

UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

DISEÑO DE SEGUIDOR SOLAR PARA SISTEMA DE ALTA
CONCENTRACIÓN, CON ARREGLO PARABÓLICO Y
ÓPTICA DE KÖHLER.

T E S I S

PRESENTADA POR

CHRISTIAN DÁVILA PERALTA

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

DIRECTOR DE TESIS
DR. RICARDO RODRIGUEZ CARVAJAL

CODIRECTOR
DR. JAIME A. LEON DUARTE

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

ABRIL 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



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



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

RESUMEN

Para innovar en la producción de energía mediante fuentes renovables es necesario trabajar en conjunto varias disciplinas de la ingeniería. Las tecnologías de concentración fotovoltaica han ganado terreno los últimos años como una solución eficiente y con potencial de reducir los costos de la producción energética, pero suponiendo algunos retos como la precisión en el seguimiento solar y el enfriamiento de las celdas solares.

Reconociendo este potencial, científicos de la Universidad de Arizona crearon un sistema de concentración parabólico, con un diseño óptico innovador que permite relajar los requerimientos de precisión del seguimiento solar y distribuye la luz concentrada en celdas fotovoltaica de triple unión, en un sistema que permite sustituir las celdas solares por tecnologías emergentes a lo largo de la vida útil del sistema.

Por otro lado, en la Universidad de Sonora se han diseñado y construido varios sistemas de seguimiento solar para aplicaciones en tecnologías termosolares de torre central, los cuales comparten algunas características con los sistemas de concentración parabólica. Además, investigadores de la Universidad de Sonora están trabajando en celdas solares para la producción eléctrica, utilizando el efecto termoiónico mejorada con fotones (PETE, por sus siglas en inglés) las cuales operan con altas concentraciones de energía y con temperaturas de operación que rondan los 200 °C.

El presente proyecto de investigación propone el diseño de un dispositivo de seguimiento solar para paneles de alta concentración que integre las tecnologías desarrolladas en las dos instituciones, con potencial de competir con las tecnologías fotovoltaicas convencionales en economías de escala. El proyecto se encuentra financiado por el programa Centros Mexicanos de Innovación Energética Solar (CEMIEsol), y forma parte del proyecto titulado “Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados”.

ABSTRACT

To innovate in the production of energy from renewable sources is necessary to work together with various engineering disciplines. The concentration photovoltaic technologies have gained ground in recent years as an efficient solution with the potential to reduce costs of energy production, but assuming some challenges as accuracy in solar tracking and cooling of the solar cells.

Recognizing this potential, scientists at the University of Arizona created a system of parabolic concentration with an innovative optical design that allows to relax the accuracy requirements of solar tracking and distributes the concentrated light in triple junction photovoltaic cells, in a system that allows to replace its solar cells by emerging technologies as they become available.

On the other hand, at the University of Sonora, engineers designed and built several solar tracking systems for applications in central tower technologies, which share some characteristics with parabolic concentration systems. In addition, researchers at the University of Sonora are working on solar cells for electricity production, using the thermionic effect enhanced with photons (PETE, for its acronym in English) which operate with high concentrations of energy and operating temperatures hovering around 200 ° C.

This research project proposes the design of a solar tracking device for high concentration arrays that integrates technologies developed in both institutions with the potential to compete with conventional photovoltaic technologies in economies of scale. The project is funded by the Mexican Solar Energy Innovation Centres (CEMIEsol), and is part of the project entitled "Production of solar electricity using parabolic dish systems, from photocells high efficiency and advanced thermionic devices" program.

A mi esposa, Natalí Molina, quien cargó con el esfuerzo de la realización de este trabajo. Por los momentos ausente, por las noches cansadas, por los ratos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT y al Programa de Fortalecimiento de la Calidad en Instituciones Educativas (PROFOCIE) por los apoyos económicos otorgados para realizar mis estudios de posgrado.

Este proyecto fue financiado por el CONACYT con el “Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética” para el Centro Mexicano de Innovación de Energía Solar, en el marco del proyecto P03 “Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados”.

El presente proyecto de investigación fue además financiado por el sistema de becas a posgrados inscritos en el PNPC de CONACYT, en la convocatoria 2013. Y la beca de Fondo Mixto, que permitió una estancia de investigación en el Centro Tecnológico Avanzado de Energías Renovables, en Almería, España; que permitió enriquecer el trabajo de investigación.

Reconocimiento a la empresa Manufactura y Servicio SOGO Hermosillo S.A. de C.V por el apoyo en la realización del prototipo, proveyendo espacio para las pruebas, logística, mano de obra e ingeniería; a los ingenieros Waldemar Gomez, José María Soto y Alfredo Soto, mi más sincero agradecimiento. A la empresa Solar DMI S.A. de C.V., al Lic. Victor Infante por su apoyo en la logística, transporte y financiamiento del proyecto.

Al equipo académico de la Universidad de Sonora, Dr. Rafael García, Dr. Ricardo Rodriguez, Dr. Rafael Cabanillas, Ing. Enrique Mayorga, por el apoyo y la confianza depositada en mí para el desarrollo de este proyecto. Al equipo de la Universidad de Arizona, Dr. Peter Strittmater y Dr. Roger Angel, Frank Solari, Andy Whiteside y Thomas Stalcup, por su apoyo y confianza.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
AGRADECIMIENTOS	4
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Presentación	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivo general	4
1.4 Objetivos específicos	4
1.5 Hipótesis	4
1.6 Delimitación o alcance del problema.	4
1.7 Justificación	5
2. MARCO DE REFERENCIA	6
2.1 Sustentabilidad energética	6
2.2 Energía solar y capacidad de satisfacer necesidad energética mundial	7
2.3 Oportunidades en la región para la producción de energía solar	8
2.4 Tecnologías de aprovechamiento de energía solar	9
2.5 Tecnologías fotovoltaicas	11
2.6 Tecnología de concentración fotovoltaica	16
2.7 Tecnología desarrollada en Universidad de Arizona	19
2.8 Tecnología PETE	24
2.9 Seguidores solares para HCPV	26
2.10 Requerimientos y especificaciones de seguidores	27
2.11 Arquitecturas de seguidores solares	32
2.12 Cargas de viento, deformación estructural y las pérdidas en el ángulo de apertura	37
2.13 Control en seguidores solares	42
2.14 Métodos de evaluación de seguidores solares	47
3. METODOLOGÍA	51
4. IMPLEMENTACIÓN	55
4.1 Análisis de arreglo óptico y unidades de conversión de potencia	55

4.2 Consideraciones de diseño del mecanismo	57
4.3 Análisis de configuraciones de módulos por seguidor	58
4.4 Propuesta de diseño	59
4.5 Diseño del mecanismo	61
4.6 Diseño del sistema de control	64
4.7 Diseño del método de control	67
4.8 Diseño del sistema de refrigeración y aprovechamiento del calor residual .	69
5. RESULTADOS	70
5.1 Cálculo analítico de cargas de viento	70
5.2 Simulación de elementos finitos de cargas de viento	71
5.2.1 Escenario 1	72
5.2.2 Escenario 2	72
5.2.3 Escenario 3	73
5.2.4 Escenario 4	74
5.3 Análisis de esfuerzos y deformaciones	75
5.3.1 Mecanismo de giro: Escenario 1	76
5.3.2 Mecanismo de giro: Escenario 2	78
5.3.3 Mecanismo de giro: Escenario 3	80
5.3.4 Mecanismo de giro: Escenario 4	81
5.3.4 Marco de inclinación: Escenario 2	84
5.3.5 Marco de inclinación: Escenario 4	86
5.4 Estimación de costos de producción y herramientas necesarias	89
5.5 Pruebas preliminares	91
6. CONCLUSIONES	92
6.1 Modelo de transferencia de tecnología y/o conocimiento	93
8. REFERENCIAS	96
9. ANEXOS	101

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1. Distribución y utilización de la energía solar (Ohta, 1979).....	11
Gráfica 2.2. Mejores eficiencias en celdas de investigación (NREL, 2014).....	15
Gráfica 2.3. Producción de celdas por tecnologías 2010. (Mehta, 2011).....	16
Gráfica 2.4. Conversión del espectro solar por tres celdas en serie (Goetzberger y Hoffman, 2005).....	17
Gráfica 2.5. Factores que afectan el desempeño del seguimiento solar relacionados con la exactitud del control de seguimiento o con las pérdidas en el ángulo de aceptación.....	28
Gráfica 2.6. Tiempo que le toma al seguidor solar para reorientarse de oeste a este comparando el modelo computacional con los resultados experimentales (Clifford, et al. 2004).....	48
Gráfica 3.7. Metodología.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso de canteo del vidrio para formar los reflectores parabólicos (US 8,082,755).....	21
Figura 2.2. Ventajas de la óptica XRX-Khöler (Coughenpur et al., 2014).....	22
Figura 2.3. Unidad de potencia de 3ra generación de tecnología de la UA (REhnu Technology Overview, 2014).....	23
Figura 2.4. Componentes que integran la unidad de potencia de tecnología de U of A (REhnu Technology Overview, 2014).....	24
Figura 2.5. a, Dispositivo PETE en tándem con una máquina térmica. b, Diagrama de flujo de energía en un dispositivo PETE en tándem con una máquina térmica (Schwede et al., 2010).....	26
Figura 2.6. Principio de operación de los seguidores solares pasivos (AWWASC, 2014).....	33
Figura 2.7. Modelo MS-1EH, el actuador lineal mueve varios arreglos de paneles dispuestos alrededor de un eje, situado de norte a sur (1 Axis Solar Tracker, 2012).....	34
Figura 2.8. Modelo SF-45 de Feina con engranaje sin-fin corona en movimientos de inclinación y azimut (Tracker Feina, 2014).....	35

