	<ul style="list-style-type: none"> • Cableado. • Sensores de posición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Área reflectante.
Orientar el material reflectante en 2 ejes.	Motores	30%	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas. • Brazo de palanca. • Costo del actuador/engranaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Área reflectante. • Intersección. • Brazo de palanca de los cojinetes.
	Instalación y ensamble	10%		

Tabla 2. Estimaciones de la reducción de costo de las subfunciones básicas de un helióstato. (Pfahl 2013)

Hasta el 2013 se reportó un costo de entre 150-200 dólares/m² con estimaciones dadas en base a la producción. A partir de 2013 gracias al gran desarrollo en cuanto a la reducción del costo, así como de proyectos desarrollados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, el precio llegó hasta 100 dólares/m², lo cual fue una significativa disminución de los costos de producción. El objetivo que se tiene es llegar a los 75 dólares/m², lo cual ya no se ve como una meta muy utópica (Pfahl et al. 2017).

Para lograr el objetivo anteriormente mencionado es necesario aumentar ciertas eficiencias de los componentes, así como reducir sus costos, reducir cargas de viento al estimarlas con precisión, y desarrollar diseños con estructuras eficientes que permitan evitar fallas estructurales y mejorar el rendimiento óptico; de esta forma el costo del helióstato puede reducirse eficientemente, sin descuidar el aspecto de calidad-precio (Pfahl 2013).

En la Figura 2 se presenta la distribución de los costos según diversos tamaños reportados en la planta solar de torre central *HelioTower*.



*Figura 2: Impacto del tamaño de los helióstatos en el costo de HelioTower.
(Cordes, Prosinecki, and Wieghardt 2012)*

Adicionalmente se han hecho diversos estudios sobre la reducción de costos de helióstatos, uno de los más rigurosos y detallados fue hecho en el año 2013 por la Compañía Sandia Labs.

Según el más reciente reporte de Bloomberg Financial, los países líderes en implementación de energía solar termoelectrica son Estados Unidos y España, siendo este último el país líder en investigación y desarrollo al respecto. Esta ventaja en desarrollo tecnológico se debe a la cantidad de centros de investigación en energías renovables, especialmente en energía solar, que tiene España, dónde el centro más destacado en el ámbito del desarrollo de tecnología solar es la Plataforma Solar de Almería, constituida por una serie de centrales de concentración termo solar dedicadas exclusivamente a la investigación.

2 Marco teórico

2.1 Geometría Solar

Es importante conocer a priori el comportamiento del Sol para poder aprovechar eficientemente la radiación que recibimos, para ello debemos determinar el lugar o región objetivo para hacer un estudio de la trayectoria solar sobre la esfera celeste, y las oscilaciones que ésta tiene en las distintas épocas del año

Algunos de los factores que atenúan la intensidad de la radiación son los atmosféricos y los geográficos; en los atmosféricos se encuentran factores como las nubes, las partículas suspendidas y la contaminación en general. Por otra parte, en los geográficos se encuentra la rotación diaria, la latitud y longitud y la traslación de la Tierra.

Teniendo en consideración el comportamiento de traslación del planeta Tierra de 365 días alrededor del Sol en el plano de la eclíptica, y si se observa cuidadosamente, el Sol pareciera que cambia su trayectoria diaria a lo largo de las estaciones del año, esto se debe a un fenómeno conocido como la declinación solar.

La declinación solar consiste en el ángulo promedio aproximado y no constante de $23^{\circ}27'$ que forma el plano de la eclíptica con relación al plano infinito, también conocido como plano del Ecuador o ecuatorial (ver Figura 3).

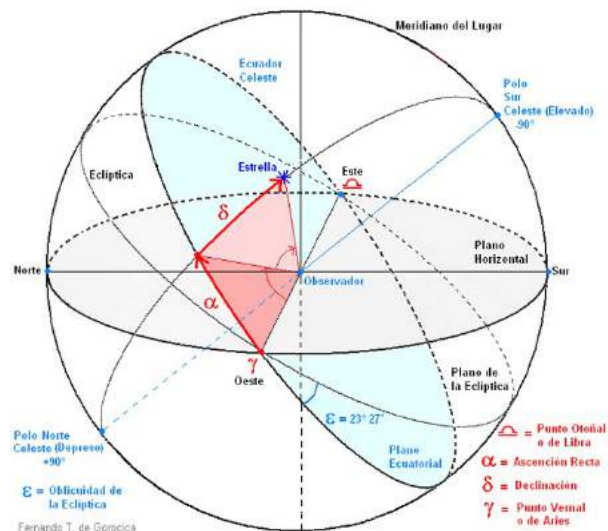


Figura 3. Esfera celeste con los planos de sección. (Gorocica 2014)

Habiendo dicho que se toma una declinación solar promedio para fines prácticos, también queda aclarar que a lo largo del año este ángulo oscila entre los $-23^{\circ}27'$ y $23^{\circ}27'$, en donde estos valores se toman en los solsticios de verano-invierno (22 de junio) y de invierno-verano (22 de diciembre), conocidos también como el afelio y perihelio respectivamente; la declinación llega a tener un ángulo igual a 0 en los equinoccios de primavera-otoño (21 de marzo) y otoño-primavera (23 de septiembre) como se puede observar en la Figura 4.

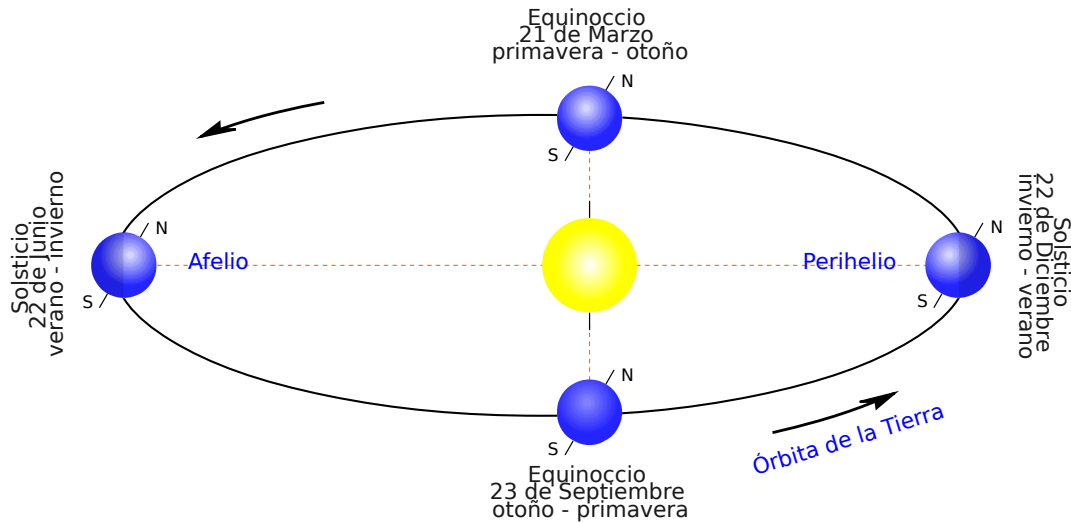


Figura 4: Eventos solares en la traslación de la tierra. (Caliver 2010)

Cabe destacar la importancia de la declinación solar como parámetro determinante en la captación de energía solar. El objetivo es recolectar la mayor cantidad de energía solar incidente, lo cual la relación geométrica solar entre un plano y otro llega a ser importante en la valoración y cálculo de la variación de la posición solar (Torres Roldán 2016).

Para lograr cuantificar aproximadamente la radiación solar incidente y la variación continua del ángulo de declinación solar en términos del día juliano, se tiene la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (d_n + 284)\right)$$

en donde delta determina la inclinación de la tierra respecto a d_n , conocido como día juliano (Cooper 1969).

2.1.1 Trayectoria solar en Aguascalientes, Ags., México.

Para una estimación aproximada de la posición del Sol con respecto a una ubicación específica se recurre a la carta solar estereográfica de *Fisher-Mattioni*, más comúnmente conocida como carta solar, la cual es una representación gráfica del planeta, que de acuerdo a una latitud determinada y eligiendo una hora y fecha específica, se obtiene el ángulo de elevación solar y ángulo de azimut

(ver ejemplo en la Figura 5).

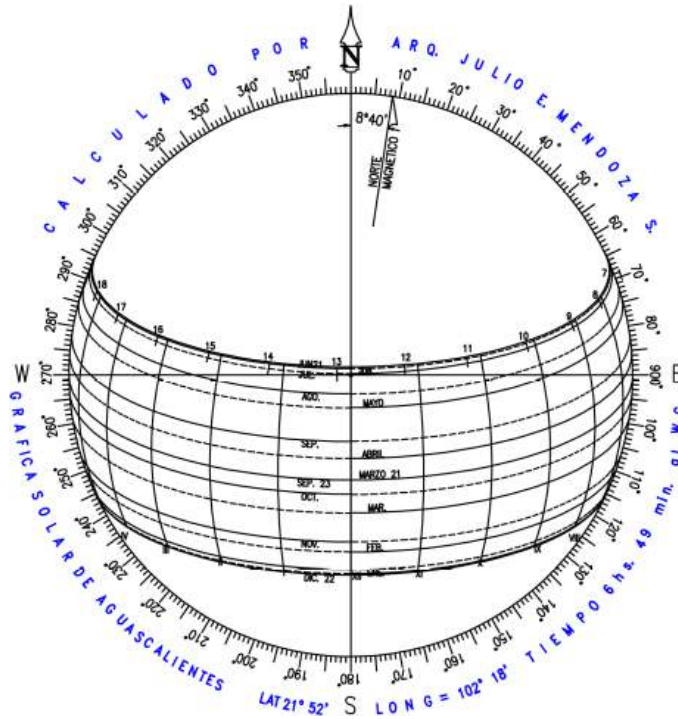


Figura 5: Carta solar de Aguascalientes, México.
(Mendoza 2014)

2.2 Componentes principales de un helióstato

Cuando se habla de un helióstato como el conjunto de espejos de facetas que reflejan la radiación solar, hay que tomar en cuenta que realmente se está hablando de un conjunto integrado de los principales componentes que hacen posible cumplir la función con la cual fue hecho el helióstato, que brinda su servicio a una planta termosolar. Esos componentes son:

Pedestal:

Es la estructura que soporta el dispositivo, le da fijación al suelo y estabilidad. Este componente tiene gran relevancia dentro del diseño de un helióstato, pues debe garantizar rigidez del mismo frente a perturbaciones externas como ventiscas y precipitaciones pluviales (Pfahl et al. 2017).

Aunque existen diversos tipos de estructuras de soporte de los helióstatos, el pedestal tubular *in situ* es el más común entre los demás (Mancini 2000).

Cabezal:

Corresponde al sistema de fijación de los componentes del helióstato que le permite a la

superficie reflectante rotar con determinados grados de libertad (generalmente dos), para lograr un ángulo propicio de reflexión.

Estructura de soporte o Bastidor:

Esta estructura es la encargada de colocar con la mayor precisión posible a las facetas, ajustando la forma del espejo, y soportando el peso total y las cargas de viento. Se unen al heliostato a través de los actuadores a tierra (Mancini 2000). Generalmente se emplea un entramado de perfilería que le brinde la suficiente rigidez a las facetas para garantizar la estabilidad de su posición y ángulo relativo al conjunto.

Existe una gran pluralidad en todos los avances dados en busca de pérdidas por corrosión o alta reflectancia, desde materiales como aluminio, acero al carbono, plata, etc. (Hernández Martínez 2013).

Superficie reflectante:

La parte más importante del heliostato es sin duda la superficie reflectante, de ella depende la eficiencia del mismo según el índice de reflexión del material empleado. Su función es reflejar la luz directa del Sol hacia un punto específico. Generalmente es modular de tal forma que cada módulo comprende una superficie reflectante independiente llamada faceta.

Facetas:

En la mayoría de los heliostatos conforman la superficie reflectante, fungen como los elementos ópticos que reflejan la luz solar (Pfahl et al. 2017) y son los elementos responsables de concentrar la radiación solar en el área más reducida posible, en el caso de heliostatos de una planta de torre central. No obstante, los hornos solares que utilizan heliostatos para mantener un haz unidireccional utilizan facetas planas paralelas.

Se han reportado diversos materiales en los módulos de espejos, se toman en cuenta opciones desde vidrio, gracias a ser un material de bajo costo, con gran durabilidad, alta aceptación en la industria y con un porcentaje de reflectancia por defecto. Otras opciones que se han llegado a considerar han sido espejos de metal pulido y de plástico, siendo menos usadas debido a que no cuentan con la reflectancia adecuada para su aplicación (Pfahl et al. 2017). En el caso de las facetas de vidrio se busca una composición que permita optimizar la transmitancia de la radiación solar en la primera superficie, y para la película reflectora se usan depósitos de metales como aluminio y plata sobre la placa de vidrio. Cuando el espejo tiene dos capas de vidrio y en medio está el material reflectante se les llama espejos laminados.

Las facetas de espejos laminados, proporcionan un gran rendimiento óptico, una gran fuerza y rigidez y si se tiene un buen diseño de este tipo de estructura, también se puede obtener una reducción de los costos totales de la estructura de soporte (Pfahl et al. 2017).

Actuadores:

Son los dispositivos que le brindan movimiento al helióstato. Se instala un actuador por cada grado de libertad; pueden ser de rotación o desplazamiento lineal según el diseño. También pueden estar adaptados mediante un sistema de reducción de velocidad para brindar más exactitud y fuerza al posicionar la superficie reflectante, cumplen con el objetivo de mantener la imagen del Sol reflejada en el receptor. También tiene el diseño dado para soportar las cargas del viento a través del pedestal (Mancini 2000).

Algunos de los componentes más comunes que le brindan el movimiento helióstatos son: motores con reducción mecánica, actuadores lineales y sistemas de accionamiento hidráulico.

El sistema azimuthal montado se ha considerado uno de los principales; por otro lado, el sistema que aparte de económico en relación a otros, se considera el sustituto ideal del motor del eje azimuthal es el sistema de actuadores lineales (ver Figura 6). Sistemas como los actuadores hidráulicos tienen un mayor uso en helióstatos grandes, esto de acuerdo al elevado costo de por medio. Y por último, pero no menos importante, los sistemas alternativos son un ejemplo de sistemas que evitan los costos de montaje en el pedestal (Pfahl et al. 2017).



Figura 6. Ejemplo de un helióstato con actuadores lineales (Pfahl 2013).

Sistema de Control:

Un sistema de control automático es crítico en una central solar termoeléctrica, pues es éste el que gobierna a cada uno de los actuadores de cada helióstato del conjunto. Éste puede ser centralizado o independiente para cada helióstato. Existen controles para helióstatos tanto de lazo abierto como de lazo cerrado.

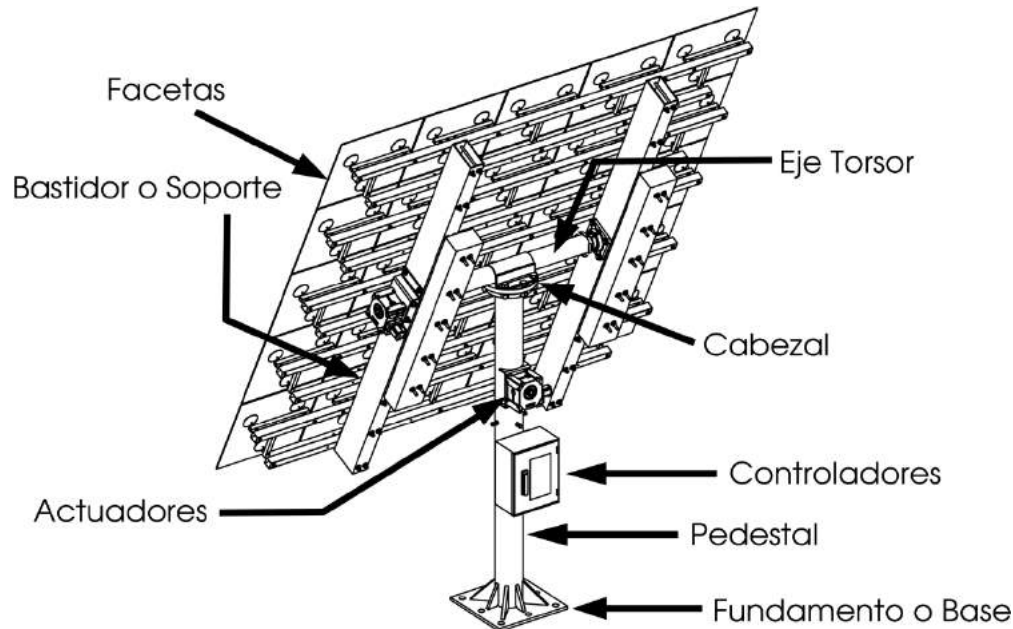


Figura 7: Principales componentes de un helióstato.

2.3 Tipos de Helióstatos

El grado de desarrollo que ha existido en el campo de los concentradores individuales llamados helióstatos ha respondido a las necesidades técnico-económicas que su mismo progreso ha ido mostrando en torno a una mayor obtención de radiación solar al menor costo posible, por ello se han generado variedades de helióstatos con respecto a:

2.3.1 Según su morfología

Tipo T

Siendo el tipo de helióstato con mayor facilidad de fabricación y menor costo, así como el más empleado a nivel mundial, los helióstatos tipo T toman este nombre gracias a su construcción simple que consiste en una estructura en forma de T, la cual permite orientar la plataforma que sostiene las facetas en dirección de cualquier punto de la semiesfera celeste mediante los movimientos de rotación azimutal sobre un eje paralelo al pedestal y elevación, sobre un eje perpendicular al azimutal. (PSA 2015)

Membrana ajustada

Considerado como el tipo de helióstato con un buen factor de concentración solar, una gran calidad óptica y estable ante las cargas de viento, los helióstatos de membrana ajustada constan de 3 o más puntos de apoyo en una estructura rígida con forma de un anillo con alto grado de nivelación. Dentro de sus desventajas se encuentra ser el más complejo y caro de fabricar, es por ello que no son tan comunes y no se producen en serie. (PSA 2015)

Eje focal

La simplificación del sistema de control hace de este tipo de helióstatos uno muy peculiar y debido a su costo no muy extendido a nivel comercial. Consiste en un helióstato con dos ejes de rotación, uno de ellos, el principal, es coincidente con el punto objetivo en el receptor y el eje secundario es perpendicular a éste y permite un movimiento de elevación por lo cual es usualmente llamado helióstato rotación-elevación. (PSA 2015)

2.3.2 Según su estructura

Entre los distintos tipos de estructuras de soporte de los espejos, se encuentran los soportes de acero, los cuales consisten en varias vigas transversales que se encuentran sobre el tubo de torsión horizontal, formando una T entre ellos, y a su vez están conectados entre sí por el sistema de accionamiento. En este tipo de estructura, se tiene en cuenta los diferentes coeficientes de expansión del vidrio y el acero, causando una necesidad de adicionar pernos que soporten la estructura y a la vez le den la flexibilidad necesaria para compensar la diferencia de esos coeficientes térmicos. Los pernos se vinculan a los espejos mediante ventosas flexibles adheridas a la parte posterior de las facetas, logrando así una disminución en la tensión en el cristal y una aplicación de la fuerza distribuida (ver Figura 8).



Figura 8. Conexión de los espejos a la estructura de soporte de acero mediante ventosas y pines.

Planta solar en Coalinga, CA. EE.UU. (Brightsource Energy 2012)

Otros tipos de estructuras de soporte son las de facetas de espejo estampado, las cuales mediante vidrios reforzados y soportes estampados ofrecen una gran rigidez. Y gracias a los adhesivos que contiene, compensa también los diferentes coeficientes de expansión térmica con una gran flexibilidad entre el vidrio y el acero. La desventaja que trae consigo este tipo de estructura es la reducción de la vida útil de la conexión debido a los cambios de temperatura, que con las oscilaciones de esfuerzos se ven afectadas las propiedades físicas del material adhesivo.

Un último tipo de soporte a mencionar es el tipo helióstato de membrana, que están constituidos por una membrana de acero inoxidable ajustada a un anillo de acero que la soporta. Esta membrana se deforma intencionalmente para formar una superficie cóncava que permite concentrar con una calidad moderada, con respecto a los demás tipos la radiación solar incidente. A pesar de ser un tipo con menor producción, en sus ventajas se encuentran su significativa eficiencia de reflexión solar, la liviandad de la superficie reflectante (Vogel and Kalb 2010).

2.3.3 Según su alimentación y control

Helióstatos Centralizados

Tienen un sistema de control central que se encarga de enviar vía cableada, mecánica o inalámbrica, un estímulo a cada actuador de cada helióstato perteneciente a un mismo sistema de concentración termosolar. El control puede ser basado en el seguimiento del Sol, para lo cual se requiere un seguidor solar que es común a todos los helióstatos de la central, sin embargo es igualmente utilizado un sistema de control basado en predicciones astronómicas de la posición del Sol en cada instante del día para lo cual se puede prescindir del seguidor solar.



*Figura 9. Campo de helióstatos centralizados.
(Global NevadaCorp. 2011)*

Helióstatos Autónomos

Poseen su propio sistema de control independiente de los demás heliéstatos de la plataforma y de la central colectora. Al igual que los heliéstatos centralizados, los autónomos pueden tener un sistema de control basado en el seguimiento del Sol o en cálculos astronómicos de la posición relativa del Sol y la Tierra. Para el primero de los dos casos, se requiere de un seguidor solar para cada heliéstato, con un respectivo sistema, mecánico o electrónico, de sincronización con los actuadores.

El concepto de la autonomía aplicado a heliéstatos implica un equipamiento de control local que genera una serie de cambios en su operación, cálculo, seguridad, alimentación, etc. logrando de esa forma cumplir con el objetivo de reflejar en todo momento la radiación solar directa hacia un objetivo estático determinado mediante un seguimiento solar y sin necesidad de la asistencia de ningún dispositivo externo (Nakamura 2004).



Figura 10. Ejemplo de helióstato autónomo (Pfahl 2013)



Figura 11. Helióstato autónomo del campo CRS de la Plataforma Solar de Almería. (PSA 2015)

Un helióstato autónomo tiene la capacidad de por sí mismo:

- Eliminar el uso de cableado y canaletas para funcionar de forma aislada (autonomía física).
- Hacer uso de panel fotovoltaico como alimentación y no depender de otras fuentes convencionales de energía (autonomía del suministro eléctrico).
- Realizar funciones de posicionamiento y guiado de ejes, cálculo y determinación del posicionamiento solar y control del foco, independizándolo así de asistencia desde un control central (autonomía de cálculo).

- Velar para tomar decisiones sobre su propia seguridad, protección e integridad, eso gracias al conocimiento que logra de la condiciones externas meteorológicas o internas de un mal funcionamiento (autonomía de seguridad).
- Realizar ciclos operativos gracias al control local con el que está equipado. Los ciclos pueden ser indicados a distancia o preestablecidos (García Navajas and Egea Gea 2000).

2.3.4 Según su tamaño

Existen diversos tipos, tamaños y configuraciones de helióstatos, cada uno de ellos posee sus pro y sus contra. Sin embargo el desarrollo tecnológico entorno a las plataformas de concentración solar ha ido incrementado la eficiencia y viabilidad de los diferentes tamaños de proyectos; se han reportado tamaños desde los muy grandes que alcanzan los 200 m², los grandes que oscilan entre los 140 y 200 m², los medianos desde los 40 m², los chicos desde 2 hasta 16 m² y los mini-helióstatos desde 1 a 2 m².

2.4 Variables operacionales

2.4.1 Cargas de viento

Las cargas de viento extremas son los agentes externos causados por las condiciones atmosféricas que conducen a fallas mecánicas y perturban la calidad óptica. Siendo casi inevitables y debido a la velocidad del viento y el ángulo de incidencia, llegan a exceder la tensión máxima permitida por la estructura, pueden provocar fatiga de los mecanismos y entrar en resonancia con el arreglo (Pfahl et al. 2017)

Se ha registrado una estrecha relación entre las cargas de vientos dadas por la velocidad del mismo, y el costo de los helióstato. Así mismo fuentes recomiendan una reducción del tamaño inversamente proporcional al aumento de la velocidad promedio, es decir, conforme mayor sea el área de las facetas del helióstato, mayor será la posibilidad de fallas en el helióstato (Emes, Arjomandi, and Nathan 2015).



Figura 12. Ejemplos de túnel de viento. (Peterka et al. 1989)

Izquierda: Wacker Engineers

Derecha: Universidad de Adelaide

El uso de túneles de viento que simulan el viento en la capa límite atmosférica (ABL, por sus siglas en inglés “*atmospheric boundary layer*”) y el uso de coeficientes de carga normalizados (determinados por el área de los espejos, así como de su orientación y diseño por medio de modelos simplificados) se dan con el objetivo de establecer las cargas de viento medias y máximas (Peterka et al. 1989).

Algunas de las alternativas estratégicas que se han buscado para disminuir el impacto significativo de las cargas de viento en los heliostatos son:

- Tomar en consideración las condiciones del cimiento cuando se planea orientar las facetas, de esta forma se logra una reducción de las cargas con una baja o casi nula inversión económica.
- Insertar vallas o deflectores alrededor del campo de heliostatos, aunque esta alternativa trae consigo algunas posibles desventajas como son el sombreado sobre los espejos, y un costo adicional por los materiales e instalación (Pfahl et al. 2017).

2.4.2 Dimensionamiento de los heliostatos

Dentro de la amplia gama de tamaños de heliostatos no se puede afirmar un solo tamaño como el indicado o como el más viable de todos, esto es porque el tamaño óptico depende de las condiciones específicas dadas.

Rescatando los beneficios de los heliostatos de gran tamaño se tiene que se requiere una menor cantidad de piezas, y un mismo cimiento logra ser suficiente para un área de espejo equivalente. En el mismo sentido, los heliostatos pequeños tienen la ventaja de enfrentarse a velocidades

menores del viento, debido a que mientras más baja sea la altura, menor la velocidad. Otro aspecto positivo es la menor masa que representa el área del mismo espejo por ser más pequeño (Pfahl et al. 2017).

Se ha reportado que, de acuerdo a la sostenibilidad energética que se está buscando en la arquitectura bioclimática, hay un incremento en la selección de pequeños helióstatos para aplicaciones de iluminación (Torres Roldán 2016), los cuales tienen un rango de tolerancia mucho mayor que los de las plantas solares de torre central, en cuanto a la calidad de la concentración y seguimiento solar.

Otras ventajas de seleccionar un helióstato del tamaño de artículos comúnmente manufacturados es en cuanto a la mayor facilidad que existe en el transporte y la logística, en la fabricación a un bajo costo, por usar componentes más comunes, por emplear ensamblajes estándar y porque existe un mayor volumen de producción (Pfahl et al. 2017).

2.4.3 Precisión del seguimiento.

Se requiere una alta precisión en el seguimiento solar, o en su defecto aparecerán los errores de seguimiento, también conocidos como la desviación estándar que existe entre la orientación ideal y real del eje óptico del helióstato a lo largo de un año. Este tipo de errores es causado por una orientación imperfecta de los actuadores, o bien un error en el cálculo de la posición solar.

Los errores se pueden resolver individualmente para poder calcularse y corregirse si se obtienen las desviaciones para distintos ángulos de incidencia del Sol. A su vez, esto se logra al apuntar el foco a una cámara que determine y calcule la desviación del punto focal dado (Pfahl et al. 2017).

2.4.4 Deformaciones durante la operación.

Los principales causantes de las pérdidas ópticas son la gravedad y el viento (ver Figura 13), aunque se ha analizado las razones del bajo impacto que se tiene en las pérdidas ópticas de acuerdo a las cargas de viento. Se rescata que la cantidad de helióstatos que se ven afectados es limitada, siendo víctimas únicamente los que se encuentran en la sección del perímetro del campo de helióstatos; muy raramente el viento llega a sus velocidades máximas; las cargas de viento son mayores únicamente en ciertos ángulos de ataque; no hay pérdidas mayores en el receptor a causa del viento, debido a que el punto focal únicamente oscila alrededor de su mismo eje en posición media, lo que significa una mayor parte de energía solar incidente.

Cabe resaltar la necesidad de realizar diseños y estructuras que tengan la rigidez suficiente para reducir al máximo las causas de deformaciones durante la operación (Pfahl et al. 2017).

Por ejemplo en la Figura 13, el eje de elevación se ubica entre el tubo de torsión y los espejos para evitar colocar rodamientos enormes alrededor del tubo de torsión continuo y para reducir el brazo

de palanca que ejerce el peso de las facetas entorno a este eje de rotación.



Figura 13. Detalle de la ubicación del eje de elevación de un helióstato. (Pfahl 2013)

De acuerdo a todo lo anterior, en algunos diseños no hay un impacto significativo de las cargas de viento durante la operación del helióstato. Así mismo, es ventajosa la implementación de piezas que aportan un valor agregado al helióstato, como lo son resortes de pretensionado para disminuir impactos de reacción (ver Figura 14) (Pfahl et al. 2017).



Figura 14. Pretensionado del motor en eje azimutal. (Pfahl 2013)

2.4.5 Aberraciones

Las aberraciones en sistemas ópticos y en el caso particular de las facetas de los helióstatos, ocasionan una degradación de la imagen. Es común encontrarse con fuertes aberraciones astigmáticas en situaciones prácticas, éstas ocurren cada vez que la reflexión está fuera del eje óptico del helióstato.

Las aberraciones son distorsiones que provocan reducciones del flujo solar en el receptor, decaídas significativas de la concentración de la reflexión y una disminución de la eficiencia, esto debido al aumento del tamaño de la imagen del Sol en el receptor. Se generan de acuerdo al ángulo de incidencia de los rayos en el plano tangencial del helióstato (Igel and Hughes 1979).

De acuerdo a los distintos movimientos de seguimiento, de los cuales se destacan el de azimut-elevación y elevación-rotación, la corrección de la aberración es un proceso de control complejo y de elevado costo, debido a que cada espejo requiere un movimiento individual específico con dos grados de libertad en el caso de los helióstatos con configuración azimut-elevación, sin embargo con el seguimiento de elevación-rotación, los movimientos se pueden vincular con una pequeña cantidad de motores, pues los ángulos de corrección de las facetas están relacionados entre sí, como se ilustra en la Figura 15, proporcionando una simplificación significativa en la corrección de la aberración astigmática, gracias al reducido número de actuadores adicionales que se deben de

implementar (Chen et al. 2004).

Existen dos componentes de la aberración astigmática, la aberración astigmática de facetas individuales y la aberración residual a causa de una calibración imperfecta de la facetas para cada ángulo de incidencia de los rayos solares. La aberración residual es una de las causas de la reducción del rendimiento en las distintas clases de heliostato; sin embargo ésta se puede corregir ajustando continuamente las facetas (Chen et al. 2003).

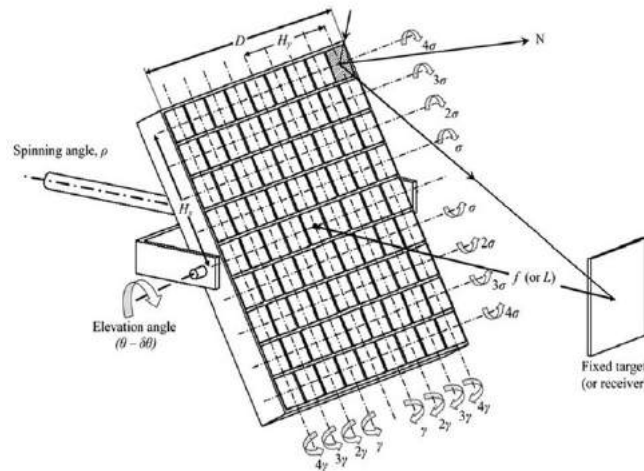


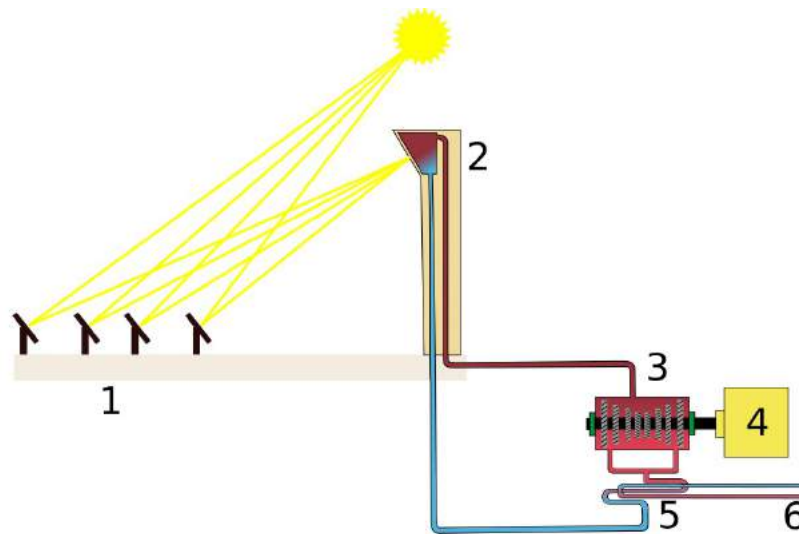
Figura 15. Heliostato de eje focal con alineación individual de las facetas. (Pfahl 2013)

2.5 Aplicaciones

2.5.1 Plantas Solares de Torre Central

Una planta solar de torre central consiste en un receptor en la parte alta de una torre, el cual está rodeado por un conjunto múltiple de heliostatos, siendo estos últimos los encargados de reflejar los rayos solares hacia el receptor (Ledesma-Jaime et al. 2016). Cabe destacar la necesidad de una gran precisión en el seguimiento solar, para que se lleve a cabo un mayor aprovechamiento de la energía solar incidente y para reducir las pérdidas del haz reflejado (Torres Roldán 2016).

La producción de energía como se observa en la Figura 16, se lleva a cabo cuando el receptor⁽²⁾ recibe la radiación solar reflejada por los heliostatos y la transforma a energía térmica elevando un fluido de trabajo a temperaturas entre 300-700 °C, que en el caso de las plantas generadoras de electricidades es el encargado de transferir el calor al vapor para generar electricidad a través de turbinas (Gwiazda and DiBella 2005). El fluido de trabajo también se usa para almacenar en tanques la energía térmica para posteriormente aprovecharla.



*Figura 16. Diagrama de una planta solar de torre central.
1. Helióstatos, 2. Receptor en Torre Central, 3. Turbina, 4. Generador, 5. Intercambiador de calor, 6. Entrada y salida de agua del tanque de almacenamiento.*

Otra aplicación de este tipo de torres es usar la energía térmica obtenida en procesos termoquímicos, como lo es la producción de combustibles sintéticos, la producción de cemento y la recuperación de petróleo; algunos ejemplos de actividades industriales que requieren altas temperaturas de trabajo.

Algunas de las ventajas que tienen estos sistemas solares de torre central es que la concentración solar llega a ser de 600 a 1000 soles, logrando temperaturas que oscilan en los 1000 °C. Esta disposición de los helióstatos para obtener elevadas temperaturas, permite un buen volumen de almacenamiento energético, así como una alta eficiencia en la producción de energía eléctrica por medio de turbinas de vapor (Sepúlveda and Matías 2013). Esto ha permitido tener plantas de solares de torre central que proporcionan entre 50-300 MW de potencia eléctrica (Richter, Teske, and Short 2009).

Parámetros importantes para el diseño del campo de helióstatos

Debido a la complejidad que trae consigo el diseño de una planta de torre solar, se han desarrollado desde inicio de 1970 modelos numéricos y programas para el análisis y diseño de estos campos. Este tipo de software permiten definir la cantidad y posición de helióstatos, así como la posición y tamaño del receptor de la torre. Lo anterior se logra al simular la energía solar concentrada con un modelo de la imagen proyectada del Sol y teniendo en cuenta:

- La luz solar reflejada resultante tras la absorción y dispersión como fenómenos naturales atmosféricos.
- Sombras en áreas totales o parciales de los espejos dadas por obstáculos, como lo pueden

ser otros helióstatos.

- La pérdida de la luz reflejada por errores en la precisión de la alineación heliostato-receptor.
- La merma de energía solar térmica al no tener un buen seguimiento solar en los heliostatos.
- Imágenes de luz solar reflejada sobredimensionadas.
- Reflexiones fuera de eje.
- Entre otros mecanismos básicos de pérdidas (Pfahl et al. 2017).

En la Figura 17 se visualiza la distribución del espacio de una planta solar en anillos y sectores, en un arreglo de 360° de cubrimiento. La letra T representa la ubicación de la torre central con su receptor. Las líneas rectas radiales están distribuidas cada 30° azimutales respecto al centro del campo.

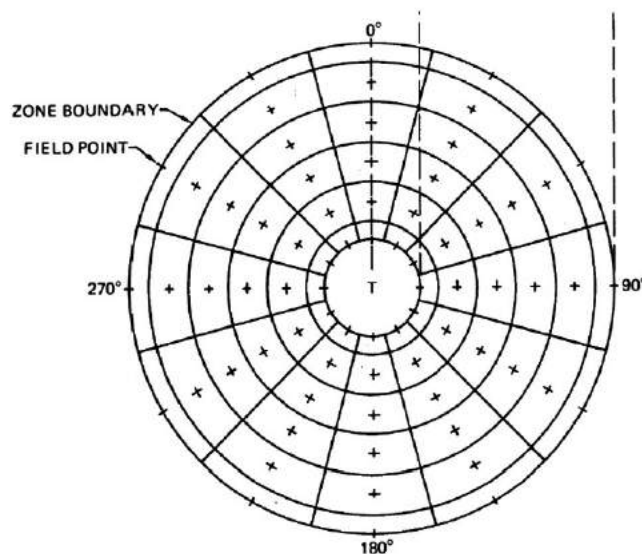


Figura 17: Subdivisión representativa del campo de helióstatos. (Kistler 1986)

2.5.2 Hornos Solares

Un horno solar se considera un como un sistema óptico que concentra la luz solar sobre sus superficies con el objetivo de llevar cuerpos a altas temperaturas. Se basa en una doble reflexión de la radiación solar en el punto focal.

Para una central de horno solar se requiere de un helióstato o un conjunto de ellos que reflejen los rayos solares en el disco parabólico que concentra los rayos en el foco, así como lo muestra el diagrama de la Figura 18, y con el uso de un concentrador parabólico estacionario se logran concentraciones de miles de soles debido a la reducida área de concentración.

Principalmente una central de horno solar se compone de un atenuador, que consiste en un conjunto de láminas horizontales que sirven para atenuar la cantidad de luz (como su nombre lo indica) al orientar las láminas en menor o mayor medida; el concentrador que cumple con el

objetivo de concentrar los rayos provenientes de los helióstatos con una forma paraboloide en conjunto de espejos; y el foco receptor, quizá el elemento más importante, ya que en él incide toda la concentración de radiación que depende de gran medida de la longitud focal (Hernández Martínez 2013).

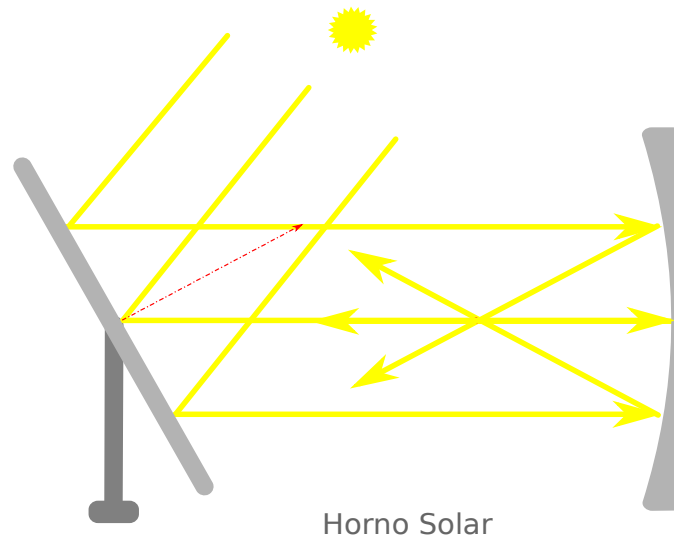


Figura 18. Diagrama simplificado de un horno solar.

2.6 Simulación mediante el Método de Elementos Finitos

Cuando se quiere predecir el cómo funcionará un objeto o producto ante efectos físicos del mundo real, se hace uso de un método de análisis conocido como método de los elementos finitos. Más concretamente permite reproducir virtualmente condiciones reales de trabajo de un único componente o de todo un sistema para ofrecer una validación y optimización de los mismos.

El análisis por medio del método de los elementos finitos (MEF, por sus siglas) consiste en la descomposición del objeto a definir en numerosas subdivisiones llamadas “elementos”. Todos los elementos se conectan por medio de puntos, y al conjunto de elementos y nodos se conoce como malla, donde cada nodo se evalúa individualmente.

Al lograr múltiples elementos de la geometría o del componente real también se logra a su vez la división del problema complejo, en problemas mas simples. Cabe destacar que conforme mayor sea la cantidad de nodos y de elementos pertenecientes a la malla, el tamaño y el tipo de elementos de los que se disponen, mayor será también la precisión del análisis.

Típicamente este método computarizado se puede desglosar en ciertos pasos:

1. La definición del modelo/geometría/componente/sistema que se desea evaluar, así como

los efectos físicos que influyen en él, conocido como pre-procesamiento.

2. Construcción del modelo de elementos finitos, en donde se aplica directamente el MEF.
3. La resolución del modelo de elementos finitos.
4. El post-procesamiento en donde se analizan los resultados obtenidos, usando herramientas que faciliten visualmente este trabajo creando gráficos.

Algunos de los efectos físicos que el MEF toma en cuenta en el momento del análisis son:

- Efectos de cargas (fuerzas, esfuerzos mecánicos, presiones, aceleraciones, fatigas, temperaturas, contacto entre componentes, vibraciones mecánicas, etc.)
- Comportamiento de fluidos
- Propagación de radiación electromagnética.
- Transferencia de calor
- Electrostática
- Moldeado por inyección de plástico

El uso del MEF trae consigo una gran serie de ventajas, como lo son:

- Predicción precisa del desempeño.
- Minimiza dependencia a los prototipos físicos.
- Disminuye gastos de construcción y prueba de los mismos prototipos físicos al no requerirlos.
- Permite el diseño de nuevos productos o de un re-diseño de unos ya existentes para validarlos antes de sacarlos al mercado.
- Verifica y optimiza el rendimiento, la fiabilidad y el uso de ciertos materiales sin empezar a manufacturar.

Generalmente el uso de MEF requiere de un profundo conocimiento físico-matemático y del dominio de ecuaciones diferenciales complejas que describen el comportamiento del componente a analizar. Por ello actualmente se disponen de herramientas como *software* y *hardware* adecuado para cumplir y simplificar esta tarea, y el usuario únicamente debe encargarse de tener acceso a estas herramientas computacionales, de poder manejar la interfaz y el programa para lograr

producir los resultado buscados (Rodríguez and Manuel 2010).

2.6.1 Validación del Diseño del Helióstato

Para llevar a cabo una correcta validación de un diseño propuesto de un helióstato, es crucial contar con un software que permita un estudio, análisis y simulación computarizada por el métodos de elementos finitos. Un ejemplo de este tipo de software es ANSYS, desarrollado por *ANSYS, Inc.* en la década de 1970.

Esta herramienta permite hacer simulaciones parametrizadas proporcionando un gran realismo al poder predecir el comportamiento y rendimiento de los diseños ya definidos ingresados. Así mismo se puede personalizar y automatizar todas sus simulaciones bajo un entorno real.

3 Diseño y Modelado CAD

3.1 Parámetros de diseño

Para iniciar el diseño de un helióstato es importante determinar las condiciones del entorno que tendrá el artefacto en el lugar de operación, así como los requisitos mínimos de concentración de radiación solar.

Para llevar a cabo el diseño del helióstato HORACIO se plantearon las siguientes especificaciones y condiciones de operación para brindar cierta flexibilidad del modelo en diferentes lugares de operación, no obstante es posible que este dispositivo no se adapte correctamente en zonas o sistemas donde las variables del entorno se encuentren fuera de los rangos listados a continuación.

3.1.1 Condiciones del entorno

Parámetro	Valor	Indicador de Límite
Aceleración gravitacional estándar	-9.8066 m/s ²	Máximo
Velocidad de viento (Operacional)	10 km/h	Máximo
Velocidad de viento (Supervivencia)	50 km/h	Máximo
Temperatura Ambiental	[-5°C ~ 40°C]	Rango

Tabla 3: Condiciones del entorno.

3.1.2 Requisitos de Concentración

Parámetro	Valor	Indicador de Límite
Radio del Receptor de radiación	1 m	Máximo
Factor de concentración solar (Pico)	7	Mínimo
Distancia al receptor Vertical	15 m	Mínimo
Distancia al receptor Horizontal	200 m	Máximo
Área de la superficie reflectante	9 m ²	Fijo

Tabla 4: Requisitos de concentración.

3.2 Selección del tipo de heliostato

Con base en los parámetros especificados en el capítulo anterior se realizó la selección del tipo de estructura del heliostato teniendo en cuenta la complejidad de fabricación en serie y el costo relativo a cada tipo.

3.2.1 *Heliostato tipo membrana*

Este tipo de heliostato tiene la ventaja de ser muy estable frente a ráfagas de viento debido a que éste se suele apoyar en tres o más puntos en una estructura de carrusel. También es uno de los tipos de heliostato con mejor calidad óptica y por ende un factor de concentración solar más alto respecto a los demás tipos de heliostatos.

No obstante, este tipo de heliostato requiere de un anillo rígido con un alto grado de nivelación para que toda superficie de apoyo sea totalmente plana y permita un desplazamiento uniforme de las ruedas que soportan la estructura del heliostato. Esto hace que sea más complejo de fabricar en serie y el costo de fabricación tiende a ser más alto por la geometría de la estructura que lo constituye y es por ello que se descartó este tipo de heliostato.

3.2.2 *Heliostato de eje focal*

Los heliostatos de eje focal forman parte de un tipo muy particular y no muy extendido a nivel comercial en las plantas solares que hay construidas hasta la fecha. Éstos se caracterizan por tener un eje de rotación que coincide con el receptor u objetivo del sistema y otro eje de rotación perpendicular a éste que determina el ángulo de elevación del heliostato. La ventaja de este tipo de heliostato es la simplificación del sistema de control y seguimiento solar debido a que el desplazamiento angular en ambos ejes es siempre la mitad del que tendría un seguidor solar que comparta los mismos ejes de rotación. Sin embargo, el balanceo estático del heliostato es más complejo que los otros tipos lo cual no es conveniente si se desea reducir costos de fabricación y de operación.

3.2.3 *Heliostato tipo T*

Éste tipo de heliostatos es sin duda el más empleado a nivel mundial para plantas solares de torre central y hornos solares. Su construcción es más simple que los dos tipos anteriores por su estructura en forma de T que permite orientar la plataforma que sostiene las facetas en dirección a cualquier punto de la semiesfera celeste mediante los movimientos de rotación azimutal sobre un eje paralelo al pedestal y de rotación alrededor de un eje horizontal ortogonal al anterior. Ésto facilita la fabricación del heliostato y por ende reduce su costo, su aplomo en el terreno es más cómodo que los heliostatos de membrana y permite realizar los cálculos de cinemática inversa con

ecuaciones de baja complejidad debido a la ortogonalidad de los dos ejes que conforman los dos grados de libertad de este mecanismo.

Para el helióstato HORACIO V se seleccionó una estructura tipo T por los beneficios mencionados anteriormente. A partir de esta decisión, se comenzaron a diseñar los componentes principales que se ilustran en la Figura 19.

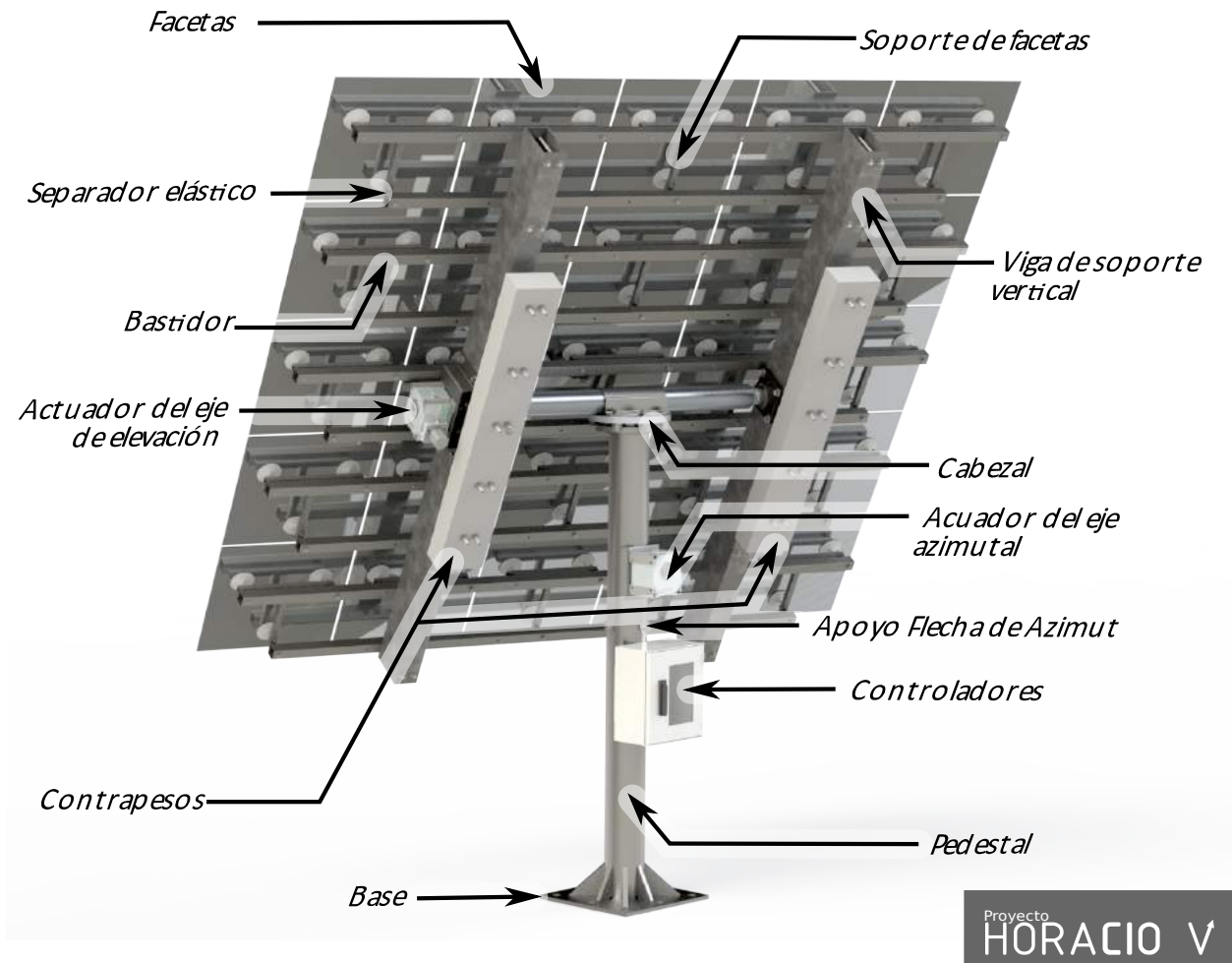


Figura 19. Principales componentes del helióstato HORACIO V.

3.3 Diseño de las facetas

Las facetas son el elemento más importante de un helióstato debido su función de reflejar la radiación solar, éstas son generalmente fabricadas con vidrio de diversas composiciones, por ejemplo, es común que las facetas estén conformadas por dos capas de vidrio con una película reflectante en medio de ellas; para la capa de vidrio que está expuesta al sol se suele utilizar un vidrio con bajo contenido de hierro y de reducido espesor para evitar la absorción de la radiación. La capa de vidrio opuesta se suele fabricar de un vidrio más económico y de mayor espesor ya que ésta cumple una función meramente estructural y de protección de la película.

La película reflectante se realiza con diferentes metales o aleaciones de éstos para brindar las propiedades de reflexión espectral deseados, los recubrimientos más comunes para aplicaciones de reflexión de radiación solar son: plata y aluminio.

En la Tabla 5 se puede visualizar el coeficiente de reflectancia especular normal de los conjuntos de elementos más comunes que componen las facetas de los helióstatos y, en general, muchos otros concentradores solares.

Superficie	ρ
Vidrio de baja reflectancia con plateado posterior	0.94
Plata electrochapada, nueva	0.96
Aluminio de alta pureza, nuevo y limpio	0.91
Reflector óptico con depósito de aluminio	0.89
Aluminio de alta pureza procesado en bruto	0.89
Vidrio blanco (Bajo en hierro) con plateado posterior, nuevo y limpio	0.88
Aluminio revestido con SiO ₂ , limpio	0.87
Papel de aluminio, con pureza del 99.5%	0.86
Acrílico 3M aluminizado, nuevo	0.86
Acrílico 3M aluminizado*	0.85
Aluminio comercial procesado Alzac	0.85
*Expuesto al equivalente de 1 año de radiación solar.	

Tabla 5. Reflectancia especular normal solar de diversas superficies (Duffie and Beckman 2013)

Las facetas del helióstato se diseñaron planas para facilitar la fabricación de estas y para compensar el factor de concentración deseado se definió un arreglo matricial cuadrado de 25 facetas de 600 mm x 600 mm que están conformadas por espejos laminados, y constan de una película reflectante en medio de ambas placas de vidrio.

El material seleccionado para la capa de vidrio que está expuesta a la radiación solar es vidrio con bajo contenido de hierro denominado comercialmente como vidrio blanco producido mediante el método de flotación para evitar al máximo ondulaciones en su superficie que puedan alterar la trayectoria de los rayos solares, esta capa debe de tener un espesor de 1.5 mm, para evitar que parte de la radiación solar incidente y reflejada que se transmiten a través de ella, sea absorbida por el material.

Una película delgada de aluminio permite reflejar esa radiación y debe de ser colocada en medio de la capa de vidrio anterior, y de una capa de vidrio de mayor espesor, 3.5 mm, con una composición más comercial que es el vidrio plano arquitectónico, debido a que éste solo cumple la función de dar soporte y rigidez a la faceta, y proteger el recubrimiento reflectante.

Se recomienda biselar los bordes de las facetas para facilitar la manipulación de éstas y disminuir el riesgo de accidentes así como la limpieza del helióstato.

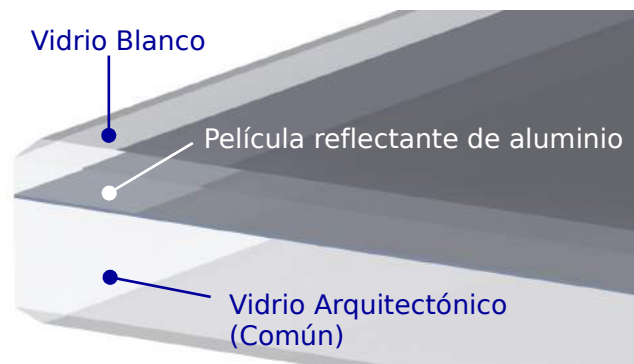


Figura 20. Estructura de conformación de los espejos.

3.4 Diseño del soporte de las facetas

Para sujetar las facetas se diseñó una estructura metálica en forma de Te con perfiles cuadrados de acero galvanizado en caliente y con espesor de $\frac{1}{8}$ de pulgada (Figura 21). Éste permite fijar la faceta al bastidor del helióstato y mantener la forma plana del espejo.

El soporte cuenta con tres ventosas de silicona de alta resistencia térmica y a las condiciones de la intemperie, éstas están fijadas a la cara posterior de la faceta mediante un silicona adhesiva resistente a la intemperie. Un perno de acero con diámetro nominal de $\frac{1}{4}$ de pulgada cuya cabeza se encuentra en el interior de la ventosa conecta cada a una de ellas con el soporte mediante un sistema de doble tuerca que permite ajustar la distancia ente la faceta y la estructura metálica. Las ventosas están ubicadas uniformemente formando un triángulo equilátero cuyo baricentro coincide con el baricentro del espejo, con el fin de distribuir la carga de la faceta de manera equitativa en los tres puntos de apoyo como se ilustra en la Figura 22.

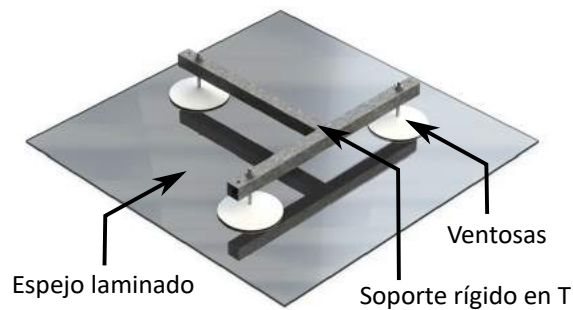


Figura 21. Faceta con soporte.

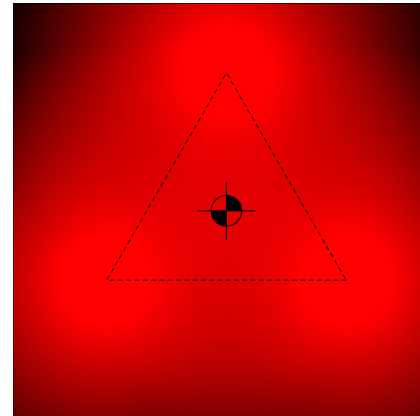


Figura 22. Distribución de las ventosas en la faceta.

3.5 Diseño del bastidor

El bastidor que soporta el arreglo de las 25 facetas está constituido por cinco módulos horizontales compuestos por dos perfiles cuadrados de acero galvanizado y de $\frac{1}{8}$ de pulgada de espesor, que sostienen hileras de cinco facetas por módulo, dos soportes verticales de perfil rectangular de acero galvanizado sostienen los módulos y le dan rigidez a la estructura, así como se aprecia en la Figura 23.

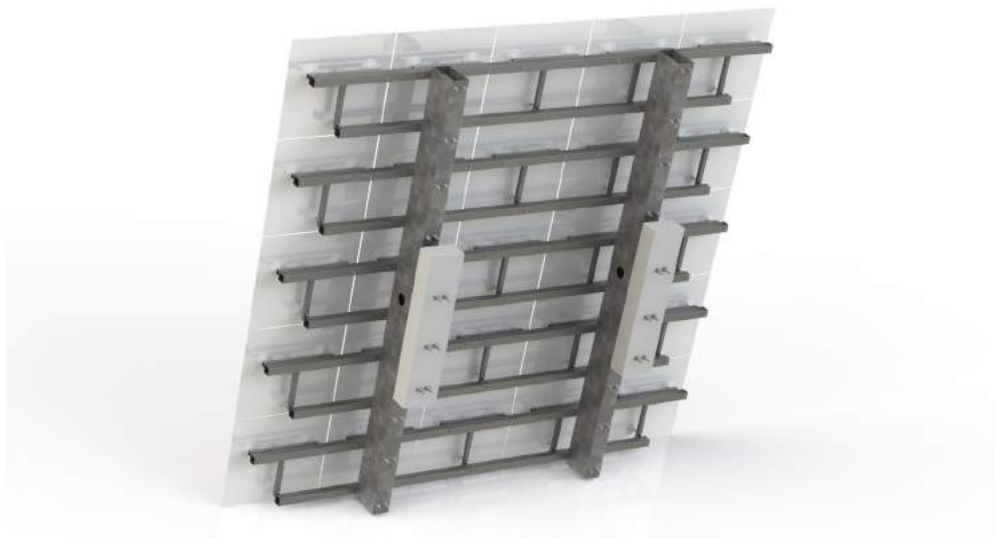


Figura 23. Vista posterior del bastidor ensamblado.

Las uniones entre los perfiles de los módulos horizontales y las facetas, se llevan a cabo mediante tornillos de acero galvanizado y un separador elástico de neopreno, como se ilustra en la Figura 24, que permite ajustar el ángulo de cada faceta para darle la distancia focal requerida al

helióstato.



Figura 24. Detalle fijación de facetas.