Figura 2.9. Modelo MS-E2 de Mecasolar con movimiento de elevación provisto por actuador lineal y movimiento azimutal por engranaje "slew-ring" (Mecasolar, 2014).....	35
Figura 2.10. Seguidor polar de arreglos de Sedona Energy Labs (US 20120235017).....	36
Figura 2.11. Seguidor solar de dos ejes de bajo perfil desarrollado en la Universidad de Santa Clara (Barker et. al, 2013).....	36
Figura 2.12. Sistema de coordenadas para seguidores solares (Peterka y Derickson, 1992).....	38
Figura 2.13. Sección transversal de un seguidor de pedestal sujeto a flexión. A una cierta elevación de apertura (ángulo zenit θ). Los vectores locales de apuntamiento para cada módulo ϕ_i y sus conos formados por sus ángulos de aceptación (ν) (Luque-Heredia, et.al 2012).....	41
Figura 2.14. Modelación del error en control híbrido libre de seguimiento solar dependiendo del escaneo del error y pronóstico iterativo.....	46
Figura 2.15. Dos sistemas Trac-Sat SL1 probados en paralelo (Davis et. al., 2008).....	49
Figura 2.16. Sistema de monitoreo de precisión de seguimiento SunSpear de Inspira (Luque-Heredia, et. al 2012).....	50
Figura 4.1. Diseño XTP del concentrador XRK-Köhler. Los rayos se reflejan en el XTP para iluminar la celda solar pareja y simétricamente para un seguimiento dentro de eje (a) y fuera de eje (b) (Coughenpur et al., 2014).....	56
Figura 4.2. Vistas isométrica y lateral de mecanismo altazimutal.....	59
Figura 4.5. Estructura metálica del seguidor polar	
Figura 4.3. Simulación y análisis del efecto del arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 1.....	61
Figura 4.4. Posicionamiento del actuador en el mecanismo de giro.....	62
Figura 4.5. Mecanismo de giro con las unidades de concentración.....	62
Figura 4.6. Mecanismo de 4 barras montado en estructura metálica.....	63
Figura 4.7. Seguidor polar utilizado como techumbre de estacionamiento.....	63
Figura 4.8. Diagrama eléctrico de actuador Joyce Dayton SA90.....	65

Figura 4.9. Gabinete de control.....	67
Figura 4.10 Sistema de refrigeración de celdas solares.....	69
Figura 5.1. Simulación y análisis del efecto de arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 1.....	72
Figura 5.2. Simulación y análisis del efecto de arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 2.....	73
Figura 5.3. Simulación y análisis del efecto del arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 3.....	74
Figura 5.4. Simulación y análisis del efecto del arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 4.....	75
Figura 5.5. Vistas isométricas de etapa de mecanismo de giro.....	76
Figura 5.6. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 1.....	76
Figura 5.7. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 1.....	77
Figura 5.8. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 2.....	78
Figura 5.9. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 2.....	78
Figura 5.10. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 3.....	80
Figura 5.11. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 3.....	80
Figura 5.12. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 4.....	81
Figura 5.13. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 4.....	82
Figura 5.14. Vistas isométricas del marco de inclinación.....	83
Figura 5.16. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 2.....	84
Figura 5.17. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 2.....	84
Figura 5.18. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 4.....	86
Figura 5.19. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 4.....	87
Figura 5.20. Pruebas preliminares al seguidor solar.....	92
Figura 6.1. Modelo conceptual de Vinculación Empresa-Academia (Davila, Rodriguez, 2015).....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Coeficientes de carga de viento para heliostato plano donde un componente es el máximo (Peterka y Derickson, 1992).....	39
Tabla 4.1. Especificaciones del Módulo de Potencia (Rehnu, 2014).....	57
Tabla 4.2. Análisis de arreglos y configuraciones por cantidad de unidades de potencia por seguidor.....	59
Tabla 4.3. Características técnicas de Seguidor Polar V 1.0.....	60
Tabla 4.4. Características técnicas de los PLC's de la serie S1200 de Siemens.	64
Tabla 5.1. Resultados de ecuaciones de Peterka y Derickson (1992) y Pfahl (et al., 2011) para una faceta del seguidor solar.....	71
Tabla 5.2. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 1.....	72
Tabla 5.3. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 1.....	72
Tabla 5.4. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 2.....	73
Tabla 5.5. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 2.....	73
Tabla 5.6. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 4.....	73
Tabla 5.7. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 3.....	74
Tabla 5.8. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 4.....	74
Tabla 5.9. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 4.....	75
Tabla 5.10. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones.....	77
Tabla 5.11. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores.....	78
Tabla 5.12. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 2.....	79

Tabla 5.13. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 2.....	79
Tabla 5.14. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 3.....	81
Tabla 5.15 Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 3.....	81
Tabla 5.16. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 4.....	82
Tabla 5.17. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 4.....	83
Tabla 5.18. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 2.....	85
Tabla 5.19. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 2.....	86
Tabla 5.20. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 4.....	87
Tabla 5.21. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 4.....	88
Tabla 5.22. Análisis de costos directos para la fabricación e instalación del prototipo.....	88

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación descrito en el presente documento se desarrolló en el marco del proyecto P03 – “Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados” del programa Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar, como parte de las actividades necesarias para el diseño y construcción de un sistema avanzado para el aprovechamiento de la energía solar mediante tecnologías de concentración fotovoltaica y termosolar.

Durante el desarrollo del proyecto se propone un diseño de mecanismo mecatrónico para el posicionamiento de sistemas ópticos de concentración de luz solar, para su posterior análisis y cálculo. Se construye un prototipo a escala real del mecanismo y se instrumenta con tecnología de control automático industrial. Se analizan los costos para su fabricación, desglosados en materiales y mano de obra, así como las herramientas necesarias para su producción en escalas de plantas de mediana escala (hasta 1 MW).

Durante el desarrollo y conclusión del proyecto se obtuvieron diversos resultados como un trámite de patente, una publicación en una revista de difusión científica con alcance internacional y la participación en un par de eventos académicos en la ciudad de Toronto, Canadá y Tucson, Arizona. Se construyó además un dispositivo que está siendo instalado en las facilidades de la Plataforma Solar de Hermosillo, el cual será utilizado para las pruebas y desarrollo del proyecto P03 del programa CEMIEsol.

El trabajo de investigación fue desarrollado en vinculación con la empresa Manufactura y Servicio SOGO Hermosillo S.A. de C.V., la cual participó en la construcción, instrumentación y pruebas del dispositivo. El proyecto trajo como beneficio a la empresa la aprobación del proyecto “Desarrollo de capacidades para el diseño y fabricación de línea de seguidores solares para la cadena de suministro

de la industria solar” del Fondo de Innovación Tecnológica, el cual se encuentra en ejecución al momento de la presentación de este documento.

1.1 Presentación

El costo nivelado de la electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés) es el precio al que la electricidad debe ser generada a partir de una fuente específica para cubrir los gastos durante la vida útil del proyecto. Se trata de una evaluación económica del costo del sistema de generación de energía incluyendo todos los costos a lo largo de su vida útil: inversión inicial, operación y mantenimiento, el costo de combustible y costo de capital; y es utilizado en el cálculo de los costos de la generación eléctrica de diferentes fuentes (NREL, 2013).

Existen varias aproximaciones para reducir el costo nivelado de la electricidad fotovoltaica. Por un lado, el costo de los módulos se reduce mediante la economía de escala, menos materiales y consumo de energía, o el uso de materiales económicos. Por otro lado, el LCOE puede ser reducido mediante el incremento en la eficiencia del módulo, lo que también provee la ventaja de obtener sistemas más pequeños y menores áreas utilizadas (Philips et al., 2012).

Durante los últimos años, la tecnología de alta concentración fotovoltaica (HCPV, por sus siglas en inglés) ha ganado atención, lo que ha incrementado su demanda, por lo que esfuerzos importantes son llevados a cabo para incrementar su eficiencia, así como el volumen de producción de módulos con dicha tecnología (Philips et al., 2012).

Un módulo fotovoltaico de alta concentración (HCPV, por sus siglas en inglés) consiste en un grupo de celdas solares multi-unión interconectadas en serie, con un dispositivo óptico en cada celda que concentra la luz del sol (Luque y Andreev, 2007). Esta tecnología ha sido bien establecida en aplicaciones espaciales y recientemente ha entrado al mercado terrestre (Philips et al., 2012).

En la Universidad de Sonora, se ha propuesto el desarrollo de tecnologías como la llamada Emisión Termiónica Foto Mejorada o PETE, por sus siglas en inglés (García, 2011) que es un método de captación de energía solar que utiliza la

naturaleza cuántica de los fotones solares, en conjunto con energía térmica para generar electricidad a temperaturas compatibles con máquinas térmicas solares. Estos dispositivos son candidatos ideales para aplicaciones solares de altas concentraciones debido a que pueden operar a elevadas temperaturas de una forma eficiente (Schwede, et al., 2010).

1.2 Planteamiento del problema

A continuación se plantea el problema a resolver por el presente proyecto de investigación.

a) Descripción del problema.

Soluciones integrales que desarrollen dispositivos capaces de producir energía limpia para satisfacer el creciente consumo de la humanidad, son requeridas para hacer de la energía solar una opción viable y adecuada para reducir, de manera sustancial, la demanda por combustibles fósiles. Se cuenta con 3 tecnologías de energía solar independientes que tienen potencial de ser una solución integral que permita reducir el LCOE a un nivel que compita con las actuales soluciones de producción de energía solar, e incluso superarlas. Sin embargo, no se cuenta con un diseño que integre dichas tecnologías para operar en conjunto.

b) Problema en forma de enunciado.

Existen 3 tecnologías complementarias que han tenido resultados satisfactorios en lo individual, sin embargo no se ha explotado su potencial integrándolas en una unidad de producción de energía.