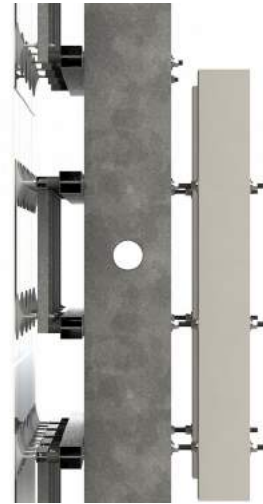


Figura 25. Eje de rotación del bastidor.

Los módulos se fijan a los cada uno de los dos soportes verticales mediante diez pares de ejes roscados pasantes de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro nominal.

El centro de rotación para el movimiento de elevación del helióstato se ubicó sobre el eje principal de los perfiles verticales a la altura del centroide de toda la superficie reflectante (Figura 25), con el objetivo de anular los momentos de torsión sobre el eje horizontal provocados por corrientes de viento de flujo laminar que colisionen contra la superficie del helióstato.

3.5.1 Balanceo estático en el eje de elevación

Como el eje anteriormente mencionado no coincide con el centro de masa del bastidor, se diseñaron dos contrapesos de concreto con alma de acero sujetados con seis pares de los mismos ejes roscados que unen los módulos con los soportes verticales como se muestra en la Figura 25.

Para desplazar el centro de masa del bastidor hacia su centro de rotación se planteó un sistema de ecuaciones que permitió calcular las coordenadas de los dos contrapesos. El proceso se hizo de forma recurrente mientras se cambiaba en cada iteración la longitud de los contrapesos.

Inicialmente se estipuló el ancho máximo (x) de los bloques para evitar que las sujeciones lo convirtieran en un elemento con poca rigidez, también se definió el espesor de éstos (y) (ver Tabla 6), de tal forma que se limitara la longitud de los pernos de sujeción ya que éstos no deben ser demasiado largos por la flexibilidad del acero y las vibraciones que podría generar la sujeción de una significativa masa al operar el helióstato.

Elemento	Dimensiones			Agujeros					ρ Densidad (g/mm ³)
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Cantidad	Diámetro (mm)	Separación PSH* (mm)	Separación Facetas (mm)	Lado de la Faceta (mm)	
Contrapeso de Concreto Izquierdo	200	1500	120	8	21.3	322.9	10	600	2.40E-03
Contrapeso de Concreto Derecho	200	1500	120	8	21.3	322.9	10	600	2.40E-03
* PSH: Perfiles de Soporte Horizontales (Bastidor)									

Tabla 6. Propiedades físicas de los contrapesos.

El cálculo del nuevo centro de masa del bastidor a partir de los centros de masa de los tres componentes principales se muestra la Tabla 7, donde se puede apreciar que el nuevo centro de masa coincide con el origen del sistema de referencia que fue ubicado intencionalmente en la intersección de los ejes de rotación vertical y horizontal.

Elemento	Centro de Masa				R(mm)
	Magnitud (g)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	
Bastidor Completo	320,189.43	0	-32.91	116.64	121.19
Contrapeso de Concreto Izquierdo	85,579.02	709.3	61.57	-218.2	744.65
Contrapeso de Concreto Derecho	85,579.02	-709.3	61.57	-218.2	744.65
Total	491,347.47	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 7. Centros de masa de los elementos del bastidor. (Balanceado)

Es importante tener en cuenta que una vez ubicado el contrapeso a la distancia adecuada para el balanceo estático del bastidor se debe fijar mediante doble tuerca con arandelas comunes tipo A y de seguridad los seis eje que atraviesan a cada bloque de concreto. Esto con el fin de evitar que los contrapesos se muevan mientras el helióstato esté operando y generen alguna distorsión del haz.

3.6 Diseño del eje torsor

El eje torsor tiene dos funciones básicas, una de ellas es consolidar la estructura del bastidor y la otra es transmitirle el movimiento de elevación al helióstato. En el presente modelo de helióstato se ha decidido dejar el eje torsor fijo para garantizar su rigidez, colocando entonces la articulación en los extremos de éste, donde se acopla al bastidor. De esta forma se obtiene más estabilidad, debido a que los puntos de contacto están mucho más separados entre sí.

Este componente está conformado por dos tubos concéntricos de acero estructural. Uno de ellos, el interno, de dos pulgadas de diámetro nominal y el externo de cuatro. Se conectan el los extremos mediante *flanges* de deslizamiento simples (*slip-on*) acero mecanizados para acoplarse al interior del tubo externo y adherido a éste mediante soldadura sintética (Loctite EA 9480) ya que ésta permite un ajuste más preciso mientras se endurece y en caso de remplazar alguna pieza se puede despegar sometiendo a una temperatura de 200 °C.

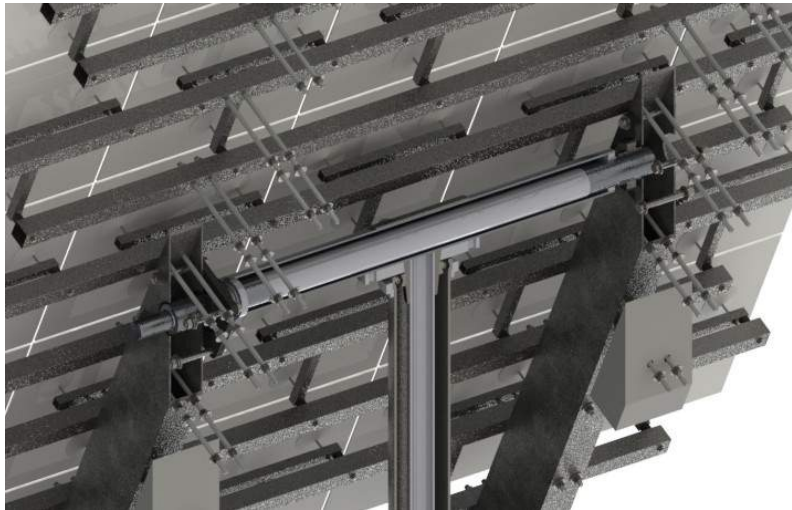


Figura 26. Vista en corte del eje torsor.

3.7 Diseño del cabezal

En el helióstato HORACIO V, se presenta el diseño de un novedoso tipo de cabezal (Figura 27) que, a diferencia de la mayoría, no requiere fundición de la pieza lo cual permite mayor flexibilidad en el destino geográfico debido a su composición de materiales comerciales que, no solo disminuyen el costo de fabricación sino que lo hacen más liviano para evitar un exceso en los rubros del transporte de las piezas hacia el destino final del helióstato. Este componente le brinda al helióstato la posibilidad de girar en torno a un eje vertical que orienta el bastidor en el ángulo azimutal adecuado para la reflexión de la radiación solar. En la Figura 28 se puede apreciar una vista en corte del cabezal, en la cual se ilustra uno de los dos rodamientos de bolas que, en conjunto, le permiten al bastidor rotar en azimut de forma estable y sin oscilaciones laterales.



Figura 27. Cabezal (Vista en isométrico)



Figura 28. Cabezal (Vista lateral en corte).

Como se muestra en la Figura 27, el método utilizado para fijar el tubo torsor al cabezal, es mediante una lámina de acero con forma de túnel que está fijada por medio de sus alas agujeradas a la brida que sostiene la espiga de rotación azimuthal. Dos perfiles de acero en ángulo recto refuerzan la conexión y distribuyen el esfuerzo a lo largo de los pliegues de dicha lámina.

3.8 Diseño del pedestal

El pedestal es un elemento de los helióstatos tipo T que juega un papel muy importante en la estabilidad del sistema concentrador, y en este caso, es concéntrico con el eje de rotación azimuthal.

Está diseñado a partir de tubería estructural de cédula 40 de 6 pulgadas de diámetro nominal y de material acero A500, extendiéndose desde la base hasta la conexión con el cabezal con una longitud de 2143 mm. Éste se encuentra soldado a la base mediante ocho nervios de lámina de acero con espesor de $\frac{3}{4}$ de pulgada, lo cual le brinda solidez a la estructura.

A media altura del pedestal se encuentra un sistema de anclaje de 4 pernos para fijar el rodamiento inferior del cabezal, ubicado en el extremo de una espiga de dos pulgadas de diámetro nominal que gira dentro del pedestal y le da soporte al bastidor para enfrentar fuerzas externas ejercidas por el viento (Figura 29 y 30).

En el extremo superior del pedestal se puede apreciar la brida que lo conecta al sistema de rotación del cabezal, esta brida lleva está soldada al tubo de acero y tiene un mecanizado sencillo en torno para permitir el acoplamiento del rodamiento superior del movimiento azimuthal, como se logra apreciar en la parte inferior de la Figura 28.



Figura 29. Sistema de fijación del rodamiento inferior del cabezal. (Vista en isométrico)



Figura 30. Sistema de fijación del rodamiento inferior del cabezal. (Vista en corte)

La base del pedestal se anclará a un cimiento de zapata aislada con una base de $1.5 \times 1.5 \times 1.0^1$ metros (largo x ancho x profundidad) el cual le brindará la solidez necesaria a la estructura que está anclada mediante una placa base cuadrada de 700 mm de lado con ocho perforaciones para pernos de 1 pulgada, los cuales permitirán ajustar la inclinación del pedestal (aplomo), por medio de dobles tuercas, para alinear el eje de rotación azimuthal con el centro de la Tierra.

3.9 Selección de rodamientos

Para garantizar un movimiento fluido del bastidor tanto en torno al eje azimuthal como en el eje de elevación, se emplearon en el diseño dos pares de rodamientos separados distancias considerables para reducir al máximo la desviación del eje de rotación inherente a la tolerancia que hay entre las esferas del rodamiento y las pistas.

3.9.1 Eje Vertical

Los dos rodamientos del eje vertical deben soportar el peso de todo el bastidor, los contrapesos y el eje torsor. Deben también definir el eje de rotación azimuthal reduciendo al máximo la fuerza de fricción en la rotación del eje para optimizar el consumo de energía.

Para suplir esta labor se adaptaron dos rodamientos de bolas de pista sencilla, con las siguientes características:

- Se seleccionó un rodamiento 6220-2Z para el anclaje superior del eje vertical, ubicado en el

¹ Las dimensiones del cimiento pueden variar según las condiciones geológicas del suelo objetivo. Por lo cual se debe realizar un estudio previo de la resistencia del suelo donde se va a ubicar el helióstato para garantizar la estabilidad de éste en el tiempo.

interior del cabezal. Las dimensiones de éste se pueden apreciar en la Figura 31 y en la Tabla 8.

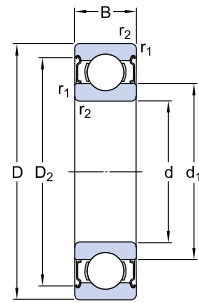


Figura 31. Dibujo acotado del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a)(SKF Group 2017a)

Cota		Longitud	
d	=	100	mm
D	=	180	mm
B	=	34	mm
d ₁	≈	124.8	mm
D ₂	≈	159.9	mm
r _{1,2}	mín.	2.1	mm

Tabla 8: Dimensiones del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a)

Como el rodamiento seleccionado es rígido de bolas, su geometría permite soportar cargas radiales y axiales a la vez, sin embargo éste tipo de rodamiento soporta una carga radial mucho mayor que la que puede soportar axialmente. No obstante la magnitud de carga axial que soportará está por debajo de los límites establecidos en la Tabla 9.

Propiedad	Variable	Magnitud	Unidades
Capacidad de carga dinámica básica	C	127	kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	93	kN
Carga límite de fatiga	P _u	3.35	kN
Velocidad de referencia		7500	r/min
Velocidad límite		3800	r/min
Factor de cálculo	k _r	0.025	N/A
Factor de cálculo	f ₀	14.4	N/A

Tabla 9. Propiedades mecánicas del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a)

El rodamiento superior del par de cojinetes que definen el eje azimutal del helióstato soportará la totalidad del peso de los componentes del helióstato exceptuando el pedestal, lo cual equivale a una fuerza de aproximadamente 54 kN ejercida por una masa total de 550 kg.

La fuerza axial (F_a) máxima para este rodamiento debe satisfacer la Ecuación 1.

$$F_a \leq 0,5 C_0 \quad \text{Ecuación 1. (SKF Group 2016)}$$

Para el eje azimutal la fuerza axial $F_{a(A)}$ está dada por la ecuación:

$$F_{a(A)} = m_{BCT} \cdot g_{Std}$$

Donde m_{BCT} es la masa del conjunto de elementos conformados por el bastidor del heliostato, los contrapesos, el eje tursor y el cabezal; y g_{Std} la aceleración gravitacional estándar.

Por lo tanto se obtiene que:

$$F_{a(A)} = (550.23_{[kg]}) \cdot (9.8066_{\left[\frac{m}{s^2}\right]})$$

$$F_{a(A)} = 5395.89_{[N]}$$

Y para $C_0 = 93000_{[N]}$ resulta:

$$F_{a(A)} \stackrel{?}{\leq} 0.5 \cdot C_0$$

$$5395.89_{[N]} \stackrel{(Satisface)}{\leq} 46500_{[N]}$$

De tal forma obtenemos un factor de seguridad (F_s) sobre el máximo recomendado por el fabricante de:

$$F_s = \frac{46500.00_{[N]}}{5395.89_{[N]}} = 8.62$$

El anterior factor permite tener un rango de tolerancia alto para prolongar la vida útil de los elementos rotativos, reducir el costo de mantenimiento y soportar cargas axiales extra ocasionadas por el viento o precipitaciones pluviales.

En la Figura 32 se puede apreciar la ubicación y el ensamblaje del rodamiento anteriormente calculado.

Éste se encuentra apoyado sobre una brida estándar con un mecanizado para el acople de la pista exterior del cojinete y anclado a la pista interior, un cono de acero le permite sostener el cabezal del heliostato y brindarle la articulación necesaria para el movimiento de rotación azimutal.



Figura 32. Cabezal vista en corte (rodamiento 6220-2Z)

Teniendo en cuenta únicamente la fuerza ejercida por el peso propio de la estructura del helióstato, se obtiene un valor de F_a resultante del cálculo que se muestra a continuación:

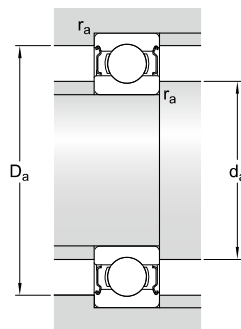


Figura 33. Dibujo acotado de los resaltes del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a)
(SKF Group 2017a)

Cota		Longitud	
d_a	mín.	112	mm
d_a	máx.	124	mm
D_a	máx.	168	mm
r_a	máx.	2	mm

Tabla 10: Dimensiones de los resaltes del rodamiento 6220-2Z. (SKF Group 2017a)

- Se seleccionó un rodamiento 6214 (Figura 29 y 30) para el anclaje inferior del eje vertical, ubicado en el interior del pedestal a media altura. Las dimensiones de este rodamiento se pueden apreciar en la Figura 34 y en la Tabla 11.

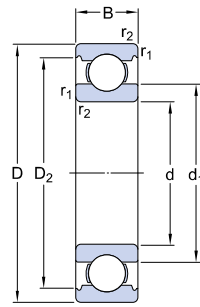


Figura 34. Dibujo acotado del rodamiento 6214. (SKF Group 2017b)

Cota		Longitud	
d	=	70	mm
D	=	125	mm
B	=	24	mm
d ₁	≈	87.05	mm
D ₂	≈	111	mm
r _{1,2}	mín.	1.5	mm

Tabla 11: Dimensiones del rodamiento 6214. (SKF Group 2017b)

Este rodamiento está ubicado en una configuración donde no soportará cargas axiales como el anteriormente mostrado, ya que éste cumple el papel de soportar los momentos flectores del eje vertical para guiar y mantener alineado el eje de rotación azimuthal en todo momento. La carga radial que soportará dependerá casi exclusivamente de las fuerzas externas al helióstato, provocadas por el efecto del viento sobre el bastidor.

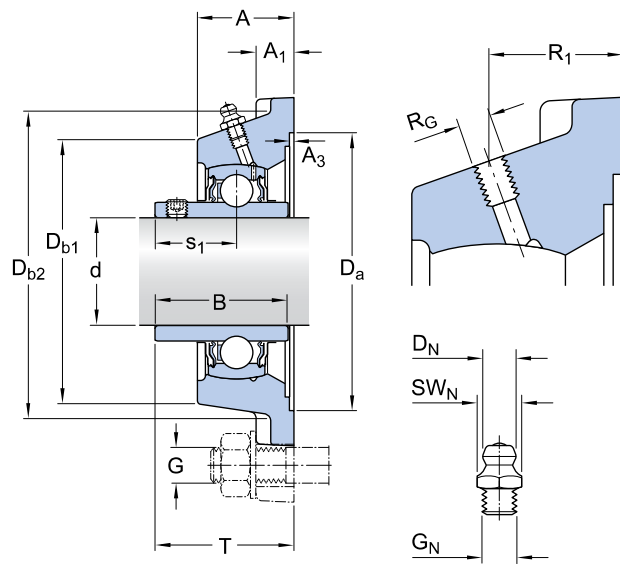
Debido a la separación de 900 mm a lo largo del eje vertical, entre el par de rodamientos que soportan la flecha, la carga radial sobre el elemento inferior es significativamente menor que la capacidad de carga estática del rodamiento, $C_0=45 \text{ kN}$ (SKF Group 2017b), por lo que no es crítico realizar un análisis especial para determinar su factor de servicio.

3.9.2 Eje Horizontal

Los dos rodamientos del eje torsor deben soportar el peso del bastidor y los contrapesos. Deben también definir el eje de rotación de elevación, reduciendo al máximo la fuerza de fricción en la rotación del bastidor alrededor del eje para optimizar el consumo de energía.

Para suplir esta labor se adaptaron dos rodamientos rígidos de bolas de una pista, con las siguientes características:

- Se seleccionó un par de rodamientos FYJ 70 TF para la articulación del bastidor sobre el eje torsor, ubicados en los extremos de éste. Las dimensiones y geometría de éstos se pueden apreciar en la Figura 35 y en la Tabla 12.



Cota		Longitud
d	=	70 mm
A	=	50.5 mm
A ₁	=	21 mm
A ₃	H14	3.2 mm
B	=	69.9 mm
D _a	H11	161.9 mm
D _{b1}	=	149 mm
D _{b2}	=	163 mm
J	=	152 mm
L	=	193 mm
N	=	19 mm
s ₁	=	39.7 mm
T	=	70.7 mm

Figura 35. Dibujo acotado del rodamiento FYJ 70 TF. (SKF Group 2017c)

Tabla 12: Dimensiones del rodamiento FYJ 70 TF. (SKF Group 2017c)

Como el rodamiento seleccionado es tipo Y de bolas, su diseño permite soportar cargas radiales y axiales a la vez, aunque soporta una carga radial relativamente mayor. Sin embargo, la magnitud de carga axial que soportará es mínima, ya que toda la fuerza ejercida por el peso del bastidor y sus contrapesos se aplica radialmente y se distribuye equitativamente entre los dos puntos de apoyo que están separados una distancia de 1200 mm, ubicados en los extremos el eje torsor.

Propiedad	Variable	Magnitud	Unidades
Capacidad de carga dinámica básica	C	62.4	kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	45	kN
Carga límite de fatiga	P _u	1.86	kN
Velocidad límite		2800	r/min

Tabla 13. Propiedades mecánicas del rodamiento FYJ 70 TF. (SKF Group 2017c)

Para este caso la fuerza aplicada es prácticamente radial pura (F_r) y por ende se hará el cálculo de factor de seguridad con la Ecuación 2, ya que esta aplica para los casos donde:

$$\frac{F_a}{F_r} \leq 0,19$$

La carga estática equivalente (P) es igual a la fuerza radial (F_r), así que:

$$P = F_r \leq C_0 \quad \text{Ecuación 2. (SKF Group 2016)}$$

La fuerza provocada por el peso el bastidor más los contrapesos, se distribuye entre los dos rodamientos laterales , lo cual implica que la la fuerza radial de los rodamientos del eje de elevación, $F_{r(E)}$, se defina con la ecuación:

$$F_{r(E)} = \frac{m_{BC} \cdot g_{Std}}{2}$$

Donde, m_{BC} es la masa del conjunto de elementos conformados por el bastidor del helióstato, y los contrapesos y g_{Std} es la aceleración gravitacional estándar.

Por lo tanto se obtiene que:

$$F_{r(E)} = \frac{(520.96_{[kg]}) \cdot (9.8066_{\left[\frac{m}{s^2}\right]})}{2}$$

$$F_{a(A)} = 2554.42_{[N]}$$

Como se muestra en la Tabla 13, $C_0 = 45000_{[N]}$, por lo cual resulta que:

$$F_{r(E)} \stackrel{?}{\leq} 0.5 \cdot C_0$$

$$2554.42_{[N]} \stackrel{(Satisface)}{\leq} 45000_{[N]}$$

De tal forma obtenemos un factor de seguridad (F_s) sobre el máximo recomendado por el fabricante de:

$$F_s = \frac{45000_{[N]}}{2554.42_{[N]}} = 17.61$$

El anterior factor permite tener un rango de tolerancia alto para prolongar la vida útil de los elementos rotativos, reducir el costo de mantenimiento y soportar cargas axiales extra ocasionadas por el viento o precipitaciones pluviales.

En la Figura 36 se ilustra uno de los rodamientos FYJ 70 TF, acoplado al perfil de soporte vertical mediante cuatro pernos de ½ pulgada de diámetro nominal y 5 pulgadas de longitud. En la pista interior se encuentra el eje que le transmitirá el movimiento al bastidor, quedándose estático mientras la estructura gira alrededor de éste, en conjunto con las chumaceras y rodamientos del eje horizontal de elevación.



Figura 36. Rodamiento del eje de elevación acoplado al bastidor. (Vista en corte del soporte vertical)

3.10 Selección de los actuadores

Para brindarle al heliostato la motricidad y precisión que caracteriza a este tipo de artefactos, se realizó un análisis de las propiedades físicas cinemáticas del sistema, para seleccionar un conjunto de actuadores y transmisión mecánica que permita dominar los dos grados de libertad (azimut y elevación) que tiene el heliostato HORACIO V.

3.10.1 Sistema de transmisión azimutal

El movimiento azimutal del heliostato permite la rotación del cabezal de heliostato alrededor de un eje vertical, y a su vez al conjunto de componentes conformado por el bastidor, los contrapesos y el eje torsor.

Para lograr la rotación de dicho conjunto de elementos, se debe aplicar un momento torsor alrededor del eje, suficiente para vencer la inercia y la fricción de este subsistema (ver componentes del subsistema sombreados en azul en la Figura 37). Para ello se requiere calcular el momento de inercia sobre el eje de rotación.

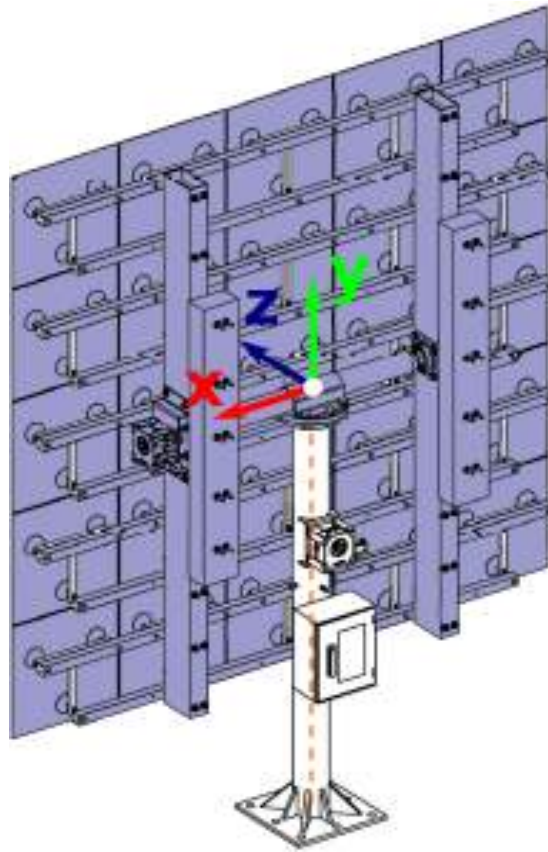


Figura 37. Componentes del subsistema de rotación azimutal.

En el software diseño asistido por computadora, *SolidWorks* se realizaron los cálculos de momentos de inercia de las partes móviles del helióstato, ubicando un sistema coordenado auxiliar en la intersección de los ejes azimutal y de elevación y con los ejes x, y, z paralelos a los respectivos ejes del sistema de referencia global. Adicionalmente se posicionó el bastidor del helióstato de forma que el vector normal principal de la superficie reflectante estuviese paralelo al eje z del sistema de ambos sistemas de referencia, esto con el fin de simplificar los cálculos.

A continuación se presenta la matriz de momentos de inercia del conjunto móvil azimutal, obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas auxiliar.

$$I_{o'} = \begin{bmatrix} I_{xx} = 290109973.83 & I_{xy} = -119434.32 & I_{xz} = -223617.68 \\ I_{yx} = -119434.32 & I_{yy} = 325753300.45 & I_{yz} = -2471818.52 \\ I_{zx} = -223617.68 & I_{zy} = -2471818.52 & I_{zz} = 579117353.00 \end{bmatrix} [kg \cdot mm^2]$$

Para determinar el momento de inercia del conjunto en torno al eje de rotación azimutal, se define el eje azimutal mediante un vector unitario:

$$u_{\Delta} = \cos \alpha i + \cos \beta j + \cos \gamma k$$

Ecuación 3
(Marghitu and Dupac 2012)

Donde $\cos \alpha$, $\cos \beta$ y $\cos \gamma$ son los cosenos directores del vector.

Por lo tanto, el vector unitario para el eje azimutal es:

$$u_{\Delta} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)i + \cos(0)j + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)k$$

$$u_{\Delta} = j$$

Ahora se sustituyen los valores de los cosenos directores calculados en el paso anterior en la ecuación de traslación de referencia para obtener el momento de inercia del sistema en el eje azimutal:

$$I_{\Delta} = I_{xx} \cos^2 \alpha + I_{yy} \cos^2 \beta + I_{zz} \cos^2 \gamma - 2I_{xy} \cos \alpha \cos \beta - 2I_{yz} \cos \beta \cos \gamma - 2I_{zx} \cos \gamma \cos \alpha.$$

Ecuación 4. (Marghitu and Dupac 2012)

Para este caso se obtiene finalmente que:

$$I_{\Delta} = 325753300.45_{[kg \cdot mm^2]} \approx 325.75_{[kg \cdot m^2]}$$

Teniendo la cantidad de momento de inercia del conjunto móvil alrededor del eje azimutal, se procede a calcular el torque necesario para girar el subsistema a partir de la determinación de una aceleración angular que permita el movimiento fluido del helióstato.

Se requiere que el helióstato pueda girar en el eje azimutal a una velocidad angular alrededor de los $10^\circ/s$ (1.67 rpm) para el modo de acomodación rápida, este valor es arbitrario y fue determinado para lograr un desplazamiento de $\frac{1}{4}$ de giro (90°) en 10 segundos, suponiendo una rampa de aceleración angular lineal de $0^\circ/s$ a $10^\circ/s$ en 1 segundo, y otra similar en el frenado de $10^\circ/s$ a $0^\circ/s$ como se muestra en la gráfica de la Figura 38. Todo esto con el fin de orientar el helióstato oportunamente en su posición de seguridad.

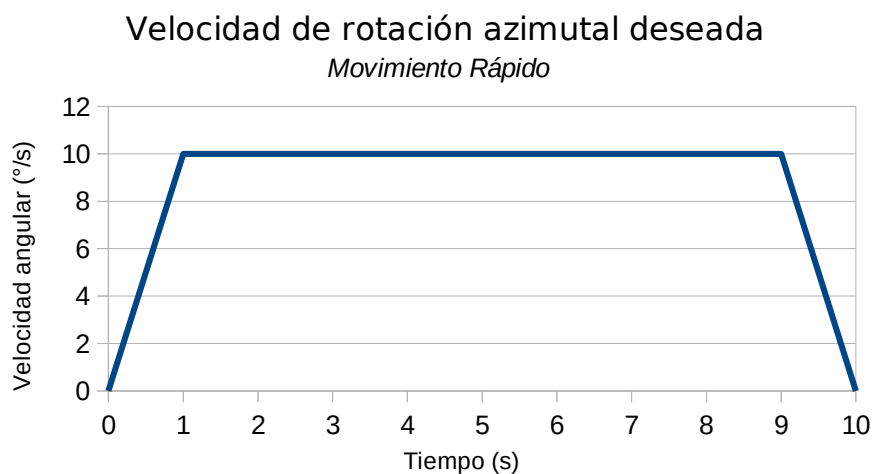


Figura 38. Rampa de aceleración movimiento azimutal rápido.

Partiendo de la aceleración angular teórica (ideal) de la gráfica anterior, se puede obtener el

torque necesario para efectuar dicha operación.

El torque necesario para mover el subsistema azimutal es:

$$\tau_{req} = I \Delta \cdot \alpha_{teórico}$$

$$\tau_{req} = 325.75_{[kg \cdot m^2]} \cdot \left(\frac{10_{[^\circ/s]} - 0_{[^\circ/s]}}{1_{[s]}} \cdot \frac{2\pi_{[rad]}}{360^\circ} \right)$$

$$\tau_{req} = 77.52_{[Nm]}$$

Ahora que se obtuvo el torque requerido para los movimientos más rápidos del subsistema azimutal, se debe considerar adicionalmente la resolución necesaria para tener una proyección relativamente precisa en el receptor.

Como se definió inicialmente en la sección de Requisitos de Concentración, hay una línea de visión entre el helióstato y el receptor de 100 metros horizontales por 15 metros verticales, lo cual produce una hipotenusa de 101.12 metros. Distancia a la cual se proyectará el sol con una tolerancia de ± 0.15 metros alrededor del punto objetivo. Lo cual implica una tolerancia de $\pm 0^\circ 5' 6''$ aproximadamente en la desviación del vector del rayo principal reflejado por el helióstato.