1.3 Objetivo general

La presente propuesta de investigación pretende cumplir con el siguiente objetivo general:

Desarrollar un prototipo de seguidor solar que permita integrar los sistemas de producción de energía solar termoiónicos y/o fotovoltaicos, con el sistema óptico de Köhler desarrollado por la Universidad de Arizona; siendo capaz de realizar pruebas en condiciones normales de operación.

1.4 Objetivos específicos

El objetivo general de la presente propuesta de investigación se pretende completar, cumpliendo los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar un mecanismo automático de seguidor solar con los parámetros necesarios para las tecnologías desarrolladas por la Universidad de Sonora y la Universidad de Arizona.
2. Fabricar un prototipo funcional de seguidor solar.
3. Realizar pruebas preliminares del prototipo que permitan obtener un estimado del costo-beneficio.

1.5 Hipótesis

Es posible diseñar un dispositivo de seguimiento solar que permita la integración y pruebas de los sistemas de concentración solar desarrollados en la Universidad de Arizona y la Universidad de Sonora.

1.6 Delimitación o alcance del problema.

El proyecto pretende proponer al menos un prototipo de seguidor solar de alta concentración para ser integrado a los sistemas de producción de energía diseñados por la Universidad de Arizona y la Universidad de Sonora. El presente proyecto se delimita al diseño y construcción del prototipo, y no a las pruebas en campo, actividad que se realizará fuera del alcance del presente proyecto de investigación.

1.7 Justificación

El desarrollo de tecnologías innovadoras para el aprovechamiento eficiente de la energía solar, requiere un gran grado de integración entre varias ciencias de la ingeniería. La necesidad de la humanidad por producir energías limpias ha llevado al diseño de métodos cada vez más complicados para la producción de energía eléctrica rentable y sustentable. Dichos métodos requieren de sistemas de control automático avanzados e ingeniería a detalle que permita controlar los parámetros del proceso de producción eléctrica, a la vez que se reducen los costos y se asegura la confiabilidad de dichos sistemas.

Los módulos fotovoltaicos de alta concentración han venido ganando terreno por los avances que se han tenido en la creación de materiales fotovoltaicos de tripe unión, con estudios que han publicado eficiencias que doblan y en ocasiones triplican las de los paneles fotovoltaicos comunes. Materiales termoiónicos prometen elevadas eficiencias, sin embargo requieren mecanismos de seguimiento que deben cumplir con características que aseguren su correcta operación y con períodos de vida útil relativamente largos.

El desarrollo de nuevos materiales fotovoltaicos de concentración debe ir de la mano de diseños novedosos de seguimiento solar de precisión, que permitan cumplir con los parámetros requeridos por dichos materiales, a la vez que se asegura la confiabilidad y se reducen los costos.

2. MARCO DE REFERENCIA

A continuación se presenta el marco de referencia que servirá como base para el desarrollo del proyecto de investigación.

2.1 Sustentabilidad energética

En los últimos años, la discusión sobre el tema energético ha inspirado a autores de todo el mundo a publicar literatura que relata la importancia de cambiar la manera en la que se obtiene actualmente la energía que mueve a nuestra civilización. David JC Mackay (2009) engloba los motivos de estudiar la sustentabilidad energética en su libro “Sustainable Energy – Without the hot air”.

Primero, las fuentes fósiles son un recurso finito, y todo parece indicar que el petróleo y el gas a precios asequibles se terminarán en nuestros días. Los recursos fósiles son un bien muy valioso que sirve además para manufacturar plásticos y muchas otros productos, lo que claramente presenta un mejor uso que la simple combustión. Segundo, los países de primer mundo se interesan tanto en la seguridad del suministro de energía, que no les conviene depender de las políticas de países extranjeros que poseen las mayores reservas de dichos recursos naturales; creando los conflictos bélicos que vemos en nuestros tiempos (Cleveland y Morris, 2014).

El tercer punto de Mackay es uno de los más preocupantes, ya que posiblemente es el problema más serio e importante que la humanidad ha tenido que enfrentar, con consecuencias desastrosas y costosos efectos adversos (Stern et al., 2006), de los cuales nuestro país no escapará (Lieverman y O'Brien, 1991). El cambio climático es causado por varias actividades humanas, pero el mayor contribuidor es el incremento del efecto invernadero producido por el dióxido de carbono, el cual se libera en su mayoría por la quema de combustibles fósiles. “El problema del cambio climático es mayormente un problema de energía” (Mackay, 2009).

La mejor manera de reducir el calentamiento global es, sin duda, bajar las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. El problema es que la economía mundial es adicta a la energía, producida en su mayoría por combustibles fósiles.

Dado que el crecimiento económico y el aumento de la población mundial requieren más y más energía, no podemos dejar de utilizar los combustibles fósiles de forma rápida, ni en un corto plazo (Ming et al., 2014).

Parte de la solución puede ser la energía solar, misma que es referida como energía renovable o sustentable porque estará disponible mientras que el sol continúe brillando. Las estimaciones para el período de vida de la etapa principal del sol calculan unos 5 mil millones de años (Sen, 2008).

2.2 Energía solar y capacidad de satisfacer necesidad energética mundial

El surgimiento del interés en la utilización de energía solar ha tenido lugar desde 1970, debido principalmente al entonces aumento del costo de la energía a partir de fuentes convencionales. La radiación solar es la fuente de energía más abundante y permanente del mundo. La cantidad de energía solar recibida por la superficie de la tierra por minuto es mayor que la utilización de la energía por toda la población en un año (Sen, 2008).

Si se cubriera el 0.15% del terreno en la tierra con sistemas solares con 10% de eficiencia, se obtendrían 20 TW de potencia, casi el doble del consumo mundial actual provisto por combustibles fósiles (Mousazadeh, 2009). Luque Heredia (2010) menciona en su tesis doctoral que la energía solar aprovechable por las tecnologías actuales es capaz de satisfacer 5.2 veces la "unidad antropogénica", la cual define como la cantidad de energía correspondiente al consumo anual de la población de la tierra; o sea, unos 125,000 TWh. A futuro, la energía solar podría proporcionar un tercio de la demanda mundial de energía final después de 2060, mientras que las emisiones de CO₂ se reducirían a niveles muy bajos (OECD/IEA, 2011).

En 2011, la Agencia Internacional de la Energía expresó: "El desarrollo de tecnologías solares limpias, baratas e inagotables supondrá un enorme beneficio a largo plazo. Aumentará la seguridad energética de los países mediante el uso de una fuente de energía local, inagotable y, aún más importante, independientemente de importaciones, aumentará la sostenibilidad, reducirá la contaminación,

disminuirá los costes de la mitigación del cambio climático, y evitará la subida excesiva de los precios de los combustibles fósiles. Estas ventajas son globales. De esta manera, los costos para su incentivo y desarrollo deben ser considerados inversiones; deben ser realizadas de forma sabia y deben ser ampliamente difundidas".

2.3 Oportunidades en la región para la producción de energía solar

Las energías renovables ofrecen beneficios más allá de kilowatts-hora (unidad de energía); como los son nuevos empleos, ambientes más limpios, seguridad energética y otros. Es por eso que muchos países pertenecientes al OECD se han dirigido hacia las energías renovables en sus planes energéticos; incluso, algunos de ellos han invertido en el desarrollo de la industria de energías renovables local, y están entrando agresivamente a este nuevo mercado (Huacuz, 2008).

Algunas investigaciones apuntan a que México es uno de los cinco países más atractivos para invertir en proyectos solares fotovoltaicos, solamente detrás de China y Singapur (Alemán-Nava et al., 2014). El potencial de la energía solar en México es uno de los más grandes en el mundo (SENER, 2003), debido a que se encuentra en llamado "Cinturon Solar" con radiación que excede los 5 KWh por metro cuadrado al día (EPIA, 2010). En México, el potencial energético solar se encuentra acumulado en el noroeste, con una radiación que va desde 5.6 hasta 6.1 KWh/m² al día (IIE, 2010).

Según PROMEXICO (2012), existe una capacidad solar fotovoltaica instalada de 33 MW operando en México. Para el final de 2011, la compañía española Siliken anunció un proyecto fotovoltaico "La Manzana del Sol" en el estado de Durango, el cual tendría una capacidad instalada de 100 MW durante la primera etapa y 400 MW en los próximos 5 años (Alemán-Nava et al., 2014). Otro proyecto es el de Aura Solar I, anunciado por la empresa Gauss Solar en Mayo de 2013, y que será construido en La Paz, Baja California Sur, contará con una capacidad de 38 MW.

Otro aspecto importante es que México es el principal proveedor de módulos fotovoltaicos de Latinoamérica, con una capacidad de producción anual por arriba de 276 MW; representando oportunidades de desarrollo económico para el país con la investigación aplicada a tecnologías de aprovechamiento de energía solar. Sin embargo, las principales compañías desarrolladoras de proyectos fotovoltaicos son, en su mayoría, extranjeras como Abengoa, Abener, Del Sol Systems, Microm, Iberdrola y Siliken (Alatorre, 2009). Dichas compañías reconocen el potencial solar del país que, como publica la SENER (2009) en “Energías renovables para el desarrollo sustentable en México”; si se asume una eficiencia del 15%, un cuadro de 25 km en el desierto de Sonora sería suficiente para proveer de toda la electricidad requerida actualmente por el país entero.

2.4 Tecnologías de aprovechamiento de energía solar

Se espera que la energía solar sea la base para una economía de energía sustentable, porque ser el recurso de energía renovable más abundante que existe. Sin embargo, las aplicaciones prácticas y los usos beneficios de la radiación solar requieren consideraciones de diferentes aspectos de la ingeniería de manera que su uso sea eficiente y sustentable (Sen, 2008). Existe muchas publicaciones que reportan usos de la energía solar en diseños de ingeniería y arquitectura, tanto en procedimientos como en proyectos (Leng, 2000).

En nuestro planeta, todas las fuentes de energía con excepción de la energía atómica tienen su origen en el sol. Debido a lo anterior, se han propuesto varias maneras de separar las formas de energía solar, la siguiente es la propuesta por el libro “Solar Energy Fundamentals” (2008):

1. Calor de la radiación solar que es aprovechable cuando hay poca o nula nubosidad. Este tipo de energía es dependiente del calor de los rayos del sol y es mayormente utilizada por métodos diseñados para calentar agua.
2. Potencia de la luz solar en cualquier tiempo excepto la noche, en días nublados o claros.
3. Potencia del movimiento del aire o agua (ciclo hidrológico), cualquier hora del día o la noche, en días nublados o claros.

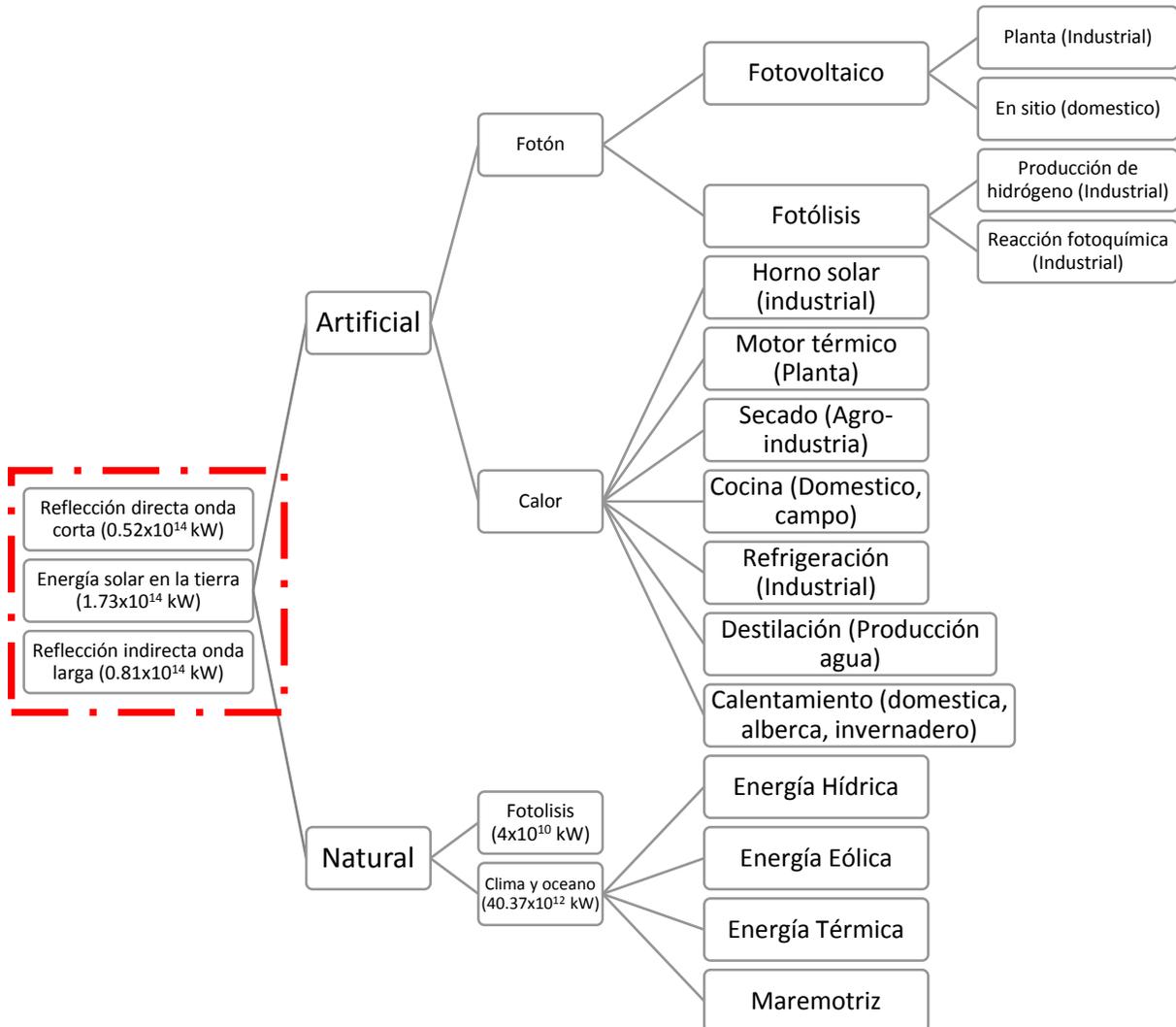
Ohta propuso en 1979 una gráfica donde explicaba la distribución y utilización de la energía solar (Gráfica 2.1), que aún puede ser válida en nuestros días; clasificando los sistemas de producción de energía solar en fotovoltaicos, térmicos y fotoquímicos.

Tian y Zhao (2013) publicaron un estudio donde resumen las principales tecnologías de colectores solares para el aprovechamiento de la energía termo solar. Los colectores solares convierten la energía de la irradiación solar en energía térmica en aplicaciones termo solares, o directamente a electricidad en tecnologías fotovoltaicas. Para las aplicaciones termo solares, la radiación solar es absorbida por el colector solar en forma de calor que es luego transferido a un fluido de trabajo que puede ser agua, aceite o aire. El calor transportado por el fluido de trabajo puede ser utilizado para proveer agua caliente o calor en aplicaciones domésticas, o para cargar a un tanque de almacenamiento térmico para que el calor pueda ser utilizado posteriormente.

Las tecnologías de colectores solares son clasificadas en dos categorías (De Winters, 1991): de concentración y no concentración. Un colector de no concentración tiene la misma área de intercepción que su área de absorción, mientras que un seguidor de concentración tiene una superficie reflectora cóncava que concentra la radiación solar enfocando en un área receptora mucho menor, resultando en un mayor flujo de calor para que el ciclo termodinámico pueda lograr una mejor eficiencia de Carnot trabajando a mayores temperaturas.

Algunas tecnologías de aprovechamiento de energía solar descritas en el estudio de Tian y Zhao (2013) son las de colectores planos para calentar agua o aire en aplicaciones domésticas. Otras tecnologías como los colectores híbridos fotovoltaicos/térmicos que convierten la energía solar en electricidad y calor. Los sistemas de concentración de torre central o campo de heliostatos utilizan espejos móviles que concentran la radiación en un colector que convierte la radiación en energía térmica, la cual es posteriormente almacenada o convertida a electricidad. La tecnología de discos de concentración utiliza espejos parabólicos para concentrar la luz en un punto, convertida por celdas fotovoltaicas de concentración

en electricidad o por máquinas térmicas como los motores stirling. Por último, los concentradores parabólicos que utilizan espejos para concentrar la radiación en un ducto por el que pasa un fluido de trabajo, que al igual que el anterior convierten el calor en electricidad o calor de proceso.



Gráfica 2.1. Distribución y utilización de la energía solar (Ohta, 1979).

2.5 Tecnologías fotovoltaicas

La tecnología fotovoltaica es la manera más directa de convertir la radiación solar a electricidad, basado en el efecto fotovoltaico observado primeramente por Henri Becquerel (1839). Las celdas fotovoltaicas son diodos semiconductores diseñados para absorber la luz del sol y convertirla en electricidad. Cuando los fotones

alcanzan ciertos materiales semiconductores, estos dislocan electrones que causan una diferencia de potencial entre la superficie especialmente tratada del semiconductor y la superficie posterior (Sen, 2008).

Prácticamente, todos los dispositivos fotovoltaicos (también llamados celdas solares) incorporan una unión pn en un semiconductor a través del cual se genera el fotovoltaje. Para un uso práctico, las celdas solares son empaquetadas en módulos que contienen un número de celdas de silicio conectadas en series o un material de capa delgada, que también cuenta con conexiones seriadas internas. Dicho módulo tiene dos funciones, protege a la celda del ambiente y entrega un voltaje más alto que una celda individual, las cuales entregan voltajes no mayores a 1 Volt (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

Normalmente, las celdas fotovoltaicas son manufacturadas a partir de silicio, aunque otros materiales pueden ser utilizados. Semiconductores tipo n son hechos a partir de silicio cristalino que ha sido dopado con pequeñas cantidades de impurezas (normalmente fósforo) de una manera tal que el material dopado posee un excedente de electrones libres (Sen, 2008).

Las eficiencias de conversión de las celdas producidas comercialmente en la actualidad, están en el rango de 13 a 16%, pero las eficiencias del módulo son un poco menores. La mejor eficiencia de laboratorio de una celda de silicio policristalino fue de 24.7%, aproximándose al límite teórico de este tipo de celda solar; como lo menciona el libro "Photovoltaic solar energy generation" (2005).

La tecnología de celdas solares se benefició del estándar alto de la tecnología del silicio desarrollada originalmente para transistores y después para circuitos integrados. Esto es tanto a la calidad como a la disponibilidad de silicio monocristalino de alta perfección, material que sigue jugando un papel importante en nuestros días. Como el costo del silicio tiene una porción importante en el costo de una celda solar, se han realizado grandes esfuerzos para reducir esos costos (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

Actualmente, los esfuerzos de las investigaciones de la tecnología de semiconductores se centran en tratar de llevarlos a precios razonables y más eficientes, aunque desgraciadamente alta eficiencia y bajo costo tiende a ser mutuamente exclusivo (Sen, 2008). Se sabe que el silicio no es el material ideal para la conversión fotovoltaica, debido a su relativa baja absorción de la radiación solar, por lo que una capa delgada de silicio es requerida para una absorción eficiente. La búsqueda por un material más adecuado comenzó casi con el inicio de la tecnología de células solares (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

El primer material que compitió con el silicio cristalino fue el silicio amorfo (a-Si), el cual tiene propiedades fundamentalmente diferentes al cristalino. Sin embargo, las expectativas de este material fueron opacadas por relativa baja eficiencia y por su degradación inicial inducida por la luz. En nuestros días, esta tecnología cuenta todavía con un lugar fijo en productos domésticos y de oficina, mayormente para uso en interiores. Una vez estudiados y resueltos los problemas de degradación inducida por la luz, el silicio amorfo comenzó a entrar al mercado de plantas de potencia. Con esta tecnología se obtiene una eficiencia de celdas que alcanzan el 13%, y la eficiencia de los módulos están en el rango de 6 – 8%, como lo documentan Goetzberger y Hoffmann (2005) en su libro.