Esto implica que la orientación del eje óptico del helióstato se debe realizar con el doble de la precisión, $\pm 0^\circ 2' 33''$ debido a que el ángulo reflejado se desvía dos veces la cantidad que la normal de la superficie reflectante se desvía, tal como se ilustra en la Figura 39, donde α es el ángulo de incidencia y de reflexión de un rayo reflejado en un espejo ubicado inicialmente en posición horizontal y β es el ángulo de inclinación del espejo en un experimento posterior.

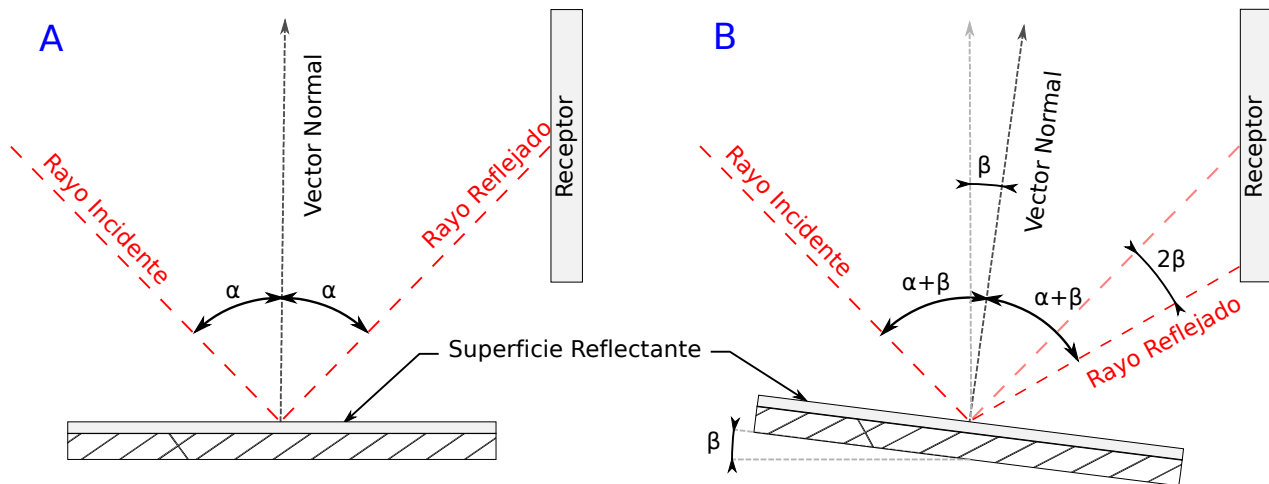


Figura 39. Desviación angular de rayos en superficies reflectantes.

A: Reflexión de un rayo con el espejo en posición inicial.

B: Reflexión de un rayo con el espejo inclinado un ángulo β .

Con la anterior observación y los cálculos del torque necesario para girar el subsistema azimuthal alrededor de su eje, se propuso el siguiente sistema de transmisión de movimiento (Tabla 14).

Pieza	Descripción	Torque (Nm)	Velocidad Angular (rpm)	Velocidad Angular (°/s)	Relación (X:1)	Desplazamiento angular (°)
Motor	NEMA 23 – 3A – 2.5Nm	2*	300	1800	1	01°48'00"
Reductor	Caja Reductora Sinfín-Corona	104	5.77	34.62	52	00°02'05"
Transmisión	Engranaje Cónico Angular	264	2.27	13.64	2.54	00°00'49"

*Se considera reducción de torque debida a la velocidad del motor según la tabla que se adjunta en el anexo 7.3 pág. 89.

Tabla 14. Cálculos de cada etapa de la transmisión azimuthal.

Como se aprecia en la última fila de la Tabla 14, al final del sistema motriz azimuthal se tiene un desplazamiento por paso del motor de 49 segundos (ángulo) y un torque de 264 Nm que satisfacen completamente la resolución del movimiento de 2 minutos con 33 segundos y el torque requerido de 77.52 Nm, sin embargo el valor del torque calculado es un valor ideal que no debe ser comparado directamente con los requerimientos sin antes multiplicarlo por la eficiencia de cada mecanismo reductor utilizado, en este caso será la Caja Reductora Sinfín-Corona y el Engranaje Cónico cuyas eficiencias pueden oscilar entre 40% a 85% y entre 98% a 99% respectivamente (Norton 2009), aunque comercialmente se dispone de cajas de transmisión mucho más cercanas a los límites superiores de dichos rangos. Por lo que se tomó un valor intermedio de cada rango para determinar, de una manera un poco más conservadora, el torque real que se podrá obtener con esta transmisión mecánica.

$$\tau_{est} = \tau_{req} \cdot Ef_{SC} \cdot Ef_{EC} = (264_{[Nm]}) (0.60) (0.98) = 155.23_{[Nm]}$$

A partir del resultado obtenido, se calcula el factor de diseño final del sistema:

$$F_D = \frac{155.23_{[Nm]}}{77.52_{[Nm]}} = 2.00$$

Este factor de diseño permite que el heliostato pueda operar de manera fluida y adecuada, con un 100% de fuerza extra para enfrentar alguna perturbación externa que se presente durante su funcionamiento.

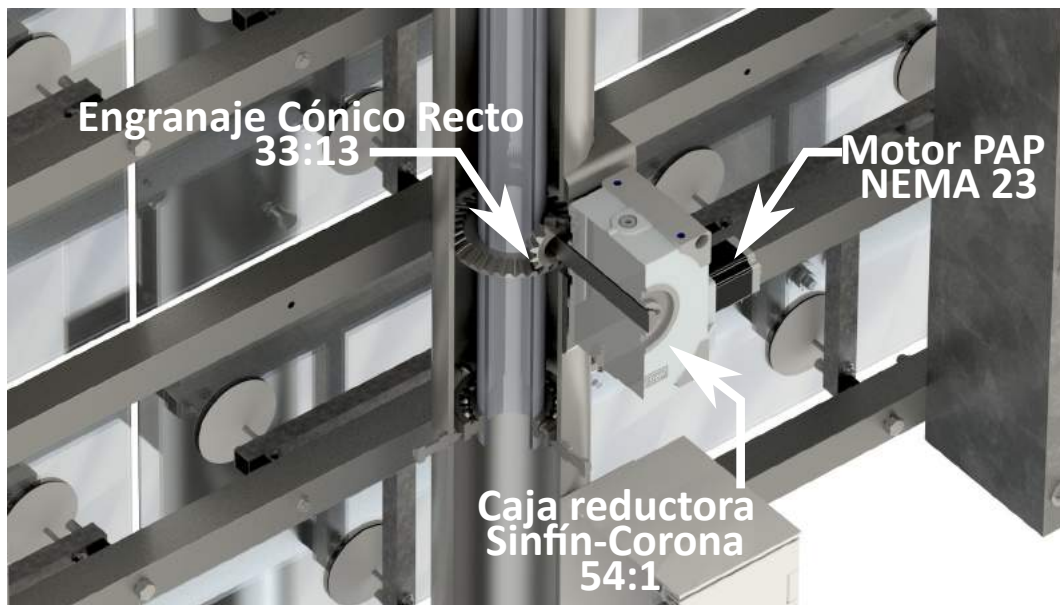


Figura 40. Sistema de transmisión del movimiento azimuthal.

3.10.2 Sistema de transmisión de elevación

El movimiento de elevación del helióstato permite la rotación del bastidor alrededor de un eje horizontal, en conjunto con sus dos contrapesos y el sistema motriz conformado por el actuador y la transmisión mecánica de este mismo movimiento.

Para lograr la rotación de dicho conjunto de elementos, se debe aplicar un momento torsor alrededor del eje, suficiente para vencer la inercia y la fricción de este subsistema. Para ello se requiere calcular el momento de inercia sobre el eje de rotación de la misma forma que se realizó en el numeral anterior.

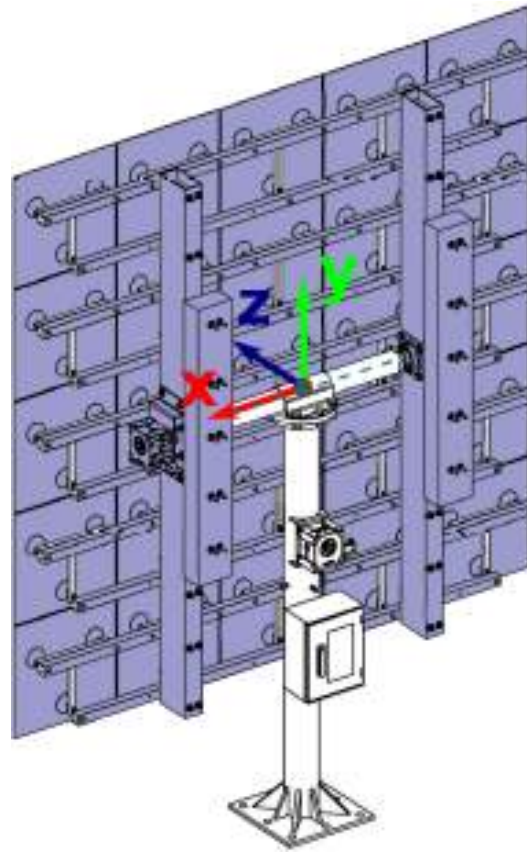


Figura 41. Componentes del subsistema de rotación en elevación.

En el software diseño asistido por computadora, *SolidWorks* se realizaron los cálculos de momentos de inercia de las partes móviles del helióstato, ubicando un sistema coordenado auxiliar en la intersección de los ejes azimutal y de elevación y con los ejes x, y, z paralelos a los respectivos ejes del sistema de referencia global. Adicionalmente se posicionó el bastidor del helióstato de forma que el vector normal principal de la superficie reflectante estuviese paralelo al eje z del sistema de ambos sistemas de referencia, esto con el fin de simplificar los cálculos.

A continuación se presenta la matriz de momentos de inercia del conjunto móvil de elevación, obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas auxiliar.

$$I_{o'} = \begin{bmatrix} I_{xx} = 288634560.30 & I_{xy} = -173773.73 & I_{xz} = -225698.31 \\ I_{yx} = -173773.73 & I_{yy} = 323544532.45 & I_{yz} = -2466815.21 \\ I_{zx} = -225698.31 & I_{zy} = -2466815.21 & I_{zz} = 575602920.52 \end{bmatrix} [kg \cdot mm^2]$$

Para determinar el momento de inercia del conjunto en torno al eje de rotación de elevación, se define el eje de elevación mediante un vector unitario:

$$u_{\Delta} = \cos \alpha i + \cos \beta j + \cos \gamma k$$

Ecuación 5
(Marghitu and Dupac 2012)

Donde $\cos \alpha$, $\cos \beta$ y $\cos \gamma$ son los cosenos directores del vector.

Por lo tanto, el vector unitario para el eje azimutal es:

$$u_{\Delta} = \cos(0)i + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)j + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)k$$

$$u_{\Delta} = i$$

Ahora se sustituyen los valores de los cosenos directores calculados en el paso anterior en la ecuación de traslación de eje para obtener el momento de inercia del sistema en el eje de elevación:

$$I_{\Delta} = I_{xx} \cos^2 \alpha + I_{yy} \cos^2 \beta + I_{zz} \cos^2 \gamma - 2I_{xy} \cos \alpha \cos \beta - 2I_{yz} \cos \beta \cos \gamma - 2I_{zx} \cos \gamma \cos \alpha.$$

Ecuación 6. (Marghitu and Dupac 2012)

Para este caso se obtiene finalmente que:

$$I_{\Delta} = 288634560.30_{[kg \cdot mm^2]} \approx 288.63_{[kg \cdot m^2]}$$

Teniendo la cantidad de momento de inercia del conjunto móvil alrededor del eje de elevación, se procede a calcular el torque necesario para girar el subsistema a partir de la determinación de una aceleración angular que permita el movimiento fluido del helióstato.

Al igual que en el caso del movimiento azimutal, se requiere que el bastidor pueda girar en el eje de elevación a una velocidad angular alrededor de los $10^\circ/s$ (1.67 rpm) para el modo de acomodación rápida, este valor es arbitrario y fue determinado para lograr un desplazamiento de $\frac{1}{4}$ de giro (90°) en 10 segundos, suponiendo una rampa de aceleración angular lineal de $0^\circ/s$ a $10^\circ/s$ en 1 segundo, y otra similar en el frenado de $10^\circ/s$ a $0^\circ/s$ como se muestra en la gráfica de la . Todo esto con el fin de orientar el helióstato oportunamente en su posición de seguridad.

Velocidad de rotación deseada en el eje de elevación
Movimiento Rápido

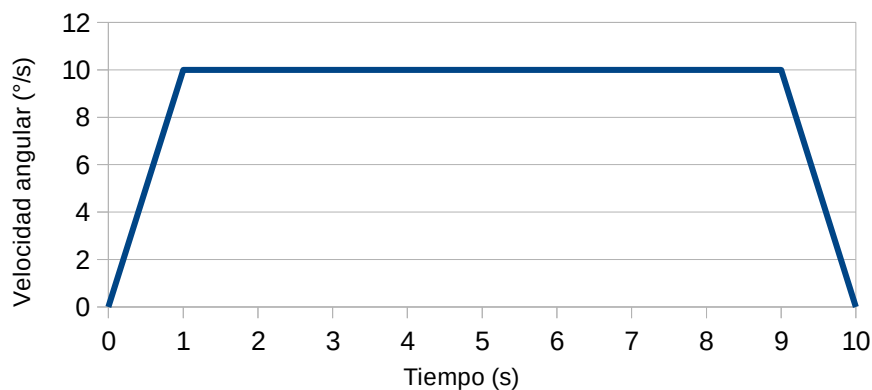


Figura 42. Rampa de aceleración movimiento de elevación rápido.

Partiendo de la aceleración angular teórica (ideal) de la gráfica anterior, se puede obtener el

torque necesario para efectuar dicha operación.

El torque necesario para mover el subsistema de elevación es:

$$\tau_{req} = I \Delta \cdot \alpha_{teórico}$$

$$\tau_{req} = 288.63_{[kg \cdot m^2]} \cdot \left(\frac{10_{[^\circ/s]} - 0_{[^\circ/s]}}{1_{[s]}} \cdot \frac{2\pi_{[rad]}}{360^\circ} \right)$$

$$\tau_{req} = 50.37_{[Nm]}$$

Ahora que se obtuvo el torque requerido para los movimientos más rápidos del bastidor alrededor del eje de elevación, se considera la misma resolución necesaria que se estableció para el eje azimutal, $\pm 0^\circ 2' 33''$.

Con la anterior observación y los cálculos del torque necesario para girar el subsistema de elevación alrededor de su eje, se propuso el siguiente sistema de transmisión de movimiento (Tabla 15).

Pieza	Descripción	Torque (Nm)	Velocidad Angular (rpm)	Velocidad Angular ($^\circ/s$)	Relación (X:1)	Desplazamiento angular ($^\circ$)
Motor	NEMA 23 – 3A – 2.5Nm	2*	300	1800	1	01°48'00"
Reductor	Caja Reductora Sinfin-Corona	104	5.77	34.62	52	00°02'05"
Transmisión	Acoplamiento Directo	104	5.77	34.62	1	00°02'05"

*Se considera la reducción de torque debida a la velocidad del motor según la tabla que se junta en el Anexo 7.3 pág. 89.

Tabla 15. Cálculos de cada etapa de la transmisión de elevación.

Como se aprecia en la última fila de la Tabla 15, al final del sistema motriz azimutal se tiene un torque de 104 Nm que satisface completamente el torque requerido de 50.37 Nm, sin embargo el valor calculado es un valor ideal que no debe ser comparado directamente con los requerimientos sin antes multiplicarlo por la eficiencia de cada mecanismo reductor utilizado, en este caso será únicamente la Caja Reductora Sinfin-Corona cuya eficiencia oscila entre 40% a 85% (Norton 2009), aunque comercialmente se dispone de cajas de transmisión mucho más cercanas a los límites superiores de dicho rango. Por lo que se tomó un valor intermedio del rango para determinar, de una manera conservadora, el torque real que se podrá obtener de esta transmisión mecánica.

$$\tau_{est} = \tau_{req} \cdot Ef_{SC} = (104_{[Nm]})(0.60) = 62.4_{[Nm]}$$

Con el resultado obtenido, se calcula el factor de diseño del sistema:

$$F_D = \frac{62.4_{[Nm]}}{50.37_{[Nm]}} = 1.24$$

Este factor de diseño permite es un poco menor que el obtenido para el eje azimutal y la precisión obtenida en este grado de libertad está muy cercana al límite de tolerancia predefinido, sin embargo ambos factores se pueden corregir mediante la implementación de un controlador de medio paso para el motor, ya que este no solo permitirá suplicar la resolución con la que se mueve el bastidor, sino que también aumenta el torque del motor por el hecho de habilitar dos bobinas a la vez. De esta manera se garantiza que el helióstato pueda operar de manera fluida y adecuada, con un 48% de fuerza extra para enfrentar alguna perturbación o fuerza externa que se presente durante su funcionamiento.

3.10.3 Numeración de las facetas y orientación del helióstato.

La numeración de las facetas del helióstato se llevó a cabo de la manera como se ilustra en la Figura 43, de tal forma que la fila A corresponde al arreglo horizontal de las facetas que se encuentran en la parte más alta del helióstato cuando éste está con su vector principal apuntando hacia el frente del observador.

Por lo general, en las plantas solares de torre central, se ubican los helióstatos al norte de la torre si la planta está ubicada en el hemisferio norte del planeta, y viceversa. De este modo, la columna 1 estará orientada más hacia el este que la columna 5 en los helióstatos que estén ubicados que se encuentren en el hemisferio norte. Lo contrario ocurriría en el hemisferio sur, pues allí la mayor parte del tiempo el Sol se desplaza dentro del hemisferio norte de la esfera celeste, por ende conviene posicionar el lado frontal del pedestal de todos los helióstatos alrededor de la torre también hacia el norte para aprovechar los ángulos máximos de rotación de los ejes del helióstato y evitar limitaciones en el alcance de alguna orientación útil particular.

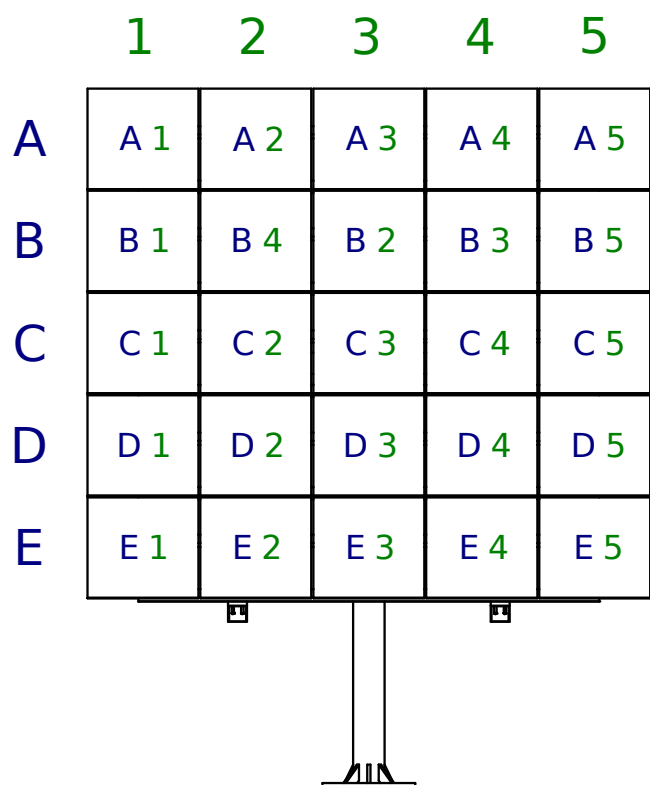


Figura 43. Numeración de las facetas de HORACIO V. (Vista Frontal)

3.11 Diseño asistido por computadora (CAD)

En el Anexo 7.1 se encuentra el Diseño CAD de HORACIO V empaquetado en un archivo .zip con todas sus dependencias, para ser abierto con *SolidWorks* en versiones iguales o posteriores a la 2017.

4 Validación del Diseño

4.1 Simulación mediante el método de elementos finitos

4.1.1 Generación del modelo

Con base en el diseño anterior se realizó una simulación de deformación por cargas de gravedad y de viento para determinar las variaciones en la superficie de las facetas, mediante el software de Análisis de Elementos Finitos (FEA) ANSYS.

El heliostato fue sometido una presión de viento uniforme y normal a las facetas, incidiendo por el lado reflectante de éstas. El plano base de la superficie reflectante del heliostato se posicionó de manera vertical y perpendicular al vector de la presión para maximizar el efecto de las fuerzas producidas por el frente de viento, como se muestra en la Figura 44.

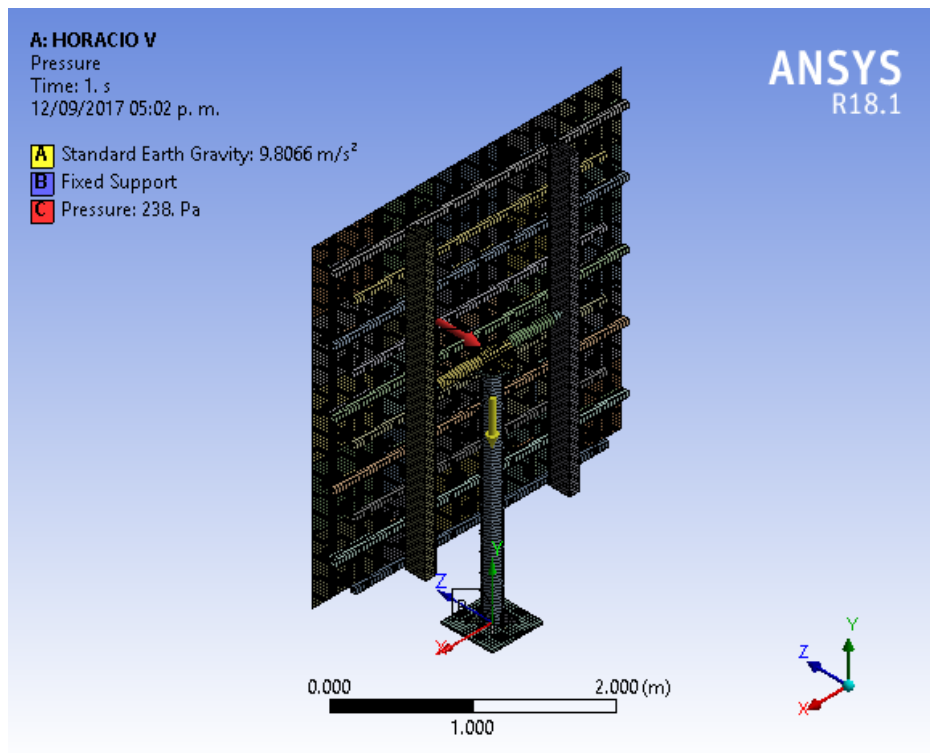


Figura 44. Modelo de la simulación en ANSYS.

En el análisis se estimó una presión ejercida por el viento sobre las facetas a una velocidad de 50 km/h para simplificar el modelo a simular y el resultado de esta prueba garantiza la integridad

estructural bajo esa condición, luego se realizó el análisis con una velocidad de 10 km/h (carga operacional) para determinar la deformación de cada una de las facetas.

En la Figura 45 se puede apreciar la calidad de la malla generada para el análisis de deformación y esfuerzos mediante el método de elementos finitos.

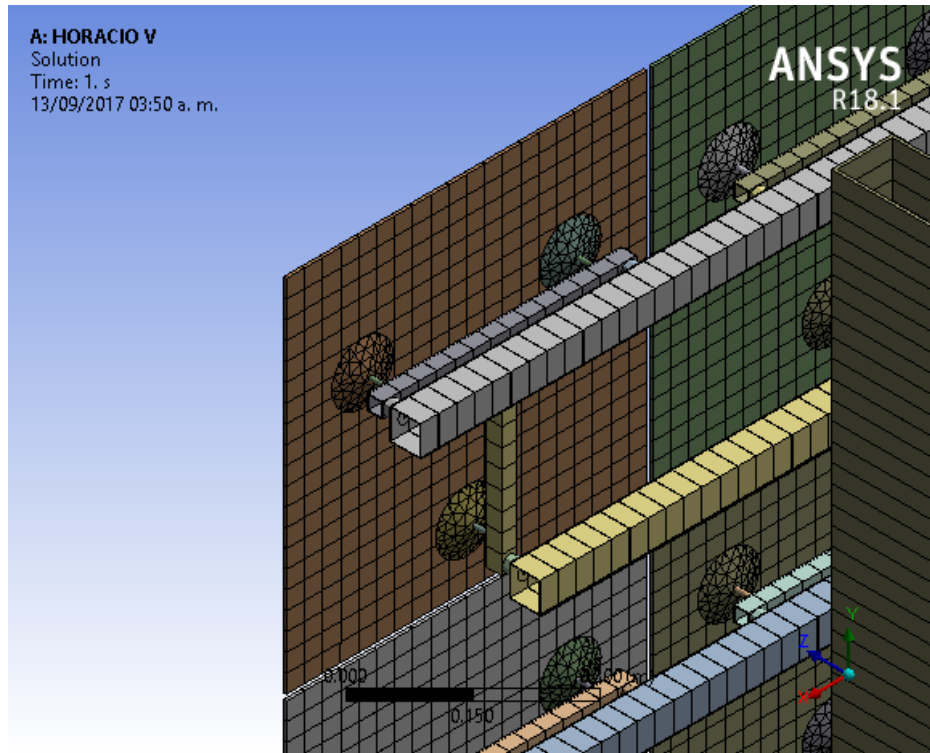


Figura 45. Detalle del mallado en las facetas.

- Las facetas se modelaron como cuerpos de superficie para simplificar la simulación del modelo y en ellas se empleó un mallado uniforme cuadrilateral sin restricciones de frontera, con un tamaño máximo de elemento de 30 mm.
- En las ventosas se realizó un mallado tetraédrico para lograr una adecuada adaptación de los nodos a la geometría de la pieza, empleando para ello un algoritmo independiente de parche (*Patch Independent*) y un refinamiento de la malla por curvatura para garantizar una población de nodos más asertiva y densa en los puntos de interés.
- Todas las piezas de perfilería que componen la estructura de HORACIO V se modelaron como cuerpos de línea, asociados a su respectiva geometría de la sección transversal y al material correspondiente. El tamaño de los elementos del mallado varía según la geometría de la pieza.
- Los contrapesos de concreto se configuraron como elementos rígidos ya que no están sometidos a esfuerzos significativos y su función es principalmente desplazar el centro de masa del bastidor.

4.1.2 Resultados de la simulación

Inicialmente se realizaron simulaciones del modelo bajo carga gravitacional únicamente para visualizar el comportamiento de la estructura y las facetas al soportar su propio peso.

En la Figura 46 se puede apreciar, con una exageración gráfica de 360 veces respecto a la apariencia de la deformación real, que las facetas son las más afectadas y que su posición se desplaza en sentido opuesto del eje y (en el cual es aplicada la aceleración gravitacional estándar). Esta deformación se debe a la flexibilidad de las ventosas que sostienen las facetas y a los separadores elásticos que se encuentran entre el soporte de las facetas y los perfiles horizontales del bastidor. Sin embargo, también se puede notar que el peso del bastidor ocasiona un esfuerzo de torsión sobre el eje horizontal, lo cual provoca la inclinación de todo el bastidor y por ende de las facetas, afectando directamente la posición del foco del heliostato.

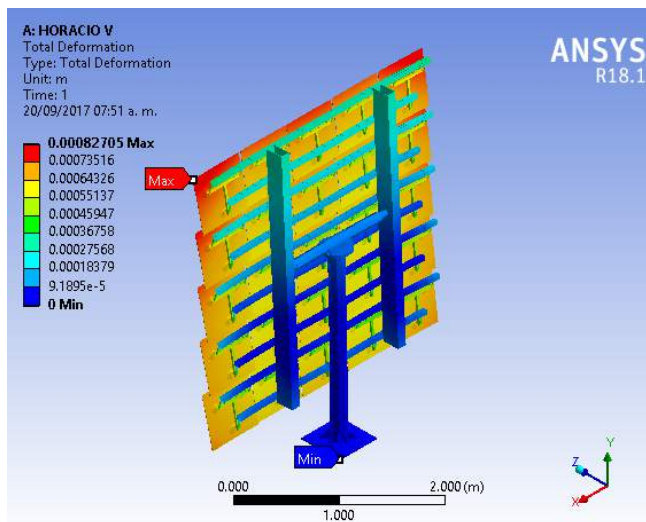


Figura 46. Deformación total del heliostato sin contrapesos. [360x] (Gravedad)

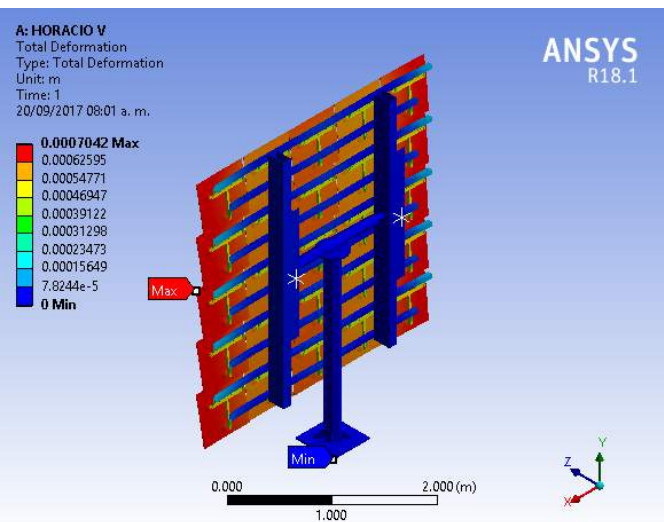


Figura 47. Deformación total del heliostato con contrapesos. [360x] (Gravedad)

Al agregar los contrapesos a la simulación (Figura 47), claramente se corrige el efecto de la torsión sobre el eje horizontal, mitigando la desviación en la inclinación original de las facetas, las cuales finalmente obtienen el desplazamiento neto que se muestra en la Figura 49 donde se destaca la mínima deformación de las columnas 2 y 4 del heliostato con respecto a las magnitudes mostradas en la Figura 48.