Green (et. al, 2004) desarrolló una tecnología de celdas solares a la que llamó silicio cristalino en vidrio (CSG, por sus siglas en inglés), con el objetivo de combinar las ventajas de la tecnología estándar a base de obleas de silicio con la de películas delgadas. Con una pequeña línea de producción piloto confirmó una eficiencia de 8 a 9%, en camino de obtener 12 a 13%.

Franklin (et. al, 2007) describió unas novedosas celdas “sliver” (astilladas) hechas a partir de celdas solares de silicio de un solo cristal que ofrecieron el potencial para la reducción de 10 a 20 veces el silicio consumido para un módulo solar del mismo tamaño, con el beneficio agregado de que, en un ambiente de producción industrial, se requiriera de 20 a 40 veces menos obleas por MW que las tecnologías basadas en obleas convencionales.

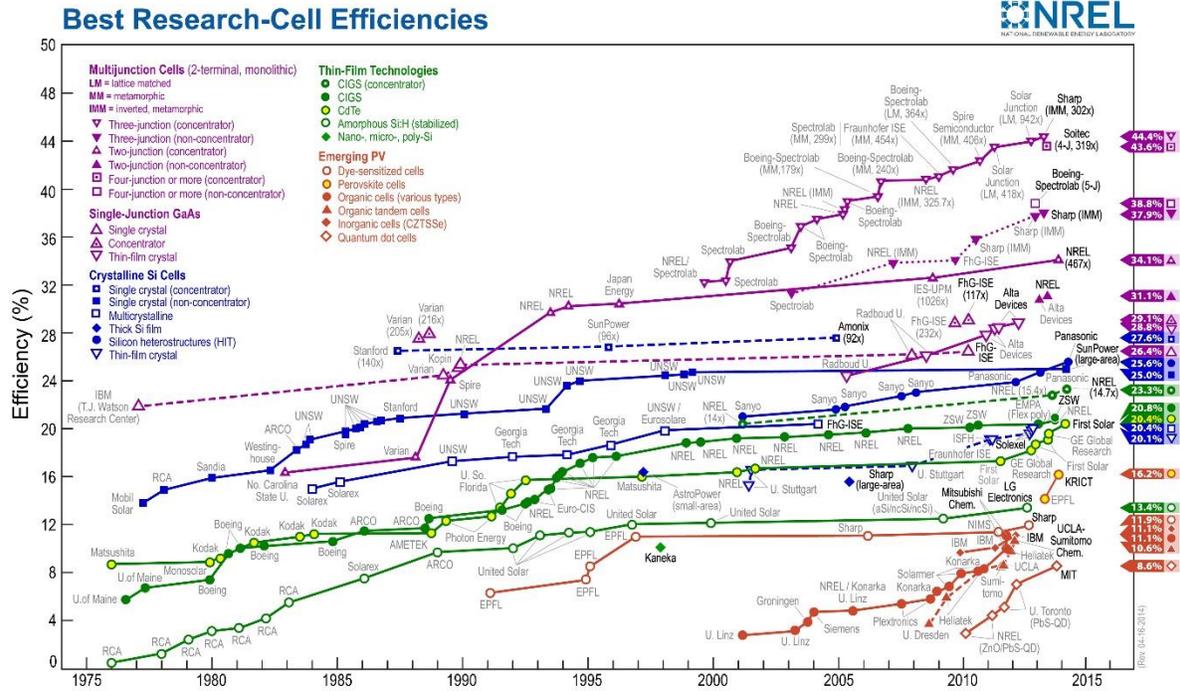
A parte de las celdas de silicio, existen otros materiales con potencial que llenan los requerimientos de alta absorción de luz y que son por eso candidatos para celdas solares de capa delgada. Estos pertenecen a la clase de semiconductores compuestos como GaAs o InP (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

Ferekides (et al., 2000) presentó un trabajo en el que formó celdas solares de CdTe/CdS, las cuales fueron fabricadas utilizando el proceso de sublimación de espacio cerrado (CSS por sus siglas en inglés) que tiene características atractivas como un alto radio de depositado y una eficiencia en la utilización del material.

Las nuevas tecnologías se basan en compuestos semiconductores ternarios CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 y sus aleaciones multinarias $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ (o CIGS como es conocido). Los primeros resultados de trabajos de un solo cristal en CuInSe_2 (o CIS, como es conocido) eran muy prometedores, pero la complejidad de esos materiales parecían complicar su uso como tecnología de capa delgada. Sin embargo, algunos trabajos demostraron aplicaciones exitosas. En desarrollos posteriores, la adición de Ga y S ayudó a incrementar la eficiencia. La mejor eficiencia de laboratorio para este material alcanzó un 18.9%. Paneles solares con estas tecnologías están disponibles en el mercado aunque en pequeñas cantidades (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

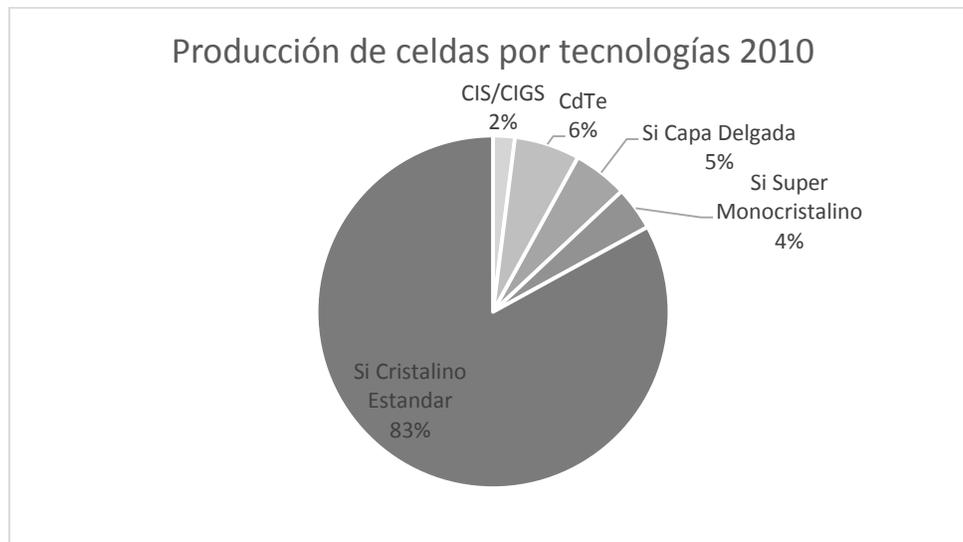
Jorgensen (et al., 2008) presentó un reporte sobre la estabilización/degradación de celdas orgánicas y poliméricas, discutiendo los métodos para estudiar la degradación y mejorar la estabilidad mediante la selección de mejores materiales activos, encapsulación y la aplicación de filtros UV. Otras investigaciones (Bernede, et al., 2005; Sumei et al., 2007) describen materiales orgánicos desarrollados para aplicaciones fotovoltaicas.

Existe una gran cantidad de materiales fotovoltaicos, cada uno con diferentes eficiencias, costos y diferentes condiciones de operación. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) realiza una gráfica que actualiza año con año, en la cual se compara la eficiencia de las celdas fotovoltaicas, con el año de desarrollo y se comprenden todas las tecnologías publicadas por centros de investigación en el mundo. La gráfica 2.2 muestra la última versión publicada por NREL (2014).



Gráfica 2.2. Mejores eficiencias en celdas de investigación (NREL, 2014).

A pesar de la investigación en varios materiales, las celdas de silicio siguen dominando ampliamente el mercado. Para el 2002 el predominio de este elemento en sus formas cristalinas y amorfas, arrasó con un 99% del mercado; de todos los otros materiales solo el CdTe tenía una cuota de mercado del 0.4% (Goetzberger y Hoffmann, 2005). La Gráfica 2.3 muestra una distribución de la producción de celdas fotovoltaicas para el 2010, donde vemos un incremento en la cuota de mercado de la tecnología CdTe y de CIS/CIGS.



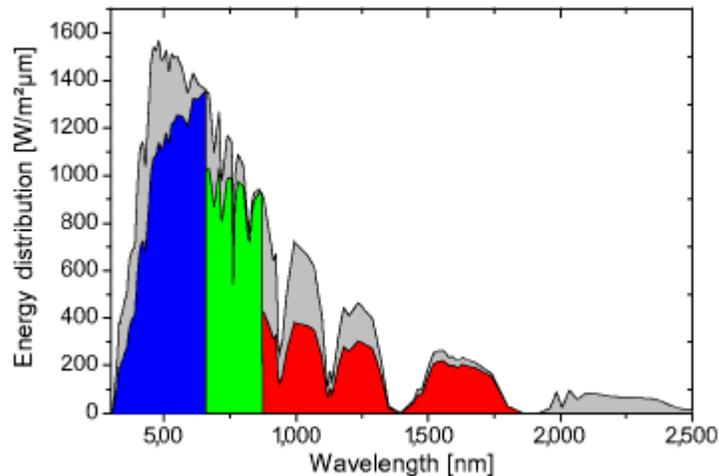
Gráfica 2.3. Producción de celdas por tecnologías 2010. (Mehta, 2011).