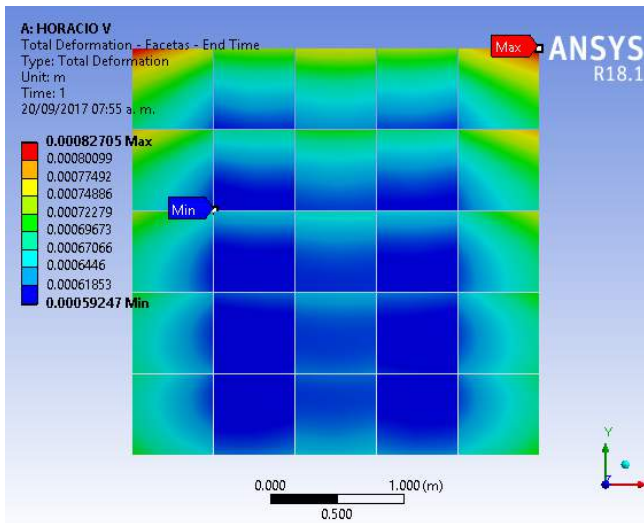


Figura 48. Deformación total de facetas sin contrapesos. [1x] (Gravedad)

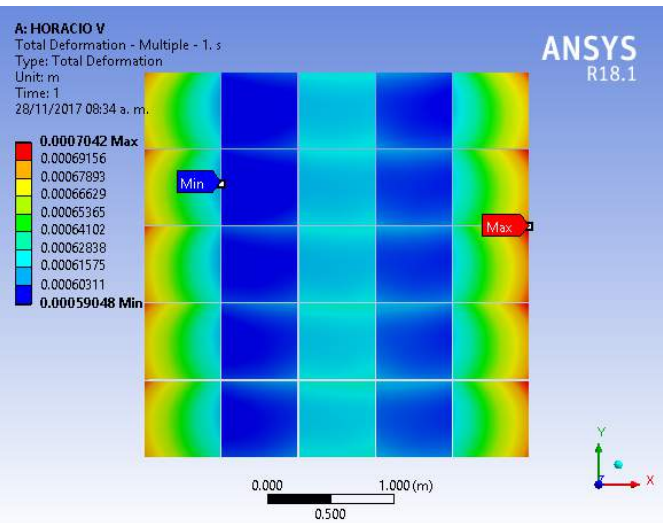


Figura 49. Deformación total de facetas con contrapesos. [1x] (Gravedad)

Una vez analizado el efecto de la gravedad en el modelo del helióstato con y sin balanceo, se realizó el mismo procedimiento con la combinación de carga gravitacional y una presión uniforme de 9.46 Pa equivalentes al efecto de una corriente de viento de 10 km/h, la velocidad operacional que se definió previamente en la sección de Condiciones del entorno.

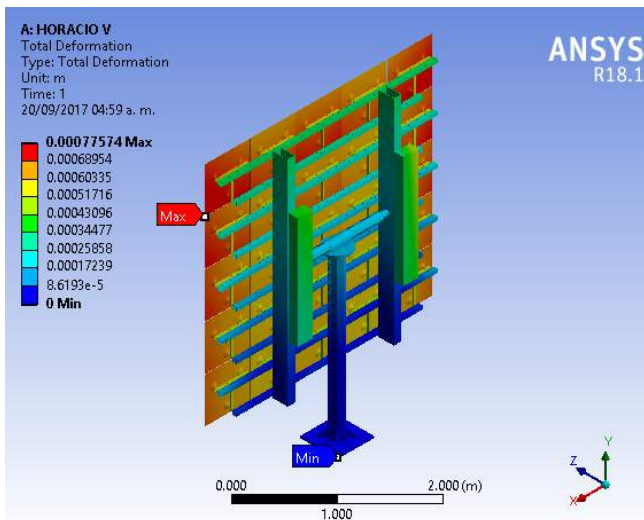


Figura 50. Deformación total del helióstato con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 10km/h)

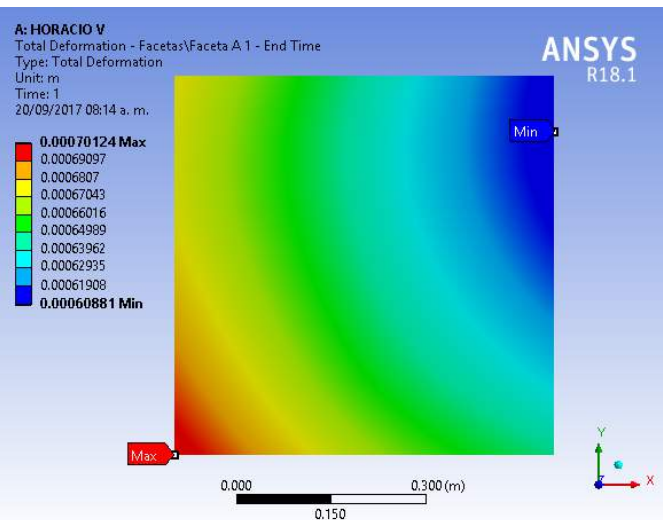


Figura 51. Deformación total de la faceta A1 con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 10km/h)

En la Figura 51 se muestra el detalle de la deformación total de la faceta A1, que en los resultados de la simulación con presión de viento operacional que se ilustran en la Figura 50, es una de las facetas con mayor deformación, al igual que la A5. En ella se aprecia una deformación máxima de 0.7 mm, pero se debe tener en cuenta que según la dirección de la deformación y la magnitud deformada, relativa a los nodos adyacentes, se puede producir un cambio en el vector normal de

la faceta en el nodo de interés, pero de ello se encargará el software de trazado de rayos que se presentará mas adelante.

Por el momento, lo importante fue haber exportado la geometría deformada de cada faceta respecto al sistema de referencia absoluto del modelo. Conservando un orden de la nomenclatura de cada faceta, establecida en la sección de Numeración de las facetas y orientación del helióstato., numeral 3.10.3.

Finalmente se realizó una simulación con cargas simultáneas de gravedad y presión de viento de supervivencia. En la Figura 52 se muestra la deformación total del helióstato (maximizada gráficamente 34X) provocada por una carga de viento frontal de 50 km/h representada mediante una presión uniforme de 238 Pascales y las fuerzas gravitacionales de la estructura. la cual alcanza una deformación máxima de 7.2 mm aproximadamente en el vértice superior derecho de la faceta A5, sin embargo se puede evidenciar que la arista inferior de esta faceta se desplaza cerca de 6 mm en la misma dirección lo cual implica una traslación de la faceta y un ligero cambio en su inclinación.

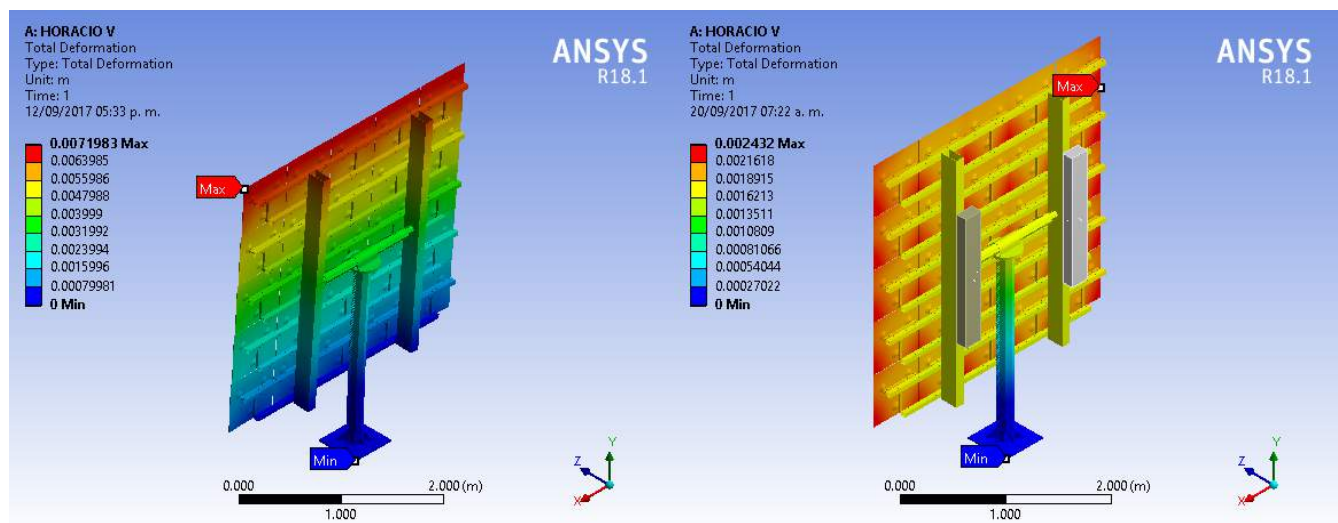


Figura 52. Deformación total del helióstato. [34x] (Viento 50 km/h)

Figura 53. Deformación total del helióstato con contrapesos. [34x] (Viento 50 km/h)

Como se aprecia en los resultados de la simulación, el pedestal está sometido aun esfuerzo flector a través del cabezal del helióstato, sin embargo, la inclinación que se puede observar mediante las franjas de deformación del bastidor, no es totalmente ocasionada por la inclinación del cabezal debido a la flexión del pedestal. Éstas son provocadas en gran medida por un esfuerzo de torsión en el eje horizontal (eje torsor) que sostiene al helióstato. Lo anterior se verifica al realizar la misma simulación con el modelo de HORACIO V que incluye los contrapesos para compensar el momento de torsión que el bastidor ejerce sobre el eje horizontal (ver Figura 53).

También se puede notar, en la Figura 53, una gran reducción en la máxima de deformación total de los nodos que conforman el modelo del helióstato (de 7.2 mm sin contrapesos a 2.4 mm con

contrapesos), lo cual indica el beneficio que otorga el balanceo del bastidor. Teniendo en cuenta que los 2.4 mm de deformación se presentan de forma uniforme en todas las facetas del heliostato, lo cual indica una traslación del bastidor en el eje z, y que en casos prácticos no tendría consecuencias graves en la posición del punto focal del heliostato.

En la Figura 54 se puede evidenciar con mayor claridad las deformaciones propias de cada faceta ocasionadas por las cargas de gravedad y viento extremos. Lo cual indica que en estas condiciones los vértices de la facetas de las columnas 1 y 5 sufren una deformación total de 2 milímetros que en el periodo de operación, podrían sacar totalmente el foco del heliostato del área del receptor, sin embargo esta deformación todavía genera confianza dentro de las condiciones de supervivencia definidas para esta simulación.

Otro aspecto a detallar en los resultados de la deformación de las facetas, son las curvas de nivel que se generan en cada una de las facetas y que son más definidas en las facetas que se ubican sobre la columna central (Columna 3). Estas reflejan la distribución correcta de la carga en los tres apoyos que la sostienen, ya que el apoyo inferior se ubicó mucho más cerca del borde del espejo que el par superior de apoyos (ver Figura 22), esto con el fin de reducir al máximo las deformaciones de los vértices inferiores de las facetas (color amarillo y rojo de la Figura 55).

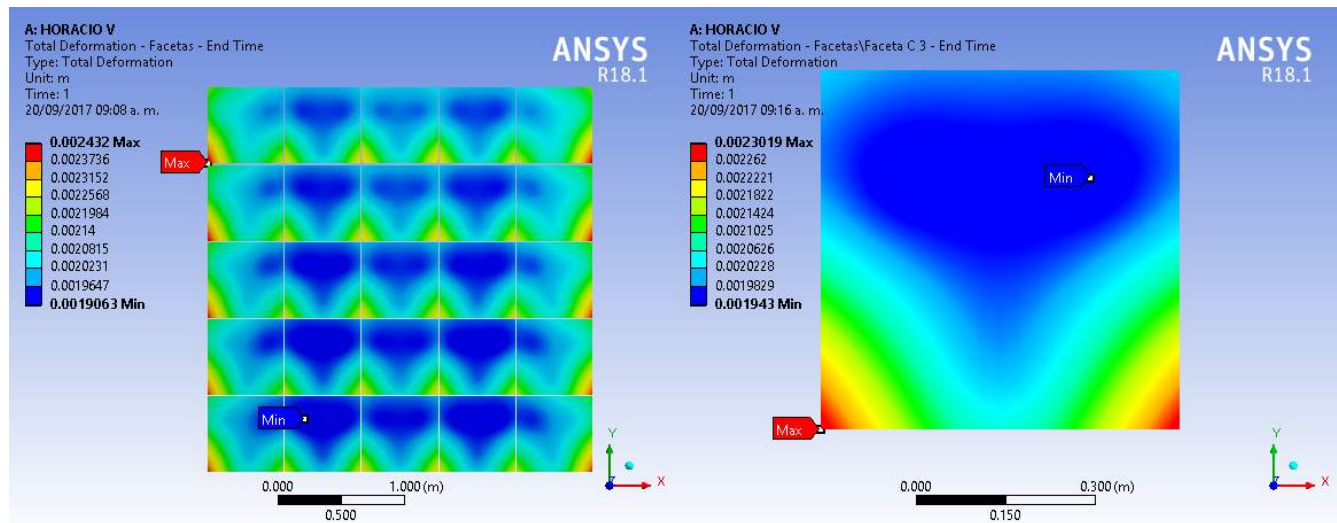


Figura 54. Deformación de facetas con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 50 km/h)

Figura 55. Deformación de la faceta C3 con contrapesos. [1x] (Gravedad y Viento 50 km/h)

4.2 Simulación de trazado de rayos

Para la validación de la calidad de concentración del helióstato se empleó el software de trazado de rayos, de uso libre y código abierto, Tonatiuh (Blanco et al. 2017).

4.2.1 Generación del modelo

Para dar inicio a la etapa de simulación óptica del helióstato, se construyó un modelo de una planta solar de torre central, la cual cuenta con una edificación cilíndrica de 20 metros de altura con un receptor ubicado a la altura de los 18 metros y un blanco lambertiano cuadrado de tres metros de lado, cuyo centro está ubicado a una altura de 15 metros para cumplir con las especificaciones definidas en los Requisitos de Concentración.

Se modeló el helióstato y se posicionó a 100 metros de distancia horizontal de la base de la torre, el cual se encuentra a 15 m de altura sobre el plano horizontal que coincide con la base de HORACIO V como se ilustra en la Figura 56.

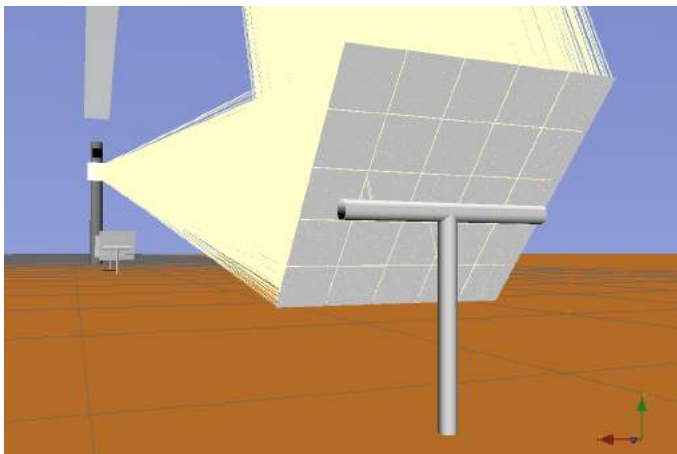


Figura 56. Modelo del helióstato y de la torre central en Tonatiuh.

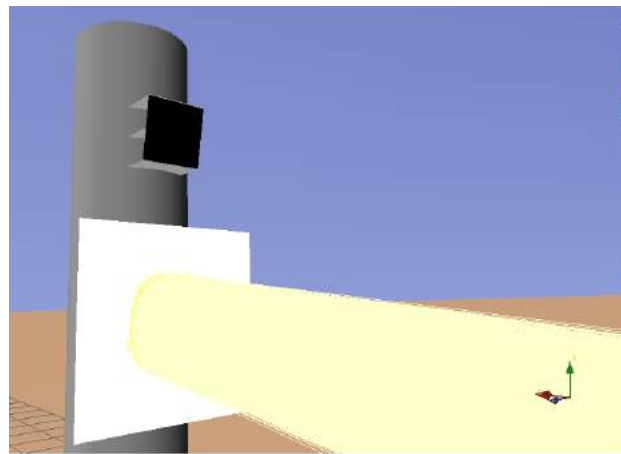


Figura 57. Impacto de los rayos sobre la superficie de pruebas en la torre central.

Se realizó la primera simulación de concentración solar con una muestra de 10,000,000 de rayos solares que inciden sobre la superficie reflectante del helióstato. Se determinó un error de superficie con desviación típica de 2 mrad y una reflectividad del 90% para las facetas.

Esta simulación representa la concentración del modelo del helióstato ideal, sin ningún tipo de deformación, el canteo o alineación de facetas se realizó mediante el cálculo automático de orientación de facetas la función “Heliostat Tracker” que ofrece Tonatiuh, con el sol en una posición de 180° azimut y una elevación de 70°. Esta configuración se dejó fija para poder comparar los resultados de todas las simulaciones bajo las mismas condiciones.

Los resultados obtenidos de la primera simulación de HORACIO V, sin deformaciones, se analizaron mediante un algoritmo ejecutado con el software de programación GNU Octave, que se adjunta en el Anexo 7.4 que corresponde a la rutina *Tonatiuh_Data_Analyser.m*.

4.2.2 Adaptación de los resultados de ANSYS

Posteriormente se programó y se ejecutó el algoritmo *STL_Splitter.m*, que permite dividir un archivo *.STL* que contiene la geometría de todas las facetas, deformadas por las cargas de gravedad y viento de 10 km/h de la simulación mecánica en ANSYS, en múltiples sólidos en archivos independientes, un *.STL* por cada faceta.

Ya obtenidos automáticamente los 25 archivos *.STL*, se deben trasladar las coordenadas de todos los puntos de cada uno de los sólidos desde el sistema de referencia global que establece ANSYS a un sistema de referencia relativo a cada una de las facetas, el programa *Set_Relative_Reference_ANSYS_Data.m* permite hacerlo de forma automática para todas las facetas, permitiendo elegir entre el centroide del sólido y el origen de la faceta para definir el nuevo sistema de referencia de cada faceta, mediante una interfaz comandada por diálogos del sistema.

En este caso se definieron los nuevos sistemas de referencia a partir del origen de cada faceta según el archivo de configuración de ANSYS: *CAERep.xml*, el cual contiene las propiedades de cada elemento del modelo a simular (este archivo se puede encontrar en la ruta *HORACIO V_files/dp0/SYS-1/MECH/*). Lo anterior se realiza de manera semiautomática con el mismo programa (*Set_Relative_Reference_ANSYS_Data.m*).

Una vez corregidas las coordenadas de cada faceta deformada, se escribió un programa que permitiera reemplazar los componentes de superficie, utilizados en las facetas del heliostato simulado previamente, por los sólidos obtenidos tras la deformación por cargas de viento en la simulación de ANSYS, previamente adaptados con los anteriores algoritmos. Este proceso se realizó mediante el programa *Tonatiuh_Component_CAD_Replacer.m* que se encuentra adjunto en el Anexo 7.8.

4.2.3 Trazado de rayos del heliostato deformado

De la misma forma en que se hizo el trazado de rayos con el modelo inicial del heliostato, se tomó una muestra de 10,000,000 de rayos solares, se determinó un error de superficie con desviación típica de 2 mrad y una reflectividad del 90% para las facetas. Conservando también las mismas condiciones del entorno como la ubicación del modelo y posición solar.

En la Figura 58 se muestra la distribución del flujo solar sobre el blanco lambertiano del modelo de

HORACIO V sin cargas de ningún tipo utilizando superficies planas de Tonatiuh para las facetas. Mientras que en la Figura 59 se muestra la distribución del flujo solar sobre el blanco lambertiano del heliostato deformado con cargas de gravedad y viento frontal de 10 kilómetros por hora.

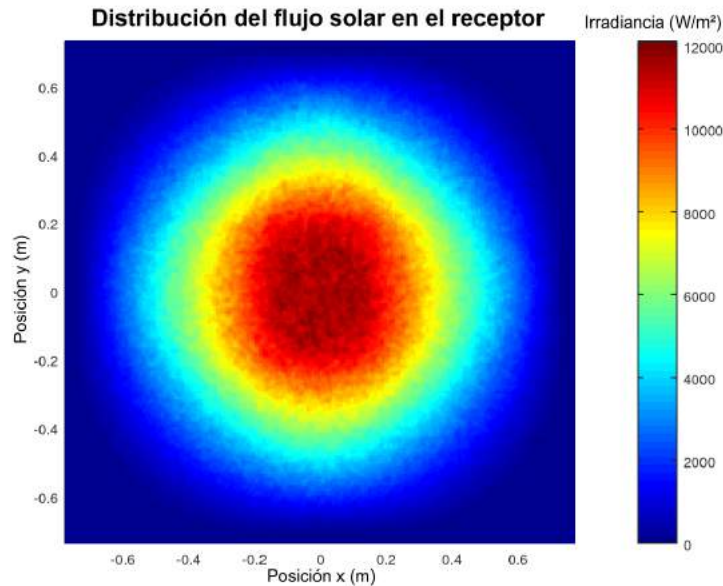


Figura 58. Concentración solar - Sin Cargas.

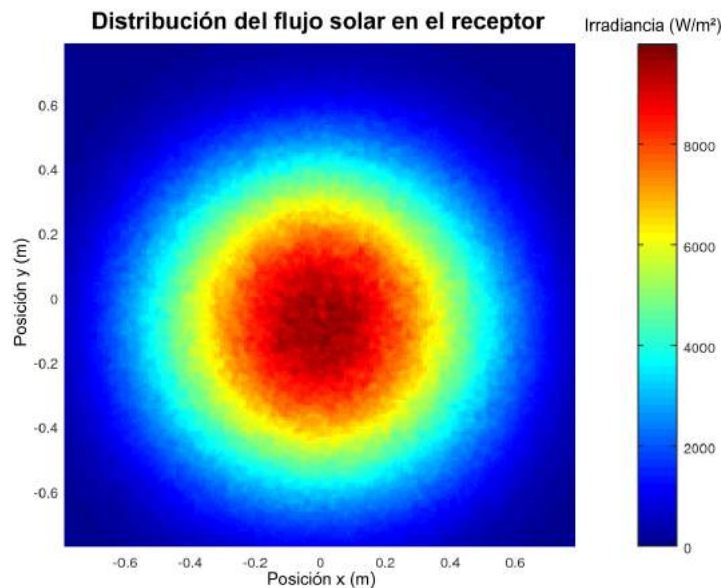


Figura 59. Concentración solar - Gravedad y Viento 10 km/h.

Como se logra apreciar en las anteriores gráficas (Figura 58 y Figura 59), la sujeción de las facetas es lo suficientemente estable y distribuida correctamente en las facetas para evitar una deformación perceptible en la proyección, no obstante la cantidad de radiación se ve reducida

debido a la dispersión de parte de los rayos solares por la deformación de las superficies reflectantes. En las Figuras 60 y 61 se logra apreciar con mayor claridad los perfiles de irradiancia a lo largo de los ejes x y y del blanco lambertiano.

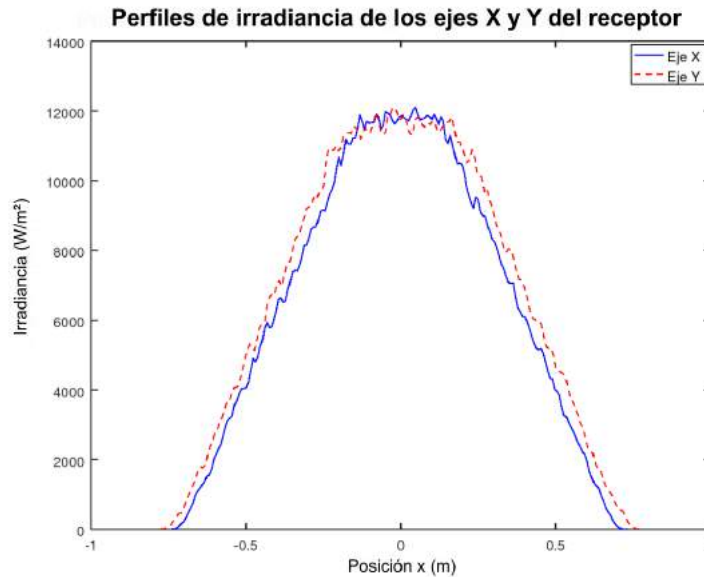


Figura 60. Perfiles de irradiancia - Sin Cargas.

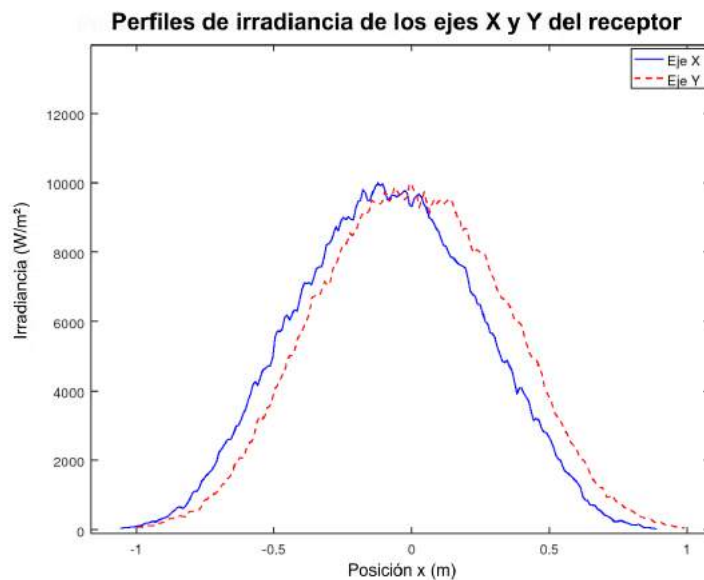


Figura 61. Perfiles de irradiancia - Gravedad y Viento 10 km/h

En la Figura 61 se logra ver claramente una disminución de cerca de 2000 W/m^2 en la máxima irradiancia obtenida y un desplazamiento del centro del perfil en el eje x de diez centímetros aproximadamente hacia el este, lo cual no implicaría consecuencias graves si el receptor es de las dimensiones que se propusieron en los Requisitos de Concentración.

5 Conclusiones

- Mediante esta metodología se puede hacer una evaluación integral de la calidad óptica de un helióstato mientras es sometido a cargas de viento, lo cual permite aproximarse más a las condiciones reales de trabajo de un helióstato.
- El diseño de este helióstato de 9m² con un arreglo de 25 facetas planas tiene una buena calidad de concentración, es suficientemente firme para mantener el foco en su sitio y simplifica mucho la fabricación de sus piezas y consecuentemente su costo.
- Mediante el método de sujeción de tres ventosas propuesto en el diseño de HORACIO V, se logra una gran estabilidad de la faceta con cargas de viento operacionales, lo cual disminuye la dispersión del punto focal del helióstato completo.
- A pesar de que generalmente los helióstatos sin abertura en medio (superficie continua) no se suelen compensar con contrapesos, se logró demostrar que un balanceo estático del bastidor reduce significativamente los esfuerzos de torsión en el eje horizontal, lo cual evita que se tenga que compensar el desplazamiento angular del bastidor según su orientación en el eje de elevación, ya que el brazo de palanca que ejerce el centro de masa de la estructura con las facetas, varía conforme se eleva el bastidor, lo que produce una desviación en el ángulo de elevación del vector principal del helióstato también variable.
- Se puede conseguir una sinergia entre los diversos software de simulación mediante algoritmos de GNU Octave/MATLAB para alcanzar un resultado de concentración solar más cercano a la realidad, ya que el software de trazado de rayos Tonatiuh es un complemento ideal para el análisis de deformación de ANSYS para desarrollar la simulación de cualquier sistema solar de concentración.

6 Referencias

Behar, Omar, Abdallah Khellaf, and Kamal Mohammedi

2013 A Review of Studies on Central Receiver Solar Thermal Power Plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23(Supplement C): 12-39.

Blanco, M. J., A. Mutuberria, A. Monreal, J. M. Amieva, and A. Mancillas

2017[2015] Tonatiuh: A Monte Carlo Ray Tracer for the Optical Simulation of Solar Concentrating Systems. C++. National Renewable Energy Centre - CENER. <https://github.com/iat-cener/tonatiuh>, accessed November 25, 2017.

Brightsource Energy

2012 Helióstatos En La Planta Solar de Coalinga, CA, EE.UU.
<http://www.brightsourceenergy.com/image-gallery>, accessed November 22, 2017.

Caliver

2010 English: Shows the 4 Most Important Points through Which the Earth in Its Journey around the Sun, the Two Equinoxes and the 2 Solstices, Aphelion and Perihelion Concepts and How the Earth Is Illuminated by the Sun in Either the North or South Pole as His Career and since the Tilt of Its Axis to the Plane of the Sun. Own work. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Terra-equinox-solstice-ES.svg>, accessed November 26, 2017.

Chacón, Rubén, Sebastián Provenzano, Luís Dávila, and Santiago Barboza

2010 Diseño de Un Helióstatos Empleando Técnicas Computacionales. *Ciencia e Ingeniería* 32(1): 17-22.

Chen, Y. T., K. K. Chong, B. H. Lim, and C. S. Lim

2003 Study of Residual Aberration for Non-Imaging Focusing Heliostat. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 79(1): 1-20.

Chen, Y. T., A. Kribus, B. H. Lim, et al.

2004 Comparison of Two Sun Tracking Methods in the Application of a Heliostat Field. *Journal of Solar Energy Engineering* 126(1): 638-644.

Collado Hernández, Javier, Joaquín Gracia Grijota, and Jordi Fort I Comaposada

2014 Sistema, Procedimiento y Programa Informático de Calibración Del Posicionamiento de Los Espejos En Heliostatos.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/43/9c/8b/f529224dcb2e87/ES2422806B1.pdf>.

Cooper, P. I.

1969 The Absorption of Radiation in Solar Stills. *Solar Energy* 12(3): 333-346.

Cordes, S, TC Prosinecki, and K Wieghardt

2012 An Approach to Competitive Heliostat Fields. *In* 18th Annual SolarPACES Symposium.

Marrakech, Morocco.

Duffie, John A., and William A. Beckman
2013 Solar Engineering of Thermal Processes. 4th edition. John Wiley & Sons.

Emes, Matthew J., Maziar Arjomandi, and Graham J. Nathan
2015 Effect of Heliostat Design Wind Speed on the Levelised Cost of Electricity from Concentrating Solar Thermal Power Tower Plants. *Solar Energy* 115(Supplement C): 441–451.

Fondo Monetario Internacional
2017 Perspectivas de la economía mundial: ¿Está cobrando impulso? Washington: Fondo Monetario Internacional.
<https://www.imf.org/~media/Files/Publications/WEO/2017/April/Spanish/pdf/texts.ashx>, accessed May 9, 2017.

García Navajas, Ginés, and A Egea Gea
2000 El Heliostato Autónomo.

Global NevadaCorp.
2011 Central Tower CSP Plant. <http://globalnvcorp.com/archives/88>, accessed July 28, 2017.

Gorocica, Fernando de
2014 Español: COORDENADAS ECUATORIALES (Geocéntricas). Own work.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coordenadas_Ecuatoriales.png, accessed November 26, 2017.

Griffith, D. Todd, Clifford K. Ho, Patrick S. Hunter, et al.
2012 Modal Analysis of a Heliostat for Concentrating Solar Power. *In Topics in Modal Analysis I*, Volume 5 Pp. 415–423. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, New York, NY. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-2425-3_39, accessed November 3, 2017.

Gwiazda, Jonathan, and Francis DiBella
2005 Power Generation by Solar/Pneumatic Cogeneration in a Large, Natural or Man-Made, Open Pit. <http://www.google.com/patents/US20050150225>, accessed November 3, 2017.

Hernández Martínez, Iván
2013 Diseño de un microhorno solar y campo de heliostatos para diversas aplicaciones. Tesis de grado de ingeniería mecánica,
<http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5955/Tesis.pdf>, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5955>.

Hernández-Moro, J., and J. M. Martínez-Duart
2013 Analytical Model for Solar PV and CSP Electricity Costs: Present LCOE Values and Their Future Evolution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20(Supplement C): 119–132.

Igel, E. A., and R. L. Hughes
1979 Optical Analysis of Solar Facility Heliostats. *Solar Energy* 22(3): 283–295.

Kistler, B. L.
1986 A User's Manual for Delsol3: A Computer Code for Calculating the Optical Performance and

- Optimal System Design for Solar Thermal Central Receiver Plants. SAND-86-8018. Sandia National Labs., Livermore, CA (USA). <https://www.osti.gov/scitech/biblio/7228886>, accessed November 18, 2017.
- Kolb, Gregory J., Roger Davenport, David Gorman, et al.
2007 Heliostat Cost Reduction: 1077–1084.
- Kribus, Abraham, Irina Vishnevetsky, Moshe Meri, Amnon Yogev, and Andrei Sytnik
2004 Continuous Tracking of Heliostats. *Journal of Solar Energy Engineering* 126(3): 842–849.
- Ledesma-Jaime, Reynaldo, Marcos Rodríguez-Sánchez, Miguel Ángel Ferrer-Almaráz, and Humberto Ramos-López
2016 Análisis Dinámico Estructural de Un Helióstato Concentrador de Energía Solar. *Revista de Energía Química y Física* 3(8): 1–11.
- Mancini, Thomas R
2000 Catalog of Solar Heliostats. IEA SolarPACES Report 3(1): 35.
- Marghitu, Dan B., and Mihai Dupac
2012 Centroids and Moments of Inertia. *In Advanced Dynamics* Pp. 73–141. Springer, New York, NY. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-3475-7_2, accessed November 23, 2017.
- Mendoza, Julio E.
2014 Gráfica Solar de Aguascalientes. http://www.heliodon.com.mx/grafica_descargas.html, accessed November 23, 2017.
- Nakamura, Katsushige
2004 Autonomous Heliostat. <http://www.google.com.mx/patents/EP1475582A2>, accessed November 3, 2017.
- Norton, Robert L.
2009 DISEÑO DE MAQUINARIA. 4th edition. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Noto, Vincent H.
1986 Reflective Solar Tracking System. <http://www.google.com.mx/patents/US4586488>, accessed November 3, 2017.
- NREL
2017 Concentrating Solar Power Projects by Project Name. National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_project.cfm, accessed November 3, 2017.
- Parkinson, Giles
2015 Saudi Power Giant Sees Solar Taking on Base Load Fossil Fuels. *RenewEconomy*. <http://reneweconomy.com.au/saudi-power-giant-sees-solar-taking-on-base-load-fossil-fuels-57218/>, accessed November 3, 2017.
- Peterka, J.A., Z Tan, J.E. Cermak, and B Bienkiewicz
1989 Mean and Peak Wind Loads on Heliostats. *J. Sol. Energy Eng.; (United States)* 111:2.
- Pfahl, Andreas
2013 Survey of Heliostat Concepts for Cost Reduction. *Journal of Solar Energy Engineering*

136(1): 014501-014501-9.

Pfahl, Andreas, Joe Coventry, Marc Röger, et al.

2017 Progress in Heliostat Development. Solar Energy 152(Supplement C). Progress in Solar Energy Special Issue: Concentrating Solar Power (CSP): 3-37.

PSA, Plataforma Solar de Almería

2015 Plataforma Solar de Almería - Sistemas de Torre con Receptor Central. SISTEMAS DE TORRE CON RECEPTOR CENTRAL. <http://www.psa.es/es/instalaciones/receptor/crs.php>, accessed November 22, 2017.

Richter, Christoph, Sven Teske, and Rebecca Short

2009 Energía Solar Térmica de Concentración. Perspectiva Mundial 2009. España: Greenpeace Internacional, SolarPACES y ESTELA. <http://www.greenpeace.org/espana/es/reports/090713/>, accessed November 3, 2017.

Rodríguez, Jiménez, and Rafael Manuel

2010 Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de discos cerámicos. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/8943>, accessed November 20, 2017.

Sepúlveda, Araya, and Gonzalo Matías

2013 Análisis, comparación y evaluación económica de tecnologías termosolares. Repositorio Académico - Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113516>, accessed November 3, 2017.

SKF Group

2016 Rolling Bearings. www.skf.com/binary/77-121486/SKF-rolling-bearings-catalogue.pdf. <http://www.skf.com/group/knowledge-centre/media-library/index.html#tcm:12-121486>.

2017a Deep Groove Ball Bearings - 6220-2Z. Catálogo. Deep Groove Ball Bearings. <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6220-2Z>, accessed November 20, 2017.

2017b Rodamientos Rígidos de Bolas - 6214. Catálogo. Rodamientos Rígidos de Bolas. <http://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6214>, accessed November 21, 2017.

2017c Unidades de Rodamientos Y Con Pestaña Cuadrada - FYJ 70 TF. Catálogo. Unidades de Rodamientos Y Con Pestaña Cuadrada. <http://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-flanged-units/y-brg-square-flanged-units/index.html?designation=FYJ%2070%20TF>, accessed November 21, 2017.

Torres Roldán, Manuel

2016 Diseño de un heliostato polar innovador y simplificado para la integración en edificios y entornos urbanos. Tesis doctoral, Universidad de Córdoba. <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13386>, accessed November 3, 2017.

Torres-Roldán, M., R. López-Luque, and M. Varo-Martínez

2015 Design of an Innovative and Simplified Polar Heliostat for Integration in Buildings and Urban Environments. Solar Energy 119(Supplement C): 159-168.

Vogel, Werner, and Henry Kalb

2010 Large-Scale Solar Thermal Power: Technologies, Costs and Development. John Wiley & Sons.

7 Anexos

7.1 Diseño CAD de HORACIO V

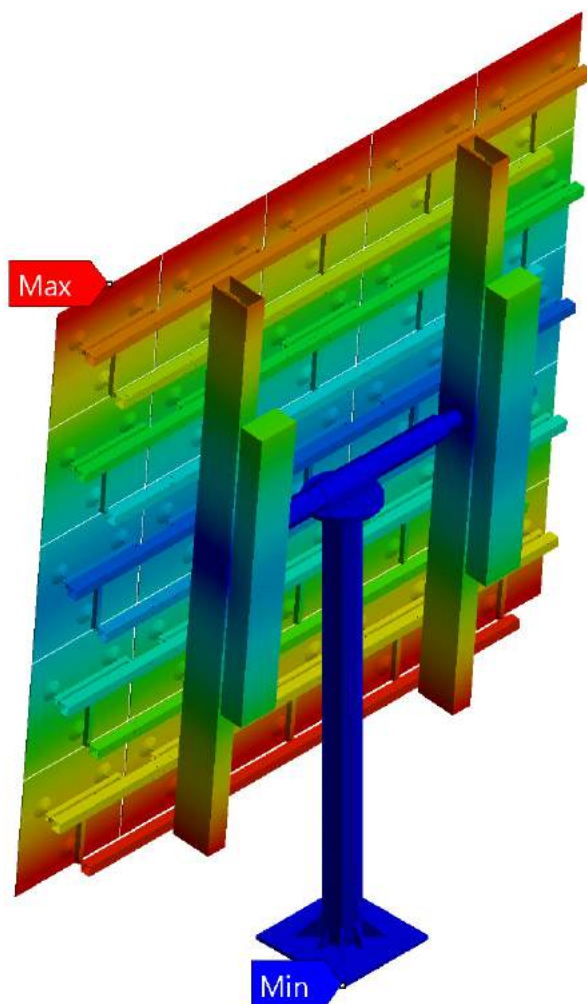
El siguiente enlace dirige al archivo empaquetado e independiente del ensamble total del helióstato con los componentes del *toolbox* integrados. El archivo está guardado en la versión 2017 de *SolidWorks*.



[Anexos/Ensamblaje HORACIO V.zip](#)


































7.2 Simulación mediante el Método de Elementos Finitos

El siguiente enlace dirige al archivo empaquetado del proyecto del análisis estructural de HORACIO V en el software ANSYS versión 2018.



[Anexos/HORACIO V.Final.wbpz](#)

7.3 Tabla de datos de los motores NEMA 32 – 2.5 Nm

■ Wide Range of Stepper Motor Variations				
Size Nema Size				
Nema 08		1.8°		
Nema 11		1.8°		
Nema 14		0.9°		1.8°
Nema 16		0.9°		1.8°
Nema 17		0.9°		1.8°
Nema 23		0.9°		1.2°
Nema 24		1.2°		1.8°
Nema 34		1.8°		1.2°
Nema 42		1.8°		1.2°
				0.9° Round
				3.6°
				3.75°
				1.8°
				1.8° Round
				0.72°
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round
				1.8° Round

STEP MOTOR

8HS

11HS

14HM

14HS

14HR

16HM

16HS

17HM

17HS

17HT

17HE

20HR

20HM

20HS

20HT

24HS

24HT

24HS

24HR

24HS

34HT

34HR

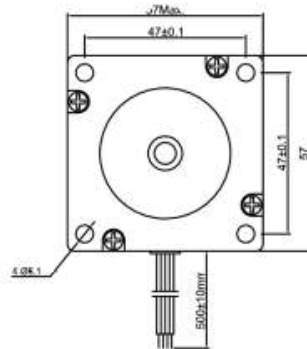
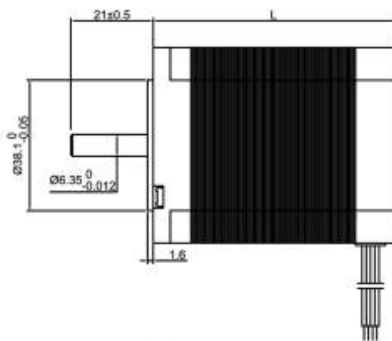
42HS

42HT

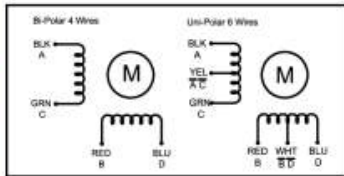
□ 56.8mm (□ 2.24in.)

Step Angle 1.8° 23HS High-Torque Type

■ Dimension Unit = mm(in.)



■ Wiring Diagram



■ Excitation Sequence

Excitation: 2-2

STEP	A	B	C	D
1	+	+		
2		+	+	
3			+	+
4	+			+

Excitation: 2-1-2

STEP	A	B	C	D
1	+			
2		+		
3			+	
4				+
5	+			
6		+		
7			+	
8				+

■ Specifications

Model	Torque		Voltage	Current	Resistance	Inductance	Inertia	Bi/Unipolar	Weight	Length "L"	
	Ncm	oz.in	V/Phase	A/Phase	Ohm/Phase	mH/Phase	g.cm ²	# of Leads	Kg	mm	in
23HS16-1006S	39	55.2	5.7	1	5.7	5.4	120	Uni (6)	0.45	41	1.6
23HS16-2006S	39	55.2	2.8	2	1.4	1.4	120	Uni (6)	0.45	41	1.6
23HS16-3006S	39	55.2	1.9	3	0.63	0.6	120	Uni (6)	0.45	41	1.6
23HS16-2804S	55	77.9	2	2.8	0.7	1.4	120	Bi (4)	0.45	41	1.6
23HS20-1006S	72	102.0	6.6	1	6.6	8.2	275	Uni (6)	0.65	51	2
23HS20-2006S	72	102.0	3.3	2	1.65	2.2	275	Uni (6)	0.65	51	2
23HS20-3006S	72	102.0	2.2	3	0.74	0.9	275	Uni (6)	0.65	51	2
23HS20-2804S	101	143.0	2.3	2.8	0.83	2.2	275	Bi (4)	0.65	51	2
23HS22-1006S	90	127.5	7.4	1	7.4	10	300	Uni (6)	0.7	56	2.2
23HS22-2006S	90	127.5	3.6	2	1.8	2.5	300	Uni (6)	0.7	56	2.2
23HS22-3006S	90	127.5	2.3	3	0.75	1.1	300	Uni (6)	0.7	56	2.2
23HS22-1504S	116	164.3	5.4	1.5	3.6	17	275	Bi (4)	0.7	56	2.2
23HS22-2804S	126	178.4	2.5	2.8	0.9	2.5	300	Bi (4)	0.7	56	2.2
23HS30-1006S	135	191.2	8.6	1	8.6	14	480	Uni (6)	1	76	30
23HS30-2006S	135	191.2	4.5	2	2.25	3.6	480	Uni (6)	1	76	30
23HS30-3006S	135	191.2	3	3	1	1.6	480	Uni (6)	1	76	30
23HS30-2804S	189	267.6	3.2	2.8	1.13	3.6	480	Bi (4)	1	76	30
23HS33-1508S	160	226.6	7.5	1.5	5	10	530	Bi (8)	1.13	84	33
23HS33-4008S	200	283.2	3.2	4	0.8	1.8	530	Bi (8)	1.13	84	33
23HS41-3006S	180	254.9	3.3	3	1.1	3.2	680	Uni (6)	1.25	104	4.1
23HS41-1804S	240	339.9	4.95	1.8	2.75	17	680	Bi (4)	1.25	104	4.1
23HS45-4208S	195	276.1	4.2	4.2	1	2.3	810	Bi (8)	1.55	115	4.5
23HS45-3004S	250	354.0	6.3	3	2.1	9	810	Bi (4)	1.55	115	4.5

* Specify -S for Single Shaft; -D for Double Shaft * All motor's specifications are based on full-step constant current operation

Superior
Electric STEP MOTORS

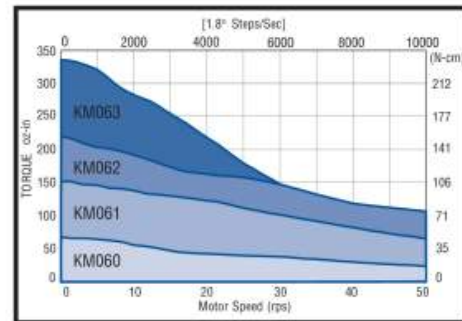
KM06

High Torque 60mm Frame Size (NEMA Size 23)



Performance Envelope

(see page 9 for detailed torque-speed curves)



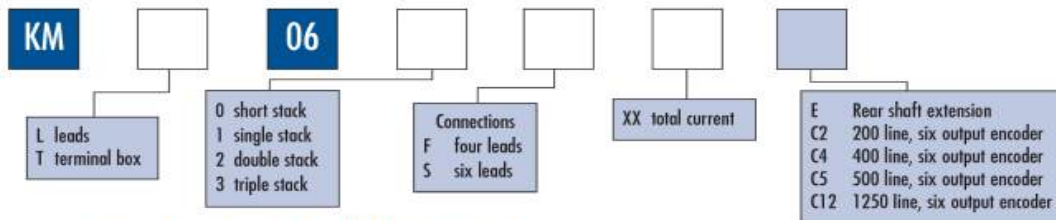
- Up to 200% rated torque reserve capacity
- $\pm 2\%$ typical step accuracy
- Terminal box, encoders, precision gearheads and rear shafts available
- Available with four or six leads
- Customized configurations available



Motor Frame	Minimum Holding Torque		Rotor Inertia oz-in-s ² (kg-cm ²)	*Weight		Maximum Shaft Load		Minimum Residual Torque oz-in (N-cm)
	Unipolar 2Ø on	Bipolar 2Ø on		Net	Ship	Overhang	Thrust	
	oz-in (N-cm)	oz-in (N-cm)		lb (kg)	lb (kg)	lb (kg)	lb (kg)	
KM060	54 (38)	68 (48)	0.00154 (0.108)	1.03 (0.47)	1.1 (0.050)	15 (6.8)	25 (11)	2.0 (1.4)
KM061	128 (90.4)	170 (120)	0.0034 (0.24)	1.6 (0.73)	1.7 (0.77)	15 (6.8)	25 (11)	3.0 (2.1)
KM062	188 (133)	250 (177)	0.0056 (0.395)	2.3 (1.04)	2.5 (1.1)	15 (6.8)	25 (11)	6.0 (4.2)
KM063	263 (186)	350 (247)	0.0084 (0.593)	3.2 (1.45)	3.4 (1.5)	15 (6.8)	25 (11)	7.0 (4.9)

* Weight for motor with leads (add approximately 0.2 lbs for terminal box).

Superior
Electric STEP MOTORS

KM06


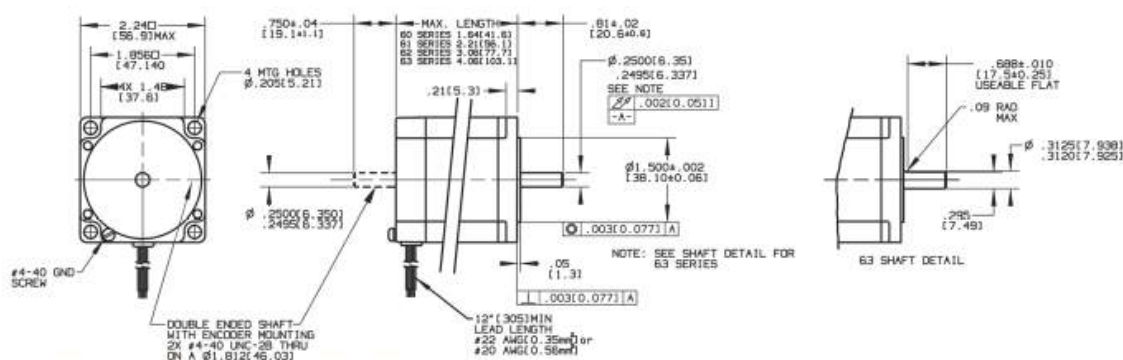
See next page for additional KM06 information

4-CONNECTION STEP MOTORS				
Model Number	Winding Specifications			
See Next page for options	Voltage (VDC)	Current (amperes)	Resistance (ohms)	Inductance (mH)
KM□060F02	3.8	1.1	3.6	16
KM□060F05	1.7	2.7	0.64	2.5
KM□060F08	1.1	4.0	0.28	1.0
KM□060F11	1.0	5.3	0.19	0.63
KM□061F02	5.2	1.1	4.9	30
KM□061F03	4.2	1.4	3.0	16
KM□061F05	2.3	2.7	0.85	4.6
KM□061F08	1.4	4.1	0.33	1.8
KM□061F11	1.2	5.4	0.23	1.1
KM□062F03	4.4	1.5	2.9	17
KM□062F05	3.1	2.5	1.3	7.1
KM□062F07	2.5	3.3	0.75	3.4
KM□062F08	2.0	4.1	0.49	2.5
KM□062F13	1.3	6.6	0.20	0.85
KM□063F03	6.1	1.5	4.1	24
KM□063F04	5.0	1.8	2.8	17
KM□063F07	3.4	3.3	1.0	6.2
KM□063F08	2.6	4.1	0.64	3.9
KM□063F13	1.9	6.6	0.28	1.5

6-CONNECTION STEP MOTORS								
Model Number	Winding Specifications							
	Unipolar				Bipolar Series			
See Next page for options	Voltage (VDC)	Current (amperes)	Resistance (ohms)	Inductance (mH)	Voltage (VDC)	Current (amperes)	Resistance (ohms)	Inductance (mH)
KM□060S03	2.9	1.5	1.9	4.0	4.0	1.0	3.9	16
KM□060S08	1.3	3.8	0.34	0.63	1.8	2.7	0.67	2.5
KM□061S02	6.4	1.0	6.4	18	9.0	0.70	13	70
KM□061S04	3.0	2.1	1.5	3.5	4.2	1.4	2.9	14
KM□061S08	1.7	3.8	0.46	1.1	2.4	2.7	0.92	4.4
KM□062S04	3.1	2.1	1.5	4.2	4.4	1.5	2.9	17
KM□062S06	2.8	3.0	0.94	2.5	3.9	2.1	1.9	10
KM□062S09	1.8	4.7	0.38	0.85	2.5	3.3	0.75	3.4
KM□063S04	4.3	2.1	2.0	6.0	6.0	1.5	4.0	24
KM□063S09	2.5	4.7	0.54	1.6	3.5	3.3	1.1	6.3

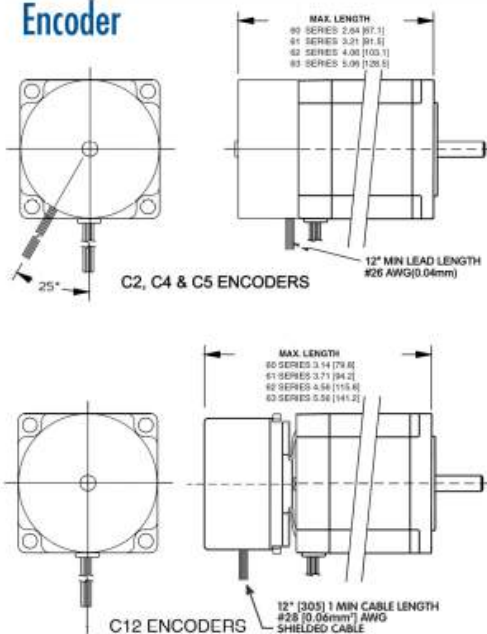
Superior Electric STEP MOTORS

KM06: Motor Dimensions



Add "E" to model number for double ended shaft. Example: M062-LS03E

Encoder



Add to Model Number:

- C2 200 lines per rev.
- C4 400 lines per rev.
- C5 500 lines per rev.
- C12 1250 lines per rev.

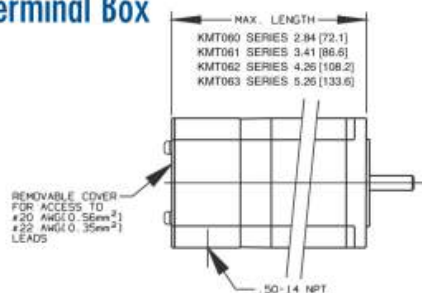
Outputs: A, B, Index,
 \bar{A} , \bar{B} , $\bar{\text{Index}}$,

Differential Line Drivers supplied

Example: KML063S09C5

For encoder specifications see pages 22-23

Terminal Box



Change to Model Number:

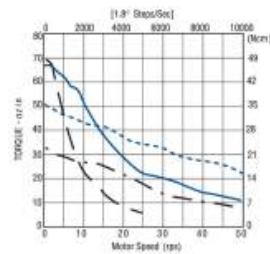
Example: KMT063S09 (triple stack, terminal box, six leads, 4.7 amp winding)

Superior
Electric STEP MOTORS

KM06

24 V Bipolar - Full Step

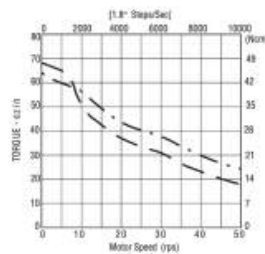
24 volt data measured with SS2000MD4 drive.



KM060F02 - 1.0 A peak
KM060F05 - 1.0 A peak
KM060F05 - 2.5 A peak
KM060F11 - 3.5 A peak

36 V Bipolar - Full Step

36 volt data measured with SS2000MD4 drive.



KM060F05 - 2.5 A peak
KM060F08 - 3.5 A peak

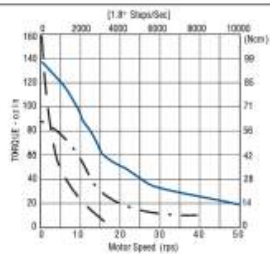
72 V Bipolar - Microstep

72 volt data measured with MD808 drive

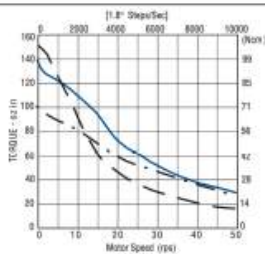
- The curves do not show system resonances which will vary with system mechanical parameters.
- Duty cycle is dependent on torque, speed, drive parameters, and heat sink conditions. Maximum case temperature is 100°C.