2.6 Tecnología de concentración fotovoltaica

Los sistemas de concentración fotovoltaica hacen uso de grandes áreas de lentes o espejos que enfocan la luz del sol en un área pequeña de celdas fotovoltaicas. Estos sistemas usan seguimiento de uno o dos ejes para mejorar la eficiencia y sus principales ventajas es que reducen el uso del costoso material semiconductor e incrementan el radio de concentración. Las limitaciones son los costos de enfocar, los costos de seguimiento solar y de enfriamiento (Parida, 2011).

La eficiencia de las celdas solares puede ser mejorada significativamente al apilar varias celdas con diferentes brecha energética (bandgap), de mayor a menor. De esa manera, cada celda solar convierte parte del espectro solar a una máxima eficiencia. El arreglo funciona de manera que la primera celda con una larga brecha energética convierte la luz de corta longitud de onda del espectro solar, transmitiendo la otra parte a la siguiente celda, y así continuamente. La figura 2.1 muestra la conversión del espectro solar por tres celdas en serie, donde cada una aprovecha una parte del espectro con eficiencia óptima. Dos celdas en serie tienen una eficiencia teórica máxima de 41.9%, y si se apila un número mayor de celdas se puede superar el 50%. Ese arreglo en tándem puede ser realizado con una secuencia de capas delgadas o ser incorporadas a sistemas de concentración

(Goetzberger y Hoffmann, 2005). La Gráfica 2.2 muestra que las tecnologías de mayor eficiencia son las de celdas que incorporan este tipo de arreglos.



Gráfica 2.4. Conversión del espectro solar por tres celdas en serie (Goetzberger y Hoffman, 2005).

Por ejemplo, las celdas solares multiunion III-V (MJSCs, por sus siglas en inglés) han alcanzado eficiencias de conversión más altas que cualquier otro dispositivo fotovoltaico y tienen mucho potencial para mejorar. El problema es que estas celdas son muy caras, por lo que para compensar esta desventaja se utilizan sistemas de concentración óptica que son utilizados para iluminar las celdas solares. Al concentrar la luz, se necesitan celdas más pequeñas balanceando su costo con el bajo costo de la óptica, haciendo a la tecnología resultante económicamente factible (Algora y Rey-Stolle, 2012).

La concentración solo puede ser lograda con luz solar directa, que puede ser concentrada por elementos ópticos que siguen al sol. Si el factor de concentración es muy alto, entonces el costo de la celda solar es solo una pequeña parte del costo del sistema, por lo que la celda solar puede ser cara mientras la eficiencia sea muy alta (Trillo y Torruellas, 2001). La concentración de la radiación también habilita el incremento en la eficiencia, ya que el V_{oc} es proporcional al logaritmo de la densidad de la corriente generada por la luz, por lo que se incrementa la eficiencia de conversión con la concentración hasta llegar a un máximo, después del cual las resistencias internas de las celdas empiezan a reducir la eficiencia (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

El libro “Solar energy fundamentals” (2008) resume el tipo de arreglos ópticos utilizados en colectores de concentración. El disco parabólico utiliza una superficie reflectora que concentra la luz en un punto, arreglos de varios discos pequeños son también utilizados. El canal parabólico utiliza una superficie reflectora curvada a lo largo de una dimensión, de manera que concentra la luz solar en una línea. Lentes de una superficie son utilizados para concentrar la luz en el punto focal detrás del lente, para el cual también pueden ser utilizados lentes de fresnel planos. Existe también la tecnología de espejos de fresnel, que utilizan varios espejos planos colocados de manera que todos reflejen la luz solar a un punto que puede ser lineal o puntual.

En todos los casos, es necesario que el arreglo óptico utilizado siga al sol, de otra manera los rayos solares fuera de eje harían reflexiones inconvenientes, y la intensidad de la concentración de la radiación en un punto o línea va a ser debilitada. En el enfoque puntual, se necesita un mecanismo de seguimiento de dos ejes. En el enfoque lineal, basta con que se siga al sol en un solo eje, a lo largo del día (Sen, 2008). La Gráfica 2.2 provee una lista de tecnologías fotovoltaicas, indicando cuales necesitan sistemas de concentración.

Se han propuesto sistemas que concentran la radiación solar en fibras ópticas, para después transmitir las hacia puntos donde puede ser aprovechada. Se espera que la aplicación de producción de energía eléctrica mediante la tecnología de fibras óptica minimice la demanda de combustibles fósiles. La colección de energía solar mediante fibras ópticas y sistemas ópticos causa pérdidas insignificantes y la transmisión es instantánea. La transmisión de radiación solar de regiones con muy poca variación en la radiación solar ofrece una oportunidad para ser utilizada para generar electricidad (Sen, 2008).

El diseño de concentradores fotovoltaicos introduce problemas de diseño ópticos muy específicos, con características que los hacen diferentes de cualquier otro diseño óptico. Tiene que ser eficiente, adecuado para la producción en masa, capaz de altas concentraciones, insensible a las inexactitudes de manufactura y montaje, y capaz de proveer iluminación uniforme a las celdas. Cuando se requiere alta

concentración, es probable que para el éxito comercial del sistema se cuente con un ángulo de aceptación. Esto permite tolerancias en producción masiva de todos los componentes, relaja el ensamblaje del módulo y de la instalación del sistema, y baja los costos de los elementos estructurales. Como el principal objetivo de la concentración fotovoltaica es hacer a la energía solar una solución barata, se requiere disminuir el número de elementos y alcanzar un mayor ángulo de aceptación que permita relajar los requerimientos mecánicos y ópticos, así como el ensamble, la instalación y la estructura de soporte (Cvetković et al., 2008).

2.7 Tecnología desarrollada en Universidad de Arizona

El 8 de mayo de 2009 los investigadores de la Universidad de Arizona, Dr. Roger Angel y Dr. Warren Davison, presentaron una solicitud de patente de un aparato de concentración solar que prometía resolver los problemas mencionados anteriormente mediante un arreglo óptico novedoso. Un seguidor solar de dos ejes conteniendo un conjunto de espejos parabólicos, los cuales concentran los rayos del sol en generadores fotovoltaicos colocados en su punto focal (Angel y Davison, 2009). Cada concentrador contiene un arreglo óptico conocido como Khöler, que ayuda a dirigir los rayos solares hacia una pluralidad de celdas fotovoltaicas de triple unión enfriadas por un sistema de refrigeración activo colocado detrás de las celdas (Angel, 2009).

El objetivo de la investigación que derivó en dichas patentes, fue el desarrollo de tecnología para la producción de electricidad solar en altos volúmenes a un costo menor que cualquier otro método de producción de energía solar, y que compitiera con la generación eléctrica mediante combustibles fósiles. Utilizando el concepto de alta concentración fotovoltaica (HCPV, por sus siglas en inglés), se utilizó un novedoso y económico sistema de concentración de luz solar en celdas multiunion III-V, las cuales están disponibles comercialmente. Cuando estas celdas se usan con radios de concentración solar (de 1000 a 2000 soles), el costo de las celdas se reduce a un aproximado de 0.10 dls/watt, y las futuras plantas de sistemas HCPV que utilicen celdas multiunion con eficiencias cercanas al 50% tienen el potencial de generar energía al mismo costo de las energías fósiles; siendo este el incentivo para

nuevos diseños de sistemas HCPV más económicos, con alta concentración y alta eficiencia óptica (Coughenpur et al., 2014).

El sistema consta de tres partes principales, los reflectores curvados, la unidad de potencia y enfriamiento, y el mecanismo de seguimiento solar. Los reflectores son fabricados a partir de vidrio flotado, el mismo tipo del que se manufactura en grandes volúmenes para ventanas. El proceso de moldeo de estos reflectores toma hojas de vidrio plano que son primeramente moldeadas a una forma curvada, y después plateada su parte posterior para obtener una alta reflectividad.

El proceso de fabricación de los reflectores parabólicos es explicado en el documento de patente estadounidense US 8,082,755 "Metodo de manufactura de grandes reflectores parabólicos para un aparato de concentración solar". Según lo reivindicado en dicho documento, el método consiste en colocar una hoja de vidrio flotado, sujetado por las esquinas del vidrio, sobre un molde con forma parabólica. El molde contiene unos agujeros conectados a un sistema de vacío para acelerar la deformación del vidrio. Se induce calor de radiación desde arriba del vidrio, de manera que este se ablande, y por gravedad y ayudado con el sistema de vacío, este tomará la forma del molde. Se procede entonces a rolar las orillas del vidrio para darle una forma curva. Una vez que el vidrio tiene la forma del molde, se procede a colocar una placa negra fría sobre el vidrio sin tocarlo, de manera que el calor del vidrio escape por medio de radiación y este se enfríe. El molde contiene una especie de ranurado, que hacen que el área de contacto entre el vidrio y el molde se reduzca, reduciendo la transferencia de calor por convección y ayudando a que el molde no se caliente. La figura 2.1 fue tomada del documento de patente y explica el proceso de deformado de los vidrios.

El paso siguiente es la aplicación de una capa de plata, mediante el proceso de vacío asistido por plasma, proceso similar al utilizado para depositar plata y capas dieléctricas en vidrio flotado en la manufactura de espejos arquitectónicos. Después

de la capa de plata se deposita una capa de cobre para prevenir la oxidación y por último una capa de sello polimérico resistente a la intemperie.

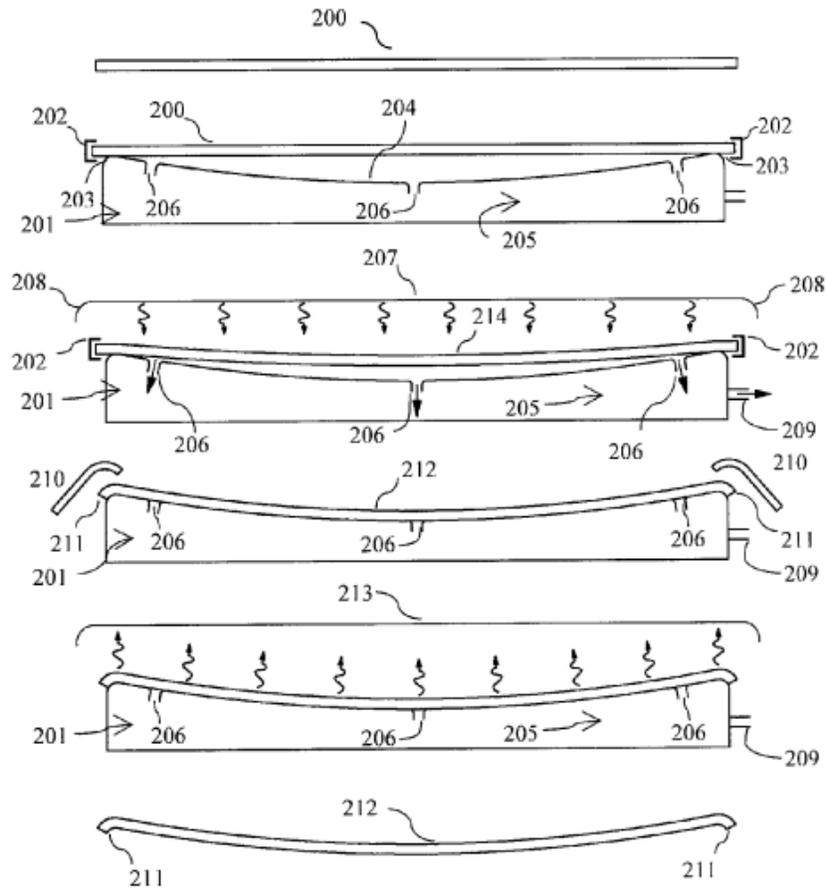


Figura 2.1. *Proceso de canteo del vidrio para formar los reflectores parabólicos (US 8,082,755).*

Según la compañía Rehnu (2012), un spin-out de la Universidad de Arizona que obtuvo la licencia de la tecnología, el proceso de moldeo es único, ya que produce grandes reflectores de cristal con una forma parabólica, de modo que cuando apunta al sol concentran la luz en un punto de enfoque intenso. Reflectores similares de vidrio con una capa posterior de plata, pero con una curvatura cilíndrica para enfocar la luz a un foco lineal se fabrican en alto volumen y bajo costo para calentar los tubos de vapor en grandes plantas de energía solar térmica (tecnología de canal parabólico). Las plantas de este tipo han estado en funcionamiento desde hace décadas y han demostrado que los espejos son muy robustos y tienen una excelente estabilidad mecánica y química.

El segundo componente integra la unidad de potencia y de enfriamiento. La unidad de potencia consiste primeramente en un arreglo óptico de Khöler, el cual contiene una esfera de sílice cuyo centro es colocado en el punto focal de la superficie reflectora. Esta esfera distribuye la radiación solar en un arreglo de celdas fotovoltaicas multi-unión colocadas detrás de la esfera en una superficie curvada, aun cuando el seguimiento se encuentra fuera de eje. Este arreglo óptico permite un grado de aceptación de 1.5° , relajando los requerimientos de precisión del seguimiento. La figura 2.2 muestra un diagrama del funcionamiento de la óptica de Khöler, mostrando la proyección de la imagen solar de la lente esférica (a), representando los rayos solares en un seguimiento dentro de eje (b) y fuera de eje (c) hasta un ángulo de aceptación Θ de $\pm .75^\circ$ (Coughenpur et al., 2014).

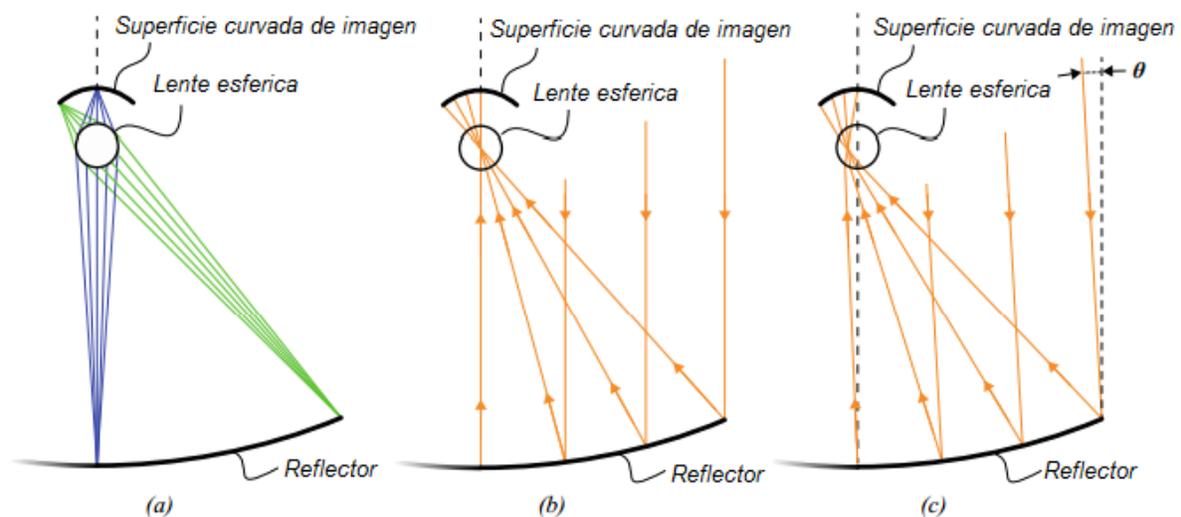


Figura 2.2. Ventajas de la óptica XR-Khöler (Coughenpur et al., 2014).

La evolución de la tecnología licenciada a Rehnu se identifica en tres generaciones de prototipos, en donde se ha optimizado la utilización del espacio y se ha rediseñado los componentes ópticos y de enfriamiento de la unidad de potencia. Tablas comparativas entre las generaciones están disponibles en el sitio de internet de Rehnu (<http://www.rehnu.com/proven-results>) y en publicaciones académicas (Coughenpur et al., 2014). La figura 2.3 muestra una imagen de la unidad de

potencia de 3ra generación operando, y la figura 2.4 muestra los componentes que integran esta unidad de potencia.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la posibilidad de intercambiar las celdas fotovoltaicas de triple unión por celdas solares de otras tecnologías, o por celdas con materiales novedosos; lo que permite a la tecnología evolucionar junto con los avances en materiales (REnhu, 2014), como se muestra en la figura 2.4.

Es importante mencionar que según lo publicado por los creadores de esta tecnología en 2014, “La tecnología HCPV con reflector parabólico mantiene la promesa de electricidad solar a un costo menor que la tecnología de paneles fotovoltaicos planos, siempre y cuando los costos del seguimiento solar de dos ejes pueda ser minimizado” (Angel, Cuerden y Whiteside, 2014).



Figura 2.3. Unidad de potencia de 3ra generación de tecnología de la UA (REhnu Technology Overview, 2014).

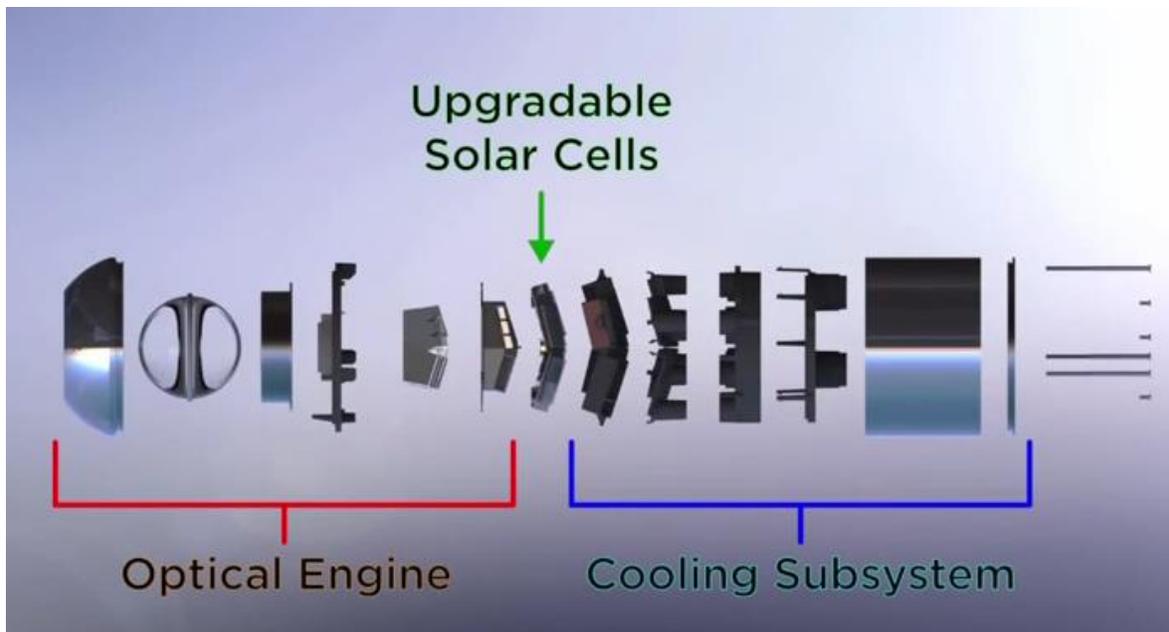


Figura 2.4. Componentes que integran la unidad de potencia de tecnología de U of A (REhnu Technology Overview, 2014).

2.8 Tecnología PETE

Una de las posibilidades para mejorar el diseño de la tecnología desarrollada en la Universidad de Arizona es la de sustituir las celdas fotovoltaicas de triple unión, por celdas termoiónicas mejoradas por fotones (PETE, por sus siglas en inglés); como se menciona en el proyecto “Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados” aprobado por el programa Centros Nacionales de Innovación Energética Solar (CEMIEsol).