KM060

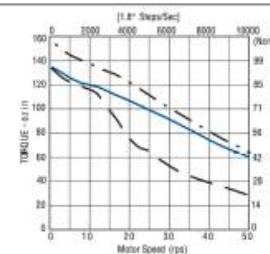
KM061



KM061F02 - 1.0 A peak
KM061F08 - 3.5 A peak
KM061F04 - 1.0 A peak

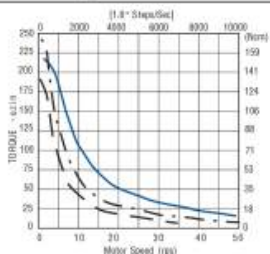


KM061F05 - 2.5 A peak
KM061F08 - 2.5 A peak
KM061F08 - 3.5 A peak

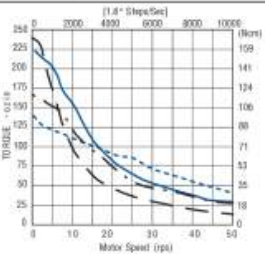


KM061F05 - 3.0 A peak
KM061F08 - 6.0 A peak
KM061F11 - 7.5 A peak

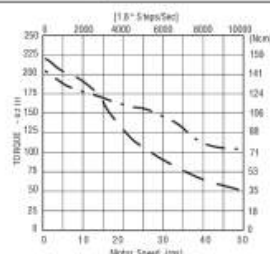
KM062



KM062F03 - 1.0 A peak
KM062F05 - 2.5 A peak
KM062F08 - 3.5 A peak

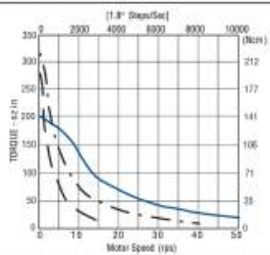


KM062F05 - 2.5 A peak
KM062F08 - 2.5 A peak
KM062F08 - 3.5 A peak
KM062F13 - 3.5 A peak

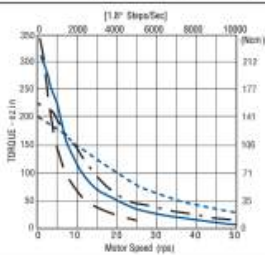


KM062F07 - 4.0 A peak
KM062F13 - 8.0 A peak

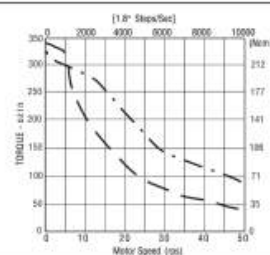
KM063



KM063F03 - 1.0 A peak
KM063F07 - 3.0 A peak
KM063F13 - 3.5 A peak



KM063F04 - 2.0 A peak
KM063F08 - 2.5 A peak
KM063F07 - 3.0 A peak
KM063F13 - 3.5 A peak



KM063F07 - 4.0 A peak
KM063F13 - 8.0 A peak

7.4 Tonatiuh_Data_Analyser.m

```
1 %% Tonatiuh_Data_Analyser v1.0 - Last modified (2017/06/09)
2 %
3 % Copyright© 2017 Centro de Investigaciones en Optica, A.C - Unidad
   Aguascalientes
4 % Grupo de Investigacion e Ingenieria en Energia Solar (GIIE-Sol)
5 % Ing. Felipe Cock Martinez - Dr. Manuel Ignacio Peña Cruz
6 %
7 % This MATLAB/Octave script allows you to plot Tonatiuh
8 % binary data resulting of any simulation.
9 %
10 % Features:
11 % *User interface dialog for file selection.
12 % *Allows to open files outside the working path.
13 % *Data file(s) (*.dat) automatic detection from selected Parameters (*.txt)
   file.
14 % *Enhanced computation time.
15 % *User interface dialog for surface selection when more than one are
   in the simulation data.
16 % *Plot bidimensional colormap of solar flux on the suface of interest.
17 % *Plot XY profile flux curves at the same plot.
18 % *Length and Power units are easy to change from the beginning variables.
19 %
20 % -*- texinfo -*-
21 %% @documentencoding UTF-8
22
23
24 % clc, clear all, close all;
25
26 function Tonatiuh_Data_Analyser ()
27 %clc, close all;
28 Language = 'Spanish'; % Language of plots and UI dialogs. (Language =
   'English'<default> | 'Spanish')
29 Color_Plotting = true;
30 Aks_For_Saving_Plots = false;
31 Length_Units = 'm';
32 Power_Units = 'W';
33 Bins_Factor = 0.75; % Change the amount of bins in the histogram by this
   factor. (Default=1)
34 Filter_Radius = 'filter'; % Gauusian filter radius at histogram.
   (Default='filter')
35 Energy_Radius = 68.2; % Set the percentage of total energy inside a radius
   around the irradiance peak.
36 Receiver_Diameter = 1; % Circular receiver diameter in meters.
37 Show_Boundary_Pixels = false; % Draw white dots in each pixel affected by the
   receiver shape boundary. (Antialiasing Computation)
38
39 %% User interface strings:
40 switch Language
41     case 'Spanish'
42         Strings.Flux_On_Target.Title = 'Distribución del flujo solar
   en el objetivo';
```

```
43         Strings.Flux_On_Target.Save_Prompt = ['¿Desea guardar la
gráfica: ' Strings.Flux_On_Target.Title '?'];
44         Strings.Flux_On_Target.X_Label = 'Posición x';
45         Strings.Flux_On_Target.Y_Label = 'Posición y';
46         Strings.Flux_On_Target.Colorbar_Label = 'Irradiancia';
47         Strings.Receiver_Mask.Title = ['Máscara de filtro para
receptor'];
48         Strings.Receiver_Mask.X_Label = 'Posición x';
49         Strings.Receiver_Mask.Y_Label = 'Posición y';
50         Strings.Receiver_Mask.Colorbar_Label = 'Irradiancia';
51         Strings.Flux_On_Receiver.Title = 'Distribución del flujo solar
en el receptor';
52         Strings.Flux_On_Receiver.X_Label = 'Posición x';
53         Strings.Flux_On_Receiver.Y_Label = 'Posición y';
54         Strings.Flux_On_Receiver.Colorbar_Label = 'Irradiancia';
55         Strings.Flux_Profiles.Title = 'Perfiles de irradiancia a lo
largo de los ejes X y Y del objetivo.';
56         Strings.Flux_Profiles.Save_Prompt = ['¿Desea guardar la
gráfica: ' Strings.Flux_Profiles.Title '?'];
57         Strings.Flux_Profiles.X_Label = 'Posición x';
58         Strings.Flux_Profiles.Y_Label = 'Irradiancia';
59         Strings.Flux_Profiles.Legend_Labels = ['Eje X'; 'Eje Y'];
60         Strings.Questions.Save_Plot_Title = 'Guardar Gráfica';
61         Strings.Questions.Yes = 'Sí';
62         Strings.Questions.No = 'No';
63         otherwise 'English'
64         Strings.Flux_On_Target.Title = 'Solar flux distribution on
target';
65         Strings.Flux_On_Target.Save_Prompt = ['Do you want to save the
plot: ' Strings.Flux_On_Target.Title '?'];
66         Strings.Flux_On_Target.X_Label = 'X Position';
67         Strings.Flux_On_Target.Y_Label = 'Y Position';
68         Strings.Flux_On_Target.Colorbar_Label = 'Irradiance';
69         Strings.Receiver_Mask.Title = ['Mask for receiver filtering'];
70         Strings.Receiver_Mask.X_Label = 'X Position';
71         Strings.Receiver_Mask.Y_Label = 'Y Position';
72         Strings.Receiver_Mask.Colorbar_Label = 'Irradiance';
73         Strings.Flux_On_Receiver.Title = 'Solar flux distribution on
receiver';
74         Strings.Flux_On_Receiver.X_Label = 'X Position';
75         Strings.Flux_On_Receiver.Y_Label = 'Y Position';
76         Strings.Flux_On_Receiver.Colorbar_Label = 'Irradiance';
77         Strings.Flux_Profiles.Title = 'Irradiance profiles along X and
Y axes of target';
78         Strings.Flux_Profiles.Save_Prompt = ['Do you want to save the
plot: ' Strings.Flux_Profiles.Title '?'];
79         Strings.Flux_Profiles.X_Label = 'X Position';
80         Strings.Flux_Profiles.Y_Label = 'Irradiance';
81         Strings.Flux_Profiles.Legend_Labels = ['X Axis'; 'Y Axis'];
82         Strings.Questions.Save_Plot_Title = 'Save Plot';
83         Strings.Questions.Yes = 'Yes';
84         Strings.Questions.No = 'No';
85     end
86
```

```
87
88
89
90
91 tic;% Init timer for computation time counter.
92 %% ----- Read Tonatiuh Binary dat File. Flux Map. -----
93
94 % User interface dialog for Parameters file selection.
95 Computation_Time = toc;% Stop computation timer while user action.
96 [parameters_file_name, data_path] = uigetfile('*_parameters.txt','Select
    Parameters file');
97 if parameters_file_name==0
98     disp('Nothing parameters file was selected.');
```

```
99     return
100 end
101 tic;% Restart computation timer.
102
103 % Guess the simulation base name from parameters_file_name.
104 file_name_base = parameters_file_name(1:length(parameters_file_name)-15);
105
106
107 if exist([data_path file_name_base '.dat'],'file')
108     data_file_name{1} = [file_name_base '.dat'];
109 elseif exist([data_path file_name_base '_1.dat'],'file');
```

```
110     i = 1;
111     while exist([data_path file_name_base '_' num2str(i) '.dat'],'file')
112         data_file_name{i} = [file_name_base '_' num2str(i) '.dat'];
113         i=i+1;
114     end
115 end
116
117 % Read simulation parameters from *_parameters.txt file
118 Parameters_File = fopen([data_path parameters_file_name]);
119
120 % Arrange _parameters.txt string in cells inside Parameters_Cell
121 Parameters_Cell = textscan(Parameters_File,'%s','delimiter','\n');
122 fclose(Parameters_File); % Close file after getting data
123
124 % Detect data boundaries inside the _parameters.txt file
125 start_lines=find(~cellfun(@isempty, strfind(Parameters_Cell{1}, 'START')));
126 end_lines=find(~cellfun(@isempty, strfind(Parameters_Cell{1}, 'END')));
127
128 % Define all Parameters and Surfaces of simulation
129 Parameters = Parameters_Cell{1}(start_lines(1)+1:end_lines(1)-1);
130 Number_of_Parameters = length(Parameters);
131 Surfaces = Parameters_Cell{1}(start_lines(2)+1:end_lines(2)-1);
132 Number_of_Surfaces = length(Surfaces);% Count the amount of surfaces
    considered in the simulation.
133
134 % Get PowerPerPhoton value at the end of parameters file
135 PowerPerPhoton = str2double(Parameters_Cell{1}{end_lines(2)+1});
136
137 % Select the surface of interest in case of more than one was considered in
    the simulation data.
```

174

```

175 %% ----- Photons impacts map 2D plot -----
176 % (SLOW - 50kPh/s) This plot consumes high cpu and gpu resources depending of
    the munber of photons.
177
178 %Impacts_On_Target = figure();
179 %if Number_of_Surfaces>1
180 %     plot(Photons(:,2),Photons(:,3),'.');
181 %else
182 %     plot(Photons(:,2),Photons(:,4),'.');
183 %end
184 %title('Impactos de los fotones en el receptor','FontSize', 12,
    'FontWeight','bold');
185 %xlabel(['Posición x ( ' Length_Units ')']);
186 %ylabel(['Posición y ( ' Length_Units ')']);
187
188 %% ----- Color flux map 2D plot -----
189
190 Flux_On_Target = figure();
191 if Number_of_Surfaces>1
192     Histogram_XY.data =
        ndhist([Photons(:,2),Photons(:,3)], 'filter', Filter_Radius, 'bins', Bins_Facto
            r);
193 else
194     Histogram_XY.data =
        ndhist([Photons(:,2),Photons(:,4)], 'filter', Filter_Radius, 'bins', Bins_Facto
            r);
195 end
196
197 if Color_Plotting
198     colormap jet;
199 else
200     colormap gray;
201 end
202 PowerBar = colorbar;
203
204 title(Strings.Flux_On_Target.Title, 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold');
205 xlabel([Strings.Flux_On_Target.X_Label ' ( ' Length_Units ')']);
206 ylabel([Strings.Flux_On_Target.Y_Label ' ( ' Length_Units ')']);
207
208 % Power scale bar calibration
209 set(get(PowerBar, 'title'), 'string', [Strings.Flux_On_Target.Colorbar_Label ' ( '
    Power_Units '/' Length_Units '^2)']);
210 Histogram_XY.xlim = get(get(Flux_On_Target, 'currentaxes'), 'xlim');
211 Histogram_XY.ylim = get(get(Flux_On_Target, 'currentaxes'), 'ylim');
212
213 Delta_x_size = range(Histogram_XY.xlim)/(size(Histogram_XY.data,2)-1);
214 Delta_y_size = range(Histogram_XY.ylim)/(size(Histogram_XY.data,1)-1);
215 Delta_area = Delta_x_size*Delta_y_size;
216 Max_Power = max(max(Histogram_XY.data))*PowerPerPhoton;
217 Max_Irradiance = Max_Power/Delta_area;
218 disp(['Maximum Irradiance at Receiver = ', num2str(Max_Irradiance), ' W/m^2']);
219 Min_Power = min(min(Histogram_XY.data))*PowerPerPhoton;
220 Min_Irradiance = Min_Power/Delta_area;
221

```

```
222 Flux_On_Target_Axes = get(Flux_On_Target, 'currentaxes');
223 set(Flux_On_Target_Axes, 'xlim', [-0.7, 0.7]);
224 set(Flux_On_Target_Axes, 'ylim', [-0.7, 0.7]);
225
226 Orig_ylim = get(PowerBar, 'ylim'); % Backup colorbar range
227 Orig_ytick = get(PowerBar, 'ytick'); % Backup colorbar ticks
228 set(PowerBar, 'yticklabelmode', 'auto'); % Set auto-labeling mode in colorbar
229 set(PowerBar, 'ytickmode', 'auto'); % Set auto-ticks in colorbar
230 set(PowerBar, 'ylim', [Min_Irradiance Max_Irradiance]); % Set the new boundaries
231 set(PowerBar, 'yticklabelmode', 'manual'); % Hold the new labels on colorbar
232 New_ytick = get(PowerBar, 'ytick'); % Store new ticks for following
    calculations
233 set(PowerBar, 'ylim', Orig_ylim); % Restore original limits of colorbar
234 x = Orig_ylim(2)/Max_Irradiance; % Mapping the scale for ticks matching
235 set(PowerBar, 'ytick', New_ytick*x); % Apply the fixer factor for ticks matching
236 drawnow();
237
238 %% Show energy radius circle
239
240 %% Centroid
241 Irradiance_XYI.xlen = size(Histogram_XY.data, 2);
242 Irradiance_XYI.ylen = size(Histogram_XY.data, 1);
243 Irradiance_XYI.data = [...
244     reshape(repmat([Histogram_XY.xlim(1):Delta_x_size:Histogram_XY.xlim(2)
245         ], [Irradiance_XYI.ylen, 1]), [(Irradiance_XYI.xlen*Irradiance_XYI.ylen)
246         1]),...
247     repmat([Histogram_XY.ylim(1):Delta_y_size:Histogram_XY.ylim(2)]',
248         [Irradiance_XYI.xlen 1]),...
249     reshape(Histogram_XY.data, [Irradiance_XYI.xlen*Irradiance_XYI.ylen
250         1]),...
251 ];
252 Centroid = centroid(Irradiance_XYI.data(:, 1:2), Irradiance_XYI.data(:, 3));
253 hold on;
254 plot(Centroid(1), Centroid(2), 'x', 'color', 'white');
255 % END Centroid
256
257 %% Generate receptor mask matrix
258
259 % Circular receptor:
260 Circle_Radius = Receiver_Diameter/2;
261 Circle_Centroid = Centroid; % [0, 0];
262 theta = linspace(0, 2*pi());
263 Offset = sqrt(Delta_x_size^2 + Delta_y_size^2)/2; % Offset of circle radius for
    antialiasing.
264 Receiver_Function = [Circle_Radius*cos(theta)
    + Circle_Centroid(1), Circle_Radius*sin(theta) + Circle_Centroid(2)];
265 plot(Receiver_Function(:, 1), Receiver_Function(:, 2), 'linewidth', 2, 'color', 'white');
266 Receiver_Mask = (Irradiance_XYI.data(:, 1) - Circle_Centroid(1)).^2 +
    (Irradiance_XYI.data(:, 2) - Circle_Centroid(2)).^2 <= (Circle_Radius-
    Offset).^2;
267 Receiver_Mask = Receiver_Mask * 1;
```



```
264 Boundary_Pixels = ((Irradiance_XYI.data(:,1) - Circle_Centroid(1)).^2 +  
    (Irradiance_XYI.data(:,2) - Circle_Centroid(2)).^2 > (Circle_Radius-  
    Offset).^2)...  
265 & ((Irradiance_XYI.data(:,1) - Circle_Centroid(1)).^2 +  
    (Irradiance_XYI.data(:,2) - Circle_Centroid(2)).^2 <  
    (Circle_Radius+Offset).^2);  
266 if Show_Boundary_Pixels  
267     plot(Irradiance_XYI.data(Boundary_Pixels,1),Irradiance_XYI.data(Bounda  
    ry_Pixels,2),'o','MarkerFaceColor','white'); % Plot Boundary_Pixels  
268 end  
269 Receiver_Mask(Boundary_Pixels) = (Circle_Radius-  
    distance(Irradiance_XYI.data(Boundary_Pixels,1:2),Circle_Centroid))/  
    (2*Offset)+0.5;  
270 Receiver_Mask_Figure = figure();  
271 contourf(reshape(Irradiance_XYI.data(:,1),Irradiance_XYI.ylen,Irradiance_XYI.x  
    len),...  
272     reshape(Irradiance_XYI.data(:,2),Irradiance_XYI.ylen,Irradiance_XYI.xl  
    en),...  
273     reshape(Receiver_Mask(:,1),Irradiance_XYI.ylen,Irradiance_XYI.xlen));  
274 if Color_Plotting  
275     colormap jet;  
276 else  
277     colormap gray;  
278 end  
279 PowerBar = colorbar;  
280 title(Strings.Receiver_Mask.Title,'FontSize', 16, 'FontWeight','bold');  
281 xlabel([Strings.Receiver_Mask.X_Label ' (' Length_Units ')']);  
282 ylabel([Strings.Receiver_Mask.Y_Label ' (' Length_Units ')']);  
283 set(get(PowerBar,'title'),'string',[Strings.Receiver_Mask.Colorbar_Label ' ('  
    Power_Units '/' Length_Units '^2)']);  
284 %% End receptor mask matrix  
285  
286  
287 %% Evaluate energy at receptor  
288 Flux_On_Receiver = figure();  
289 Effective_Irradiance =  
    (Irradiance_XYI.data(:,3).*Receiver_Mask(:,1).*(PowerPerPhoton/Delta_area))  
    ;  
290 Effective_Power = sum(Effective_Irradiance(:).*Delta_area);  
291 contourf(reshape(Irradiance_XYI.data(:,1),Irradiance_XYI.ylen,Irradiance_XYI.x  
    len),...  
292     reshape(Irradiance_XYI.data(:,2),Irradiance_XYI.ylen,Irradiance_XYI.xl  
    en),...  
293     reshape(Effective_Irradiance(:,1),Irradiance_XYI.ylen,Irradiance_XYI.x  
    len));  
294 if Color_Plotting  
295     colormap jet;  
296 else  
297     colormap gray;  
298 end  
299 PowerBar = colorbar;  
300 title(Strings.Flux_On_Receiver.Title,'FontSize', 16, 'FontWeight','bold');  
301 xlabel([Strings.Flux_On_Receiver.X_Label ' (' Length_Units ')']);  
302 ylabel([Strings.Flux_On_Receiver.Y_Label ' (' Length_Units ')']);
```



```

303 set(get(PowerBar, 'title'), 'string', [Strings.Receiver_Mask.Colorbar_Label ' ('
    Power_Units '/' Length_Units '^2)']);
304
305
306 %hold on
307 %theta = linspace(0,2*pi());
308 %radius = Energy_Radius/100;
309 %[Row_Values,Row_Indexes]=max(Histogram_XY.data);
310 %[Col_Value,Col_Index]=max(Row_Values);
311 %Peak_Index = [Row_Indexes(Col_Index), Col_Index];
312 %%
313
314 %%for rx=intX:size(Histogram_XY.data)(1)
315 %%    for ry=intY:size(Histogram_XY.data)(2)
316 %%        Histogram_XY.integral(rx,ry) =
            sum(Histogram_XY.data(rx:intX,1:intY);
317 %%    end
318 %%end
319 %
320 %% Map the index values of peak to length values
321 %% (Is important flip the indexes for Rows-Columns and X-Y matching)
322 %Circle_Centroid = mapping(    flip(Peak_Index),...
323 %    [1 1],...
324 %    flip(size(Histogram_XY.data)),...
325 %    [Histogram_XY.xlim(1) Histogram_XY.ylim(1)],...
326 %    [Histogram_XY.xlim(2) Histogram_XY.ylim(2)]...
327 %    )+[Delta_x_size/2 Delta_y_size/2];
328 %Circle_Radius = [0.3,0.3];
329 %plot(Circle_Radius(1)*cos(theta)
        +Circle_Centroid(1),Circle_Radius(2)*sin(theta)
        +Circle_Centroid(2),'linewidth',2,'color','white');
330 %plot(Circle_Centroid(1),Circle_Centroid(2),'x','color','white');
331
332 %%print (Flux_On_Target, [file_name_base "_Flux_On_Target" ".png"], "-dpng");
333
334
335 %%----- Irradiance profile plot across (0,0) -----
336 Flux_Profiles = figure();
337 if Number_of_Surfaces>1
338     Zero_Row = round(length(Histogram_XY.data(:,1))/2);
339     Zero_Col = round(length(Histogram_XY.data(1,:))/2);
340 else
341     Zero_Row = (0-Histogram_XY.ylim(1))/(Histogram_XY.ylim(2)-
        Histogram_XY.ylim(1))*(size(Histogram_XY.data(:,1),1)-1);
342     Zero_Col = (0-Histogram_XY.xlim(1))/(Histogram_XY.xlim(2)-
        Histogram_XY.xlim(1))*(size(Histogram_XY.data(1,:),2)-1);
343 end
344 %Zero_Row = (0-Histogram_XY.ylim(1))/(Histogram_XY.ylim(2)-
        Histogram_XY.ylim(1))*(size(Histogram_XY.data(:,1))(1)-1);
345 %Zero_Col = (0-Histogram_XY.xlim(1))/(Histogram_XY.xlim(2)-
        Histogram_XY.xlim(1))*(size(Histogram_XY.data(1,:))(2)-1);
346
347
348 Irradiance_x_Profile = Histogram_XY.data(ceil(Zero_Row),:);

```

```
349 Irradiance_y_Profile = Histogram_XY.data(:,ceil(Zero_Col));
350 if Color_Plotting
351     y_plot =
        plot([Histogram_XY.ylim(1):Delta_y_size:Histogram_XY.ylim(2)],Irradiance_y_
        Profile/max(Irradiance_y_Profile)*Max_Irradiance,'-', 'Color', 'blue');
352     hold on;
353     x_plot =
        plot([Histogram_XY.xlim(1):Delta_x_size:Histogram_XY.xlim(2)],Irradiance_x_
        Profile/max(Irradiance_x_Profile)*Max_Irradiance,'--', 'Color', 'red');
354 else
355     y_plot =
        plot([Histogram_XY.ylim(1):Delta_y_size:Histogram_XY.ylim(2)],Irradiance_y_
        Profile/max(Irradiance_y_Profile)*Max_Irradiance,'-', 'Color', [0.5 0.5
        0.5]);
356     hold on;
357     x_plot =
        plot([Histogram_XY.xlim(1):Delta_x_size:Histogram_XY.xlim(2)],Irradiance_x_
        Profile/max(Irradiance_x_Profile)*Max_Irradiance,'--', 'Color', 'k');
358 end
359 title(Strings.Flux_Profiles.Title, 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold');
360 xlabel([Strings.Flux_Profiles.X_Label ' (' Length_Units ')']);
361 ylabel([Strings.Flux_Profiles.Y_Label ' (' Power_Units '/' Length_Units
        ' ^2) ']);
362 legend('show');
363 legend(Strings.Flux_Profiles.Legend_Labels(1,:),Strings.Flux_Profiles.Legend_L
        abels(2,:));
364 %print (Flux_Profiles, [file_name_base "_Flux_Profiles" ".png"], "-dpng");
365 totalNumberOfPhotons = length(Photons);
366 estimatedPowerAtReceiver = totalNumberOfPhotons*PowerPerPhoton;
367
368 disp(['PowerPerPhoton = ', num2str(PowerPerPhoton), ' ' Power_Units])
369 disp(['Estimated total Power = ', num2str(estimatedPowerAtReceiver), ' '
        Power_Units])
370 disp(['Power inside the receptor: ' num2str(Effective_Power) ' '
        Power_Units]);
371 Computation_Time = Computation_Time + toc;
372 disp([ 'Total computation time was ' num2str(Computation_Time) ' seconds.']);
373
374 if Aks_For_Saving_Plots
375     btn = questdlg (Strings.Flux_On_Target.Save_Prompt,
        Strings.Questions.Save_Plot_Title,
        Strings.Questions.No, Strings.Questions.No);
376     if (strcmp(btn, Strings.Questions.Yes))
377         current_dir = cd(data_path);
378         %% This png device does not accept passing double quotes
        neither single quotes in filenames.
379         saveas(Flux_On_Target, [file_name_base ' ('
        Strings.Flux_On_Target.Title ').png'], 'png');
380         %% This svg device must to have double quotes or sigle quotes
        in filenames to prevent errors with the space characters.
381         saveas(Flux_On_Target, ["" file_name_base ' ('
        Strings.Flux_On_Target.Title ').svg'], 'svg');
```

```

382 %               try system(['inkscape "' file_name_base ' ('
Strings.Flux_On_Target.Title ').svg" --export-dpi=96 --export-png="'
file_name_base ' (' Strings.Flux_On_Target.Title ').svg.png"']); end
383             cd(current_dir);
384         end
385
386             btn = questdlg (Strings.Flux_Profiles.Save_Prompt,
Strings.Questions.Save_Plot_Title, Strings.Questions.Yes,
Strings.Questions.No, Strings.Questions.No);
387         if (strcmp(btn, Strings.Questions.Yes))
388             current_dir = cd(data_path);
389             %% This png device does not accept passing double quotes
neither sigle quotes in filenames.
390             saveas(Flux_Profiles, [file_name_base ' ('
Strings.Flux_Profiles.Title ').png'], 'png');
391             %% This svg device must to have double quotes or sigle quotes
in filenames to prevent errors with the space characters.
392             saveas(Flux_Profiles, ['"' file_name_base ' ('
Strings.Flux_Profiles.Title ').svg"'], 'svg');
393 %               try system(['inkscape "' file_name_base ' ('
Strings.Flux_Profiles.Title ').svg" --export-dpi=96 --export-png="'
file_name_base ' (' Strings.Flux_Profiles.Title ').svg.png"']); end
394             cd(current_dir);
395         end
396 end
397 end
398
399 function y = mapping (x,a,b,c,d)
400     y = (x-a)./(b-a).*(d-c)+c;
401 end
402
403 function d = distance (p1,p2)
404     d = sqrt((p1(:,1)-p2(:,1)).^2 + (p1(:,2)-p2(:,2)).^2);
405 end

```

7.5 Slope_Calculator_ANSYS_Data.m

```

406 %function Slope_Calculator_ANSYS_Data ()
407
408 Solids_Number = 1;
409
410 % User interface file selection dialog.
411 disp('User interface file selection dialog');
412 [data_file_name, data_path] = uigetfile('*.stl','Select the deformed STL
      geometry file (Binary)');
413 tic
414 if data_file_name==0
415     disp('Nothing data file was selected. ');
416     return
417 end
418 toc
419 disp('Finished. ');
420
421 % Read the results simulation data file
422 disp('Reading the results simulation data file');
423 [FaceIDs, Vertices, Normal_Vectors] = stlread([data_path data_file_name]);
424 toc
425 disp('Finished. ');
426
427 % Calculate the angles between each normal vector and z axis.
428 disp('Calculate the angles between each normal vector and z axis');
429 Theta =
      atan(sqrt(Normal_Vectors(:,1).^2+Normal_Vectors(:,2).^2)./Normal_Vectors(:,
      3));
430 toc
431 disp('Finished. ');
432
433 % Filter the vectors of interest
434 disp('Filter the vectors of interest');
435 condition = Theta < 0.5 & Theta >= 0;
436 Theta_Z_Vectors = Theta(condition);
437 toc
438 disp('Finished. ');
439
440 % Generate a histogram of Theta_Z_Vectors
441 disp('Generate a histogram of Theta_Z_Vectors');
442 [H,X]=hist(Theta_Z_Vectors ,length(Theta_Z_Vectors)/100);
443 figure();
444 plot(X,H);
445 toc
446 disp('Finished. ');
447
448 % Reshape the normal vectors matrix to split the array in the in the number of
      solids.
449 disp('Reshaping the normal vectors matrix to split the array in the in the
      number of solids. ');

```

```
450 Solids_Z_Vectors =  
    reshape(Theta_Z_Vectors,size(Theta_Z_Vectors,1)/Solids_Number,Solids_Number  
    );  
451 toc  
452 disp('Finished.');
```

453

454 % Plot all solids normal vectors in a single plot.

```
455 disp('Plotting all solids normal vectors in a single plot.');
```

456 figure();

```
457 for f=1:size(Solids_Z_Vectors,2)  
458     subplot(5,5,f);  
459     plot(hist(Solids_Z_Vectors(:,f),size(Solids_Z_Vectors,1)/10));  
460     legend(num2str(max(Solids_Z_Vectors(:,f))));  
461 end  
462 toc  
463 disp('Finished.');
```

7.6 STL_Splitter.m

```
464 %% Tonatiuh_Component_CAD_Replacer v3.0 - Last modified (2017/09/04)
465 %
466 % Copyright© 2017 Centro de Investigaciones en Optica, A.C - Unidad
    Aguascalientes
467 % Grupo de Investigacion e Ingenieria en Energia Solar (GIIE-Sol)
468 % Ing. Felipe Cock Martinez
469 %
470 % This MATLAB/Octave script allows you to split a CAD file (*.stl) in the
    number
471 % of separate parts within the file that are not in contact with each other
    and
472 % then save each one into a new file inside the selected output folder.
473 %
474 % Features:
475 % *User interface dialog for file selection.
476 % *Allows to open files outside the working path.
477 % *Enhanced computation time.
478 %
479 % -*- texinfo -*-
480 %% @documentencoding UTF-8
481
482 function varargout = STL_Splitter(data_file_fullname)
483
484     if not(exist('data_file_fullname','var'))
485         % User interface file selection dialog.
486         disp('User interface STL file selection dialog');
487         [data_file_name, data_path] = uigetfile('*.stl','Select the
    deformed STL geometry file Binary');
488         if isequal(data_file_name,0)
489             disp('No data file was selected. ');
490             return
491         else
492             data_file_fullname = [data_path data_file_name];
493             [data_path, data_file_name, data_file_ext] =
    fileparts(data_file_fullname);
494             end
495         else
496             [data_path, data_file_name, data_file_ext] =
    fileparts(data_file_fullname);
497             end
498
499         [FaceIDs, Vertices, normalVertexList] = stlread(data_file_fullname);
500         [Unique U_Idxs Groups] = unique(Vertices,'rows');
501         Groups=reshape(Groups,3,length(Groups)/3)';
502
503         Total_Real_Vertex = length(Unique);
504         H = waitbar (0, 'Analyzing CAD...');
505         if Total_Real_Vertex > 100
506
                                                    Progress_Update    =
    (1:round(Total_Real_Vertex/100):Total_Real_Vertex);
```

```

507         Progress_Update = [Progress_Update Total_Real_Vertex];
508     else
509         Progress_Update = (1:Total_Real_Vertex);
510     end
511
512     %     profile on;
513     Melted = [];
514     for RV=1:Total_Real_Vertex
515         if RV==Progress_Update(1)
516             Progress_Update(1)=[];
517             waitbar (RV/Total_Real_Vertex, H);
518         end
519         if not(ismember(RV,Melted))
520             Selected_Rows = (Groups==RV);
521             Selected_Rows = (Selected_Rows(:,1)|
Selected_Rows(:,2)|Selected_Rows(:,3));
522             Melt = unique(Groups(Selected_Rows==1,:));
523             Melted = sort([Melted Melt(2:end)']);
524             for j=2:size(Melt,1)
525                 Groups(Groups==Melt(j))=Melt(1);
526             end
527         end
528     end
529 %     profile off;
530 %     data = profile ("info");
531 %     profile clear;
532 %     profshow (data, 10);
533     close(H);
534
535     [SolidsIDs SolidsIDs_Idx] = unique(Groups);
536     SID = sortrows([SolidsIDs_Idx, SolidsIDs]);
537     SolidsIDs = SID(:,2);
538
539     Total_Solids = size(SolidsIDs,1);
540     Save_Outputs = strcmp(questdlg('Do you want to save each splitted CAD
part in a .stl file?'),'Yes');
541     if Save_Outputs
542         OutputFolder = uigetdir(data_path, 'Select the directory for
save the output STL files.');
```

```
557                                     stlwrite(fullfile(OutputFolder,  
[data_file_name ' (Part ' num2str(j) ').stl']), Solid(j).FaceIDs,  
Solid(j).Vertices);  
558                                     end  
559                                     end  
560                                     end  
561  
562     varargout = cell(1,nargout);  
563     switch nargout  
564         case 1  
565             varargout{1} = Solid;  
566         case 2  
567             varargout{1} = Solid.FaceIDs;  
568             varargout{2} = Solid.Vertices;  
569         case 3  
570             varargout{1} = Solid.FaceIDs;  
571             varargout{2} = Solid.Vertices;  
572             varargout{3} = Solid.normalVertexList;  
573         otherwise  
574             return;  
575     end  
576 end  
577  
578 end
```


7.7 Set_Relative_Reference_ANSYS_Data.m

```
579 %% Set_Relative_Reference_ANSYS_Data v2.0 - Last modified (2017/09/04)
580 %
581 % Copyright© 2017 Centro de Investigaciones en Optica, A.C - Unidad
    Aguascalientes
582 % Grupo de Investigacion e Ingenieria en Energia Solar (GIIE-Sol)
583 % Ing. Felipe Cock Martinez
584 %
585 % This MATLAB/Octave script allows you to correct the absolut coordinates of
    one
586 % or a set of *.stl files to a new reference system for each part, located in
587 % the centroid of it or located at the original reference centroid of ths
    piece
588 % obtained from the sections of CAERep.xml ANSYS file that matches with
    Part_Tag
589 % string.
590 %
591 % Features:
592 % *User interface dialog for file selection.
593 % *Allows to open files outside the working path.
594 % *Enhanced computation time.
595 %
596 % -*- texinfo -*-
597 %% @documentencoding UTF-8
598
599 function Set_Relative_Reference_ANSYS_Data()
600
601     OutputFolder='Corrected_Coord/';
602     Part_Tag = 'Facetas';
603
604     % User interface file selection dialog.
605     disp('User interface file selection dialog');
606     [data_file_name, data_path] = uigetfile('*.stl','Select the deformed
    STL geometry or geometries file(s) (Binary(es))','Multiselect',"on");
607     tic
608     if isequal(data_file_name,0)
609         disp('No data file was selected.');
```

```
610         return
611     end
612     toc
613     disp('Finished.');
```

```
614
615     disp('User interface Coordinatate System setting method selection
    dialog');
```

```
616     CS_Method_List = {"XML","Centroids"};
617     [CS_Method      CS_Method_Ok]=
    listdlg("ListString",CS_Method_List,"SelectionMode","Single","ListSize",[0
    50],"PromptString","Select the new reference Coordinatate System setting
    method:");
618     if isequal(CS_Method_Ok,0)
619         disp('No method was selected.');
```

```

620         return
621     end
622
623     if CS_Method == 1
624         disp('User interface xml properties file selection dialog');
625         [xml_properties_file_name, xml_properties_path] =
uigetfile('*.xml',"Select the properties data file i.e. 'CAERep.xml' ");
626         if isequal(xml_properties_file_name,0)
627             disp('No xml data file was selected.');
```

return

```

628         end
629     end
630
631     pkg load io;
632     try
633         DOM_xml = xmlread([xml_properties_path
xml_properties_file_name]);
634     catch err
635         ERROR = err;
636         if ((exist('xercesImpl-2.11.0.jar','file')==2) &&
(exist('xml-apis-1.4.01.jar','file')==2))
637             xerces_file_names = {'xercesImpl-
2.11.0.jar','xml-apis-1.4.01.jar'};
638             xerces_path = pwd;
639         else
640             [xerces_file_names, xerces_path] =
uigetfile('*.jar',"Select xercesImpl.jar and xml-apis.jar
files.", "Multiselect", "on");
641             if isequal(xerces_file_names,0)
642                 disp('No java files were selected.');
```

return

```

643             end
644         end
645     end
646     javaaddpath([xerces_path xerces_file_names{1}]);
647     javaaddpath([xerces_path xerces_file_names{2}]);
648
649     DOM_xml = xmlread([xml_properties_path
xml_properties_file_name]);
650     end
651
652     if isjava(DOM_xml)
653         Part_Names = [];
654         Init_Centroids = [];
655         Parts_of_Interest = 1;
656
DOM_xml.getElementsByTagName('AssemblyAttributes').item(0);
657
Assembly =
Part =
Assembly.getElementsByTagName('PartAttributes');
658         for Part_Index = 0:Part.getLength()-1
659             1;
660         end
661         for Part_Index = 0:Part.getLength()-1
662             Caption =
Part.item(Part_Index).getElementsByTagName('Caption').item(0).getTextConten
t();

```

```

663         if isequal(Caption,Part_Tag)
664             Part_Names(Parts_of_Interest,:) =
        strsplit(Part.item(Part_Index).getElementsByTagName('Caption').item(1).getT
        extContent(),'\'){end};
665             Centroid =
        Part.item(Part_Index).getElementsByTagName('Centroid').item(0);
666             Init_Centroid = eval(["["
        Centroid.getFirstChild().getTextContent "];"]);
667             Init_Centroids(Parts_of_Interest,:) =
        Init_Centroid;
668             Parts_of_Interest++;
669         end
670     end
671 end
672 end
673
674 try
675     data_file_name{1};
676 catch
677     % data_file_name_1=data_file_name;
678     % clear data_file_name;
679     % data_file_name{1}=data_file_name_1;
680     % clear data_file_name_1;
681     ans=data_file_name;
682     clear data_file_name;
683     data_file_name{1}=ans;
684 end
685
686 if length(data_file_name)==1
687     if strcmp(questdlg('Do you want to split the selected CAD
        file?'),'Yes')
688         Solid = STL_Splitter([data_path data_file_name{1}]);
689         [ans data_file_name{1}
        data_file_ext{1}]=fileparts(data_file_name{1});
690         for n=length(Solid):-1:1
691             data_file_name{n}=[data_file_name{1} ' (Part '
        num2str(n) ') ' data_file_ext{1}];
692         end
693     end
694 end
695
696 if not(exist('Solid','var'))
697     for FileIndex=1:length(data_file_name)
698         % Read the results simulation data file and append to
        Solid structure.
699         [Solid(FileIndex).FaceIDs, Solid(FileIndex).Vertices,
        Solid(FileIndex).normalVertexList] =
        stlread([data_path
        data_file_name{FileIndex}]);
700
701         %figure();
702         %title('Original');
703         %plot3(Vertices(:,1),Vertices(:,2),Vertices(:,3));
704     end
705 end

```

```
706
707     for FileIndex=1:length(Solid)
708
709         switch CS_Method
710             case 1
711                 New_Coord_Sys = Init_Centroids(FileIndex,:);
712             case 2
713                 Min_V = min(Solid(FileIndex).Vertices);
714                 Max_V = max(Solid(FileIndex).Vertices);
715                 Shape_Dimensions = Max_V-Min_V;
716                 New_Coord_Sys = Shape_Dimensions./2 + Min_V;
717             end
718
719             Solid(FileIndex).Vertices = Solid(FileIndex).Vertices -
New_Coord_Sys;
720
721             %figure();
722             %title('Corrected');
723             %plot3(Vertices(:,1),Vertices(:,2),Vertices(:,3));
724
725             if exist([data_path OutputFolder], 'dir')
726                 stlwrite(fullfile(fullfile(data_path,OutputFolder),dat
a_file_name{FileIndex}),
Solid(FileIndex).FaceIDs,
Solid(FileIndex).Vertices)
727             else
728                 mkdir(data_path,OutputFolder);
729                 stlwrite(fullfile(fullfile(data_path,OutputFolder),dat
a_file_name{FileIndex}),
Solid(FileIndex).FaceIDs,
Solid(FileIndex).Vertices)
730             end
731         end
732 end
```

7.8 Tonatiuh_Component_CAD_Replacer.m

```
733 %% Tonatiuh_Component_CAD_Replacer v3.0 - Last modified (2017/08/26)
734 %
735 % Copyright© 2017 Centro de Investigaciones en Optica, A.C - Unidad
    Aguascalientes
736 % Grupo de Investigacion e Ingenieria en Energia Solar (GIIE-Sol)
737 % Ing. Felipe Cock Martinez
738 %
739 % This MATLAB/Octave script allows you to insert multiple CAD files (*.stl)
740 % into a Tonatiuh component file (*.tcmp).
741 %
742 % Features:
743 % *User interface dialog for file selection.
744 % *Allows to open files outside the working path.
745 % *Enhanced computation time.
746 %
747 % -*- texinfo -*-
748 %% @documentencoding UTF-8
749
750 %clc; clear all;
751 function Tonatiuh_Component_CAD_Replacer (Vertices, normalVertexList,
    varargin)
752     % Setting default values:
753     Quiet = false;
754
755     % Checking for additional arguments.
756     for i = 1:numel (varargin)
757         arg = varargin{i};
758         if (ischar (arg))
759             arg = strtrim (arg);
760             if (strcmp (arg, '-quiet'))
761                 Quiet = true;
762             end
763         end
764     end
765
766     if not(Quiet) printf('User interface Tonatiuh component file selection
    dialog\n'); end
767     [tcmp_file_name, tcmp_path] = uigetfile('*.tcmp','Select the tonatiuh
    component file. (*.tcmp)');
768     if isequal(tcmp_file_name,0)
769         if not(Quiet) printf('No component file was selected.\n'); end
770         return
771     end
772     tic % Start timer.
773
774     % Read Tonatiuh component data from selected file.
775     if not(Quiet) printf('Reading Tonatiuh component data from selected
    file.\n'); end
776     SuperTxt = fileread([tcmp_path tcmp_file_name]);
777     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n', toc); end
```

```
778
779     % Search for CAD data fields in the Tonatiuh's file.
780     if not(Quiet) printf('Searching for CAD data fields in the Tonatiuh''s
file.\n'); end
781     SuperTxt = Search_CAD_Fields(SuperTxt, '-clean');
782     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc); fflush(stdout); end
783
784     % Save a copy of the Tonatiuh file without CAD data.
785     New_File_Name = [tmp_path tmp_file_name(1:end-5) '.clean.tmp'];
786     if not(Quiet) printf('Saving a copy of the Tonatiuh file without CAD
data in: %s\n', New_File_Name); end
787     New_File = fopen(New_File_Name, 'w');
788     fprintf(New_File, '%s', SuperTxt);
789     fclose(New_File);
790     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc); fflush(stdout); end
791
792     % Input arguments validation.
793     if not(exist('Vertices') && exist('normalVertexList'))
794         if not(Quiet) printf('Selecting the CAD(s) file(s) to insert
into the Tonatiuh component\n'); end
795         [data_file_name, data_path] = uigetfile('*.stl','Select the
CAD(s) file(s) to insert into the Tonatiuh component
(Binary(es))','Multiselect','on');
796         if isequal(data_file_name,0)
797             if not(Quiet) printf('No data file was selected.\n');
end
798             return
799         end
800         try
801             data_file_name{1};
802         catch
803             data_file_name_1=data_file_name;
804             clear data_file_name;
805             data_file_name{1}=data_file_name_1;
806             clear data_file_name_1;
807         end
808         if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc);
fflush(stdout); end
809         Number_of_Files = length(data_file_name);
810         if not(Quiet) printf('Reading the selected CAD files:\n'); end
811         for FileIndex=1:Number_of_Files
812             % Read the results simulation data file.
813             if not(Quiet) printf('Reading file %d of
%d\n',FileIndex,Number_of_Files); end
814             fflush(stdout);
815             [Solid(FileIndex).FaceIDs, Solid(FileIndex).Vertices,
Solid(FileIndex).normalVertexList]
= stlread([data_path
data_file_name{FileIndex}]);
816         end
817         if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc);
fflush(stdout); end
818     end
819
```

```

820         if not(Quiet) printf('Searching for CAD data fields in the Tonatiuh''s
file.\n'); end
821     [      SuperTxt,...
822         v1VertexList_InitIdxs,...
823         v2VertexList_InitIdxs,...
824         v3VertexList_InitIdxs,...
825         normalVertexList_InitIdxs...
826         v1VertexList_EndIdxs,...
827         v2VertexList_EndIdxs,...
828         v3VertexList_EndIdxs,...
829         normalVertexList_EndIdxs
830     ] = Search_CAD_Fields(SuperTxt);
831     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc); fflush(stdout); end
832
833     % Sorting the vertex array to fit Tonatiuh's format.
834     if not(Quiet) printf('Sorting the vertex array to fit Tonatiuh''s
format.\n'); end
835     Solids_Total = size(Solid,2);
836     for i=1:Solids_Total
837         Solid(i).v1VertexList=Solid(i).Vertices(1:3:end,:);
838         Solid(i).v2VertexList=Solid(i).Vertices(2:3:end,:);
839         Solid(i).v3VertexList=Solid(i).Vertices(3:3:end,:);
840     end
841     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc); fflush(stdout);
fflush(stdout); end
842
843 %     assignin('base','Vertices',Vertices);
844 %     assignin('base','SuperTxt',SuperTxt);
845 %     for i=1:3
846 %         eval(['assignin('base','v' num2str(i) 'VertexList',v'
num2str(i) 'VertexList')]);
847 %         eval(['assignin('base','v' num2str(i) 'VertexList_InitIdxs',v'
num2str(i) 'VertexList_InitIdxs')]);
848 %         eval(['assignin('base','v' num2str(i) 'VertexList_EndIdxs',v'
num2str(i) 'VertexList_EndIdxs')]);
849 %     end
850
851     if not(Quiet) printf('Formating vertex lists.\n'); end
852     for i=1:Solids_Total
853         Solid(i).v1VertexList_String =
strrep(num2str(Solid(i).v1VertexList,'%0.16g %0.16g %0.16g,')(1:end-
1),',',[', ' char(10)]);
854         Solid(i).v2VertexList_String =
strrep(num2str(Solid(i).v2VertexList,'%0.16g %0.16g %0.16g,')(1:end-
1),',',[', ' char(10)]);
855         Solid(i).v3VertexList_String =
strrep(num2str(Solid(i).v3VertexList,'%0.16g %0.16g %0.16g,')(1:end-
1),',',[', ' char(10)]);
856         Solid(i).normalVertexList_String =
strrep(num2str(Solid(i).normalVertexList,'%0.16g %0.16g %0.16g,')(1:end-
1),',',[', ' char(10)]);
857         fflush(stdout);
858     end
859     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc); fflush(stdout); end

```

```
860
861     if not(Quiet) printf('Preparing data to instert in Tonatiuh file.\n');
862     end
863     SuperTxt_CAD = '';
864     for i=1:Solids_Total
865         if i>1
866             CAD_Header = SuperTxt(normalVertexList_EndIdxs(i-
867 1):v1VertexList_InitIdxs(i)-1);
868         else
869             CAD_Header = SuperTxt(1:v1VertexList_InitIdxs(i)-1);
870         end
871         if i<Solids_Total
872             SuperTxt_CAD = [ SuperTxt_CAD...
873                             CAD_Header...
874                             Solid(i).v1VertexList_String...
875                             SuperTxt(v1VertexList_EndIdxs(i):v2VertexList_
876 InitIdxs(i)-1)...
877                             Solid(i).v2VertexList_String...
878                             SuperTxt(v2VertexList_EndIdxs(i):v3VertexList_
879 InitIdxs(i)-1)...
880                             Solid(i).v3VertexList_String...
881                             SuperTxt(v3VertexList_EndIdxs(i):normalVertexL
882 ist_InitIdxs(i)-1)...
883                             Solid(i).normalVertexList_String...
884 ];
885         else
886             SuperTxt_CAD = [ SuperTxt_CAD...
887                             CAD_Header...
888                             Solid(i).v1VertexList_String...
889                             SuperTxt(v1VertexList_EndIdxs(i):v2VertexList_
890 InitIdxs(i)-1)...
891                             Solid(i).v2VertexList_String...
892                             SuperTxt(v2VertexList_EndIdxs(i):v3VertexList_
893 InitIdxs(i)-1)...
894                             Solid(i).v3VertexList_String...
895                             SuperTxt(v3VertexList_EndIdxs(i):normalVertexL
896 ist_InitIdxs(i)-1)...
897                             Solid(i).normalVertexList_String...
898                             SuperTxt(normalVertexList_EndIdxs(i):end)...
899 ];
900         end
901     end
902     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc); fflush(stdout); end
903     if not(Quiet) printf('Saving Tonatiuh file.\n'); end
904     New_File = fopen([tcmp_path tcmp_file_name(1:end-5)
905 '.clean.tcmp'],'w');
906     fprintf(New_File, '%s', SuperTxt_CAD);
907     fclose(New_File);
908     if not(Quiet) printf('Finished at %d\n\n',toc); fflush(stdout); end
909     fflush(stdout);
910 end
```



```
905
906 function
    [SuperTxt,v1VertexList_InitIdxs,v2VertexList_InitIdxs,v3VertexList_InitIdxs
    ,normalVertexList_InitIdxs,v1VertexList_EndIdxs,v2VertexList_EndIdxs,v3VertexList_EndIdxs,norm
    alVertexList_EndIdxs] = Search_CAD_Fields (SuperTxt,
    varargin) % Optional arguments (... , '-clean' , '-verbose').
907     %% Setting default values:
908     Clean = false;
909     Verbose = false;
910
911     for i = 1:numel (varargin)
912         arg = varargin{i};
913         if (ischar (arg))
914             arg = strtrim (arg);
915             if (strcmp (arg, '-clean'))
916                 Clean = true;
917             elseif (strcmp (arg, '-vervose'))
918                 Verbose = true;
919             end
920         end
921     end
922
923     % Identify CAD data starting points.
924     v1VertexList_InitIdxs = strfind(SuperTxt,'v1VertexList [ ')+15;
925     v2VertexList_InitIdxs = strfind(SuperTxt,'v2VertexList [ ')+15;
926     v3VertexList_InitIdxs = strfind(SuperTxt,'v3VertexList [ ')+15;
927     normalVertexList_InitIdxs = strfind(SuperTxt,'normalVertexList [ ')+19;
928
929     % Define a logical array to set the indexes that will survive.
930     SuperTxt_Elements = true(1, size(SuperTxt, 2));
931
932     % Search the CAD data ending point for each data set.
933     Solids_Total = size(v1VertexList_InitIdxs,2);
934     for i=1:Solids_Total
935         if Verbose
936             printf('Looking for CAD data fields... (%d/%d)',
937                 num2str(i), num2str(i_Total));
938             fflush(stdout);
939             v1VertexList_EndIdxs(i) =
940                 index(SuperTxt(v1VertexList_InitIdxs(i):v2VertexList_InitIdxs(i)),']') +
941                 v1VertexList_InitIdxs(i) - 2;
942             v2VertexList_EndIdxs(i) =
943                 index(SuperTxt(v2VertexList_InitIdxs(i):v3VertexList_InitIdxs(i)),']') +
944                 v2VertexList_InitIdxs(i) - 2;
945             v3VertexList_EndIdxs(i) =
946                 index(SuperTxt(v3VertexList_InitIdxs(i):normalVertexList_InitIdxs(i)),']') +
947                 v3VertexList_InitIdxs(i) - 2;
948             if i<Solids_Total
949                 normalVertexList_EndIdxs(i) =
950                     index(SuperTxt(normalVertexList_InitIdxs(i):v1VertexList_InitIdxs(i+1)),']') +
951                     normalVertexList_InitIdxs(i) - 2;
952             else
953                 normalVertexList_EndIdxs(i) =
954                     index(SuperTxt(normalVertexList_InitIdxs(i):end),']') +
955                     normalVertexList_InitIdxs(i) - 2;
956             end
957         end
958     end
959 end
```

```
945                                     normalVertexList_EndIdxs(i) =  
index(SuperTxt(normalVertexList_InitIdxs(i):end), '])' +  
normalVertexList_InitIdxs(i) - 2;  
946                                     end  
947                                     SuperTxt_Elements([v1VertexList_InitIdxs(i):v1VertexList_EndId  
xs(i)]) = false;  
948                                     SuperTxt_Elements([v2VertexList_InitIdxs(i):v2VertexList_EndId  
xs(i)]) = false;  
949                                     SuperTxt_Elements([v3VertexList_InitIdxs(i):v3VertexList_EndId  
xs(i)]) = false;  
950                                     SuperTxt_Elements([normalVertexList_InitIdxs(i):normalVertexLi  
st_EndIdxs(i)]) = false;  
951                                     end  
952  
953                                     if Clean  
954                                         % Remove all CAD data from the string.  
955                                         SuperTxt = SuperTxt(:, SuperTxt_Elements);  
956                                     end  
957 end
```

7.9 Tabla de costos de las piezas de HORACIO V

Cantidad	Pieza	Precio por Cantidad	Unidades	Cantidad por pieza	Costo por pieza	Costo total	Categoría	Referencia
25	Facetas	\$9.85	USD/m²	0.3600 m²	\$3.55	\$88.65	Vidrios	https://www.alibaba.com/product-detail/3mm-high-reflective-CSP-Solar-Mirror_60694685968.html?spm=a2700.7724838.2017115.1.3e0445ZilBWN
75	Ventosa - Disco	\$5.00	USD/kg	0.03 kg	\$0.15	\$11.25	Elásticos	Estimado según el costo del material en un producto final similar.
75	Tornillo ¼ (HBOLT 0.2500-20x3x0.75-N)	\$0.15	USD/Pza.	1.00	\$0.15	\$11.40	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
225	Arandela ¼ (Preferred Narrow FW 0.25)	\$0.02	USD/Pza.	1.00	\$0.02	\$4.17	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
150	Tuerca ¼ (HJNUT 0.2500-20-D-N)	\$0.02	USD/Pza.	1.00	\$0.02	\$3.74	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
25	Perfil para base de face-ta (Horizontal)	\$823.52	USD/Ton.	0.0005 Ton.	\$0.41	\$10.29	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
25	Perfil para base de face-ta (Vertical)	\$823.52	USD/Ton.	0.0004 Ton.	\$0.32	\$8.03	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
75	Arandela Elástica de Compresión	\$3.80	USD/m	0.03 m	\$0.11	\$8.55	Elásticos	https://www.alibaba.com/product-detail/Black-epdm-extrusion-solid-rubber-cord_60690628919.html?spm=a2700.7724838.2017115.10.282485420N-Tjf4&s=p
5	Perfil para módulos re-flectores (Largo)	\$823.52	USD/Ton.	0.0043 Ton.	\$3.54	\$17.71	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
5	Perfil para módulos re-flectores (Corto)	\$823.52	USD/Ton.	0.0037 Ton.	\$3.05	\$15.24	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
75	Tornillo ¼ (HBOLT 0.2500-20x4.5x0.75-N)	\$0.19	USD/Pza.	1.00	\$0.19	\$14.03	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
2	Perfil de soporte verti-cal	\$823.52	USD/Ton.	0.0660 Ton.	\$54.35	\$108.70	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
20	Eje_roscaado ½ (Largo 20'')	\$8.50	USD/Pza.	0.50	\$4.25	\$85.01	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf

Cantidad	Pieza	Precio por Cantidad	Unidades	Cantidad por pieza	Costo por pieza	Costo total	Categoría	Referencia
20	Eje_roscado ½ (Corto 12'')	\$8.50	USD/Pza.	0.33	\$2.83	\$56.67	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
128	Arandela ½ (Preferred Wide FW 0.5)	\$0.06	USD/Pza.	1.00	\$0.06	\$7.80	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
84	Arandela Seguridad ½ (Regular LW 0.5)	\$0.06	USD/Pza.	1.00	\$0.06	\$5.30	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
124	Tuerca ½ (HNUT 0.5000-13-D-N)	\$0.14	USD/Pza.	1.00	\$0.14	\$16.95	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
2	Bloque Contrapeso	\$0.08	USD/kg	85.60 kg	\$7.14	\$14.28	Construcción	Mezcla de 1 bulto de cemento (\$179) con 6 cubetas de arena de 18 litros (\$144/m³)=250kg Aprox.
1	Soporte Motor Elevación	\$863.57	USD/Ton.	0.0056 Ton.	\$4.84	\$4.84	Aceros	
4	Tornillo ½ (HBOLT 0.5000-20x5x1.25-C)	\$1.19	USD/Pza.	1.00	\$1.19	\$4.77	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
2	FYJ 70 TF	\$43.85	USD/Pza.	1.00	\$43.85	\$87.70	Rodamientos	Representaciones Industriales Rodríguez, S.A. de C.V.
8	Tornillo ⅝ (HBOLT 0.6250-11x6x1.5-N)	\$2.12	USD/Pza.	1.00	\$2.12	\$16.95	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
16	Arandela ⅝ (Preferred Narrow FW 0.625)	\$0.09	USD/Pza.	1.00	\$0.09	\$1.51	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
8	Arandela Seguridad ⅝ (Regular LW 0.625)	\$0.12	USD/Pza.	1.00	\$0.12	\$0.95	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
8	Tuerca ⅝ (HNUT 0.6250-11-D-N)	\$0.30	USD/Pza.	1.00	\$0.30	\$2.39	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
1	Flecha Motriz Horizontal	\$810.59	USD/Ton.	0.0160 Ton.	\$12.97	\$12.97	Aceros	
1	Tubo de acero ANSI SCH40 (Hor. Interno 2")	\$1,149.24	USD/Ton.	0.0101 Ton.	\$11.55	\$11.55	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
2	Flange ANSI 150 SlipOn (2'')	\$23.40	USD/Pza.	1.00	\$23.40	\$46.80	Aceros	SolidWorks Costing Feature

Cantidad	Pieza	Precio por Cantidad	Unidades	Cantidad por pieza	Costo por pieza	Costo total	Categoría	Referencia
1	Viga de soporte horizontal (SCH40 4'')	\$1,149.24	USD/Ton.	0.0177 Ton.	\$20.32	\$20.32	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
1	Abrazadera en Manto	\$863.57	USD/Ton.	0.0059 Ton.	\$5.10	\$5.10	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
2	Ángulo 2'' (1 angle_ai)	\$725.83	USD/Ton.	0.0020 Ton.	\$1.47	\$2.95	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
1	Flange ANSI 150 Blind (8'')	\$112.10	USD/Pza.	1.00	\$112.10	\$112.10	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
6	Tornillo 7/8 (HHBOLT 0.8750-14x3x1.5-N)	\$2.91	USD/Pza.	1.00	\$2.91	\$17.48	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
12	Arandela 7/8 (Preferred Narrow FW 0.875)	\$0.23	USD/Pza.	1.00	\$0.23	\$2.74	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
6	Arandela Seguridad 7/8 (Extra Duty LW 0.875)	\$0.29	USD/Pza.	1.00	\$0.29	\$1.75	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
6	Tuerca 7/8 (HNUT 1.0000-8-B-N)	\$0.83	USD/Pza.	1.00	\$0.83	\$4.97	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
1	Cono_Fijación_Espiga	\$57.00	USD/Pza.	1.00	\$57.00	\$57.00	Aceros	SolidWorks Costing Feature
1	Tubo Acero ANSI SCH80 (Interno)	\$1,149.24	USD/Ton.	0.0603 Ton.	\$69.29	\$69.29	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
1	Rodamiento Azimutal Superior 6220-2Z (AFBMA 20.1 - 02-100 - 14,DE,AC,14_68)	\$101.72	USD/Pza.	1.00	\$101.72	\$101.72	Rodamientos	Representaciones Industriales Rodríguez, S.A. de C.V.
1	Flange ANSI 150 SlipOn (6'')	\$150.32	USD/Pza.	1.00	\$150.32	\$150.32	Aceros	SolidWorks Costing Feature
1	Tubo de acero ANSI SCH40 (Pedestal 6'') (P6-x84,4009997256474)	\$1,149.24	USD/Ton.	0.0603 Ton.	\$69.29	\$69.29	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
1	Inch - Straight bevel gear 6DP 33GT 13PT 20PA 0.75FW — 33O3.0H2.0MD2.875N	\$27.24	USD/Pza.	1.00	\$27.24	\$27.24	Transmisiones	SolidWorks Costing Feature

Cantidad	Pieza	Precio por Cantidad	Unidades	Cantidad por pieza	Costo por pieza	Costo total	Categoría	Referencia
1	Inch - Straight bevel pinion 6DP13PT 33GT 20PA 0.75FW — 13O3.0H2.0M-D1.125S1	\$206.03	USD/Pza.	1.00	\$206.03	\$206.03	Transmisiones	SolidWorks Costing Feature
1	Rodamiento Azimutal Inferior 6214 (AFBMA 20.1 - 02-70 - 14,DE,AC,14_68)	\$29.90	USD/Pza.	1.00	\$29.90	\$29.90	Rodamientos	Representaciones Industriales Rodríguez, S.A. de C.V.
4	Tornillo Centro Punto ½ (HLSCREW 0.5000x2)	\$0.57	USD/Pza.	1.00	\$0.57	\$2.27	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
4	Tuerca ½ (HNUT 0.5000-20-D-N)	\$0.14	USD/Pza.	1.00	\$0.14	\$0.55	Tornillería	http://www.toledo.com.mx/Listas/Tornilleria.pdf
1	Soporte Motor Azimutal	\$863.57	USD/Ton.	0.0032 Ton.	\$2.76	\$2.76	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
2	Eje del Reductor Azimut	\$3.00	USD/Pza.	1	\$3.00	\$6.00	Aceros	SolidWorks Costing Feature
2	Reductor Sinfin-Corona (atlanta_5704052_5ghe H1pih6l5w2gdvpbkvo5k2)	\$36.13	USD/Pza.	1.00	\$36.13	\$72.26	Transmisiones	https://es.aliexpress.com/store/product/90-Degree-Worm-Reducer-RV30-Worm-Gear-Reducer-Gear-box-for-Stepper-Brushless-Motor-Speed-Reducer-Auto/731233_32350871911.htm
2	Motores PAP NEMA 23 – 3A + Controlador + Envío	\$70.91	USD/Pza.	1	\$70.91	\$141.82	Electrónica	https://www.aliexpress.com/store/product/ToAuto-2-Phase-Micro-Stepper-Driver-DM542-57BY-GH250B-Easy-Stepper-Motor-NEMA-23-1-8-Degree/820398_32782782043.html?spm=2114.12010615.0.0.2cc13f1dnmmf6k
1	Gabinete (nsyplm43tvvg)	\$426.00	USD/Pza.	1.00	\$426.00	\$426.00	Electrónica	https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-562759464-gabinete-electrico-uso-exterior-schneider-electric-solar-JM?source=gps
4	Nervios Primarios de Base	\$1,001.75	USD/Ton.	0.0017 Ton.	\$1.67	\$6.69	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf

Cantidad	Pieza	Precio por Cantidad	Unidades	Cantidad por pieza	Costo por pieza	Costo total	Categoría	Referencia
4	Nervios Secundarios de Base	\$1,001.75	USD/Ton.	0.0009 Ton.	\$0.86	\$3.45	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
1	Placa Base de Pedestal	\$1,001.75	USD/Ton.	0.0375 Ton.	\$37.55	\$37.55	Aceros	http://consolidada.com.mx/images/lista_de_precios.pdf
Total						\$2,255.73		

Tabla 16. Costo de los componentes del helióstato.