Los convertidores de energía termoiónicos (TECs, por sus siglas en inglés) son máquinas térmicas que convierten el calor en electricidad. Un convertidor termoiónico simple consiste en un cátodo caliente y un ánodo frío, separado por una brecha de vacío. En el cátodo TEC, una fracción de los electrones tienen suficiente energía térmica para superar la función de trabajo del material y escapar al vacío, generando una corriente entre los dos electrodos (Schwede et al., 2010). Los convertidores termoiónicos fueron propuestos y fabricados por primera vez en la década de 1950, con eficiencias de conversión experimentales que alcanzaban 10 – 15% (Hatsopoulos, 1958).

Los programas espaciales estadounidenses y soviéticos financiaron el desarrollo de TECs para misiones de espacio profundo, y otras aplicaciones que requerían generadores de alta potencia autónomos, pero la tecnología nunca fue comercializada. Los principales retos de la conversión termoiónica tienen que ver con altas temperaturas y densidades de corriente substanciales requeridas para una operación eficiente (Adams, 2006).

La tecnología PETE (photon enhanced termionic emission, en inglés) combina el efecto fotovoltaico y el termoiónico en un solo proceso físico para tomar ventaja de la energía “per-quanta” de los fotones y de la energía térmica disponible por medio de las pérdidas por termalización y absorción. Un dispositivo PETE (figura 2.5a) tiene la misma brecha de vacío en placas paralelas que un TEC, excepto que tiene un semiconductor tipo p como cátodo (Schwede et al., 2010).

El efecto PETE ocurre en un proceso simple de tres pasos: primero, los electrones en el cátodo PETE son excitados por la radiación solar dentro de la banda de conducción. Segundo, estos electrones se termalizan dentro de la banda de conducción hacia la distribución del equilibrio térmico de acuerdo a la temperatura del material, difundándose a lo largo del cátodo. Tercero, los electrones que encuentran la superficie con energías superiores a las de afinidad del electrón puede emitir directamente hacia el vacío y son colectadas en el ánodo, generando una corriente (Schwede et al., 2010).

Cada electrón emitido colecta la energía fotónica para sobrepasar la banda prohibida, y también la energía térmica para sobrepasar la afinidad de electrón del material. El voltaje total producido puede por tanto ser mayor que para una celda fotovoltaica con la misma banda prohibida gracias al ‘impulso térmico’, y por lo tanto utilizando más completamente el espectro solar. El calor residual puede ser utilizado por una máquina térmica como un motor stirling (Schwede et al., 2010).

La figura 2.5b es un diagrama de flujo de energía del proceso PETE en tándem con una máquina térmica. La radiación del sol es absorbido por el cátodo, el cual emite radiación de cuerpo negro fuera del dispositivo y hacia el ánodo. Una corriente de electrones desde el cátodo es absorbida por el ánodo, entregando energía en forma

de calor. El exceso de calor en el ánodo causado por los electrones y fotones del cátodo es liberado como radiación de cuerpo negro o corriente inversa, o entregada a un ciclo térmico, que la convierte en un trabajo útil.

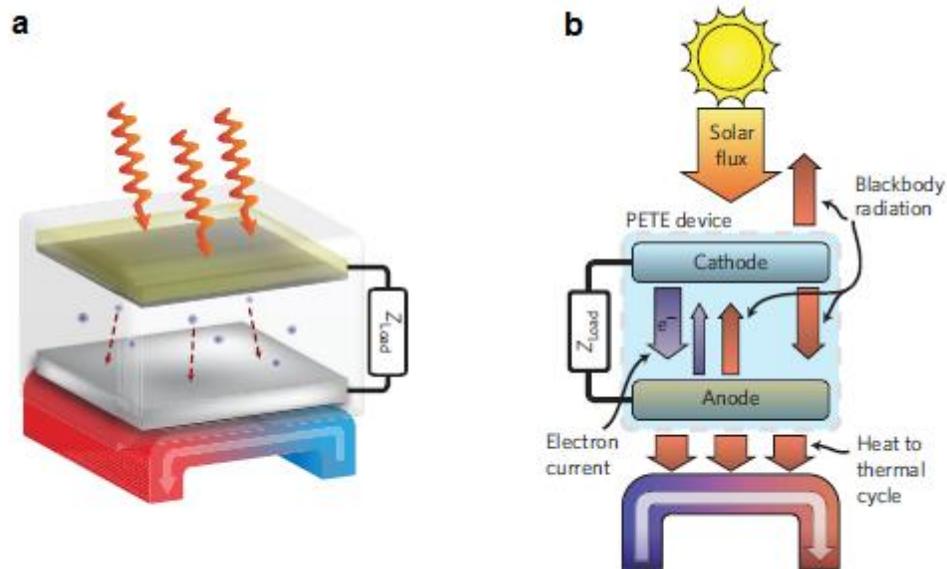


Figura 2.5. a, Dispositivo PETE en tándem con una máquina térmica. b, Diagrama de flujo de energía en un dispositivo PETE en tándem con una máquina térmica (Schwede et al., 2010).

2.9 Seguidores solares para HCPV

Las tecnologías de concentración utilizan la radiación solar directa, por lo que requieren seguir al movimiento aparente del sol a lo largo del día. Deben por tanto, integrar una estructura automática de seguimiento solar, con la capacidad de montar y posicionar la óptica de concentrador de manera que la radiación solar directa esté siempre enfocada en las celdas. Este seguidor solar está compuesto básicamente por una estructura que contiene una superficie para coleccionar la radiación solar en donde se colocaran los módulos o sistemas solares, los cuales son acoplados de alguna manera a un sistema de accionamiento mecánico de dos ejes, además de un sistema de control de movimiento en el que se instala una rutina de seguimiento solar, que opera el sistema de accionamiento mecánico, y mantiene un apuntamiento óptimo de la superficie coleccionadora hacia el sol (Luque-heredia, et al. 2012).

Según Angel (et al., 2014) si la tecnología HCPV debe competir satisfactoriamente contra la generación de electricidad a partir de fósiles, esta debe suponer costos totales de instalación menores que los sistemas que utilizan paneles fotovoltaicos planos. El costo del seguimiento solar para cualquier tecnología HCPV requiere especial atención debido a los requerimientos de precisión, los cuales son más exigentes que los de paneles planos utilizados en generación a gran escala.

Casi todos los diseños de concentradores fotovoltaicos comerciales o en desarrollo usan un seguimiento de dos ejes llamado seguidor de pedestal, con la configuración más común de ejes azimut-elevación, seguido de la configuración 'Tilt-roll' (ecuatorial), que opera con los ejes declinación-hora. Sobre el control del seguimiento, los primeros sistemas utilizaban sensores análogos para detectar al sol y posicionar el mecanismo, basados en tecnologías de sombreado o diferencias en la iluminación de sensores de luz, o celdas fotovoltaicas, integrando un lazo cerrado automático con los motores que movían a los mecanismos. El desarrollo de microcontroladores de bajo costo motivo la aparición de sistemas de seguimiento solar que no requieren sensores, y basados solamente en el cálculo digital de ecuaciones analíticas de posicionamiento solar de alta precisión (Luque-Heredia, et al. 2012).

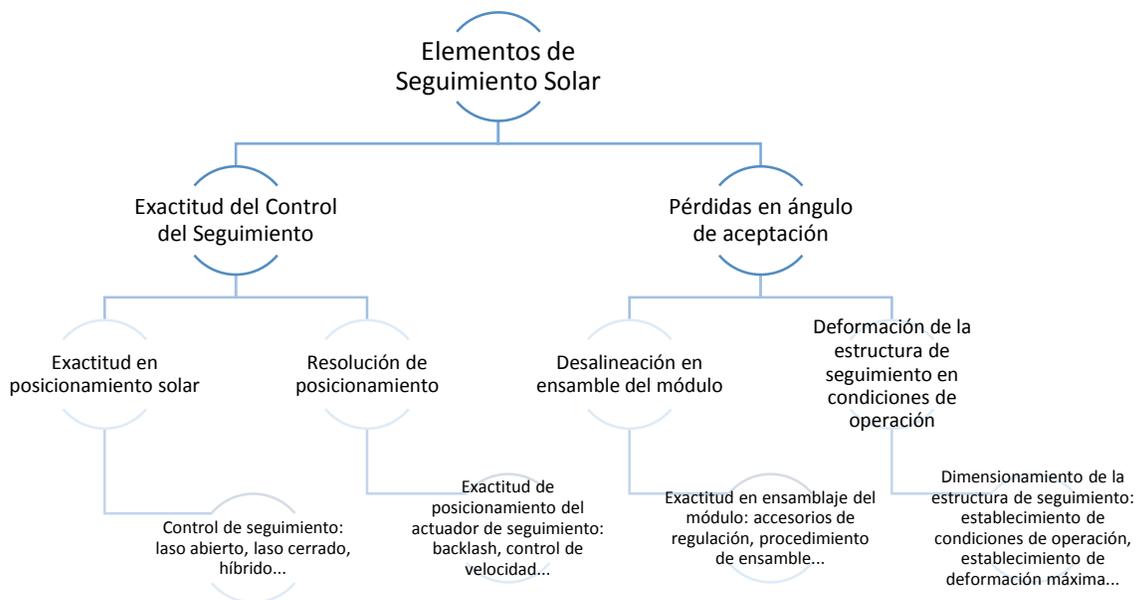
2.10 Requerimientos y especificaciones de seguidores

El principal objetivo que debe cumplir un seguidor solar de concentración es alinear permanentemente el eje de apuntamiento del sistema de concentración con el vector solar local, de manera que se produzca el mayor salida de potencia (Luque-Heredia, et al. 2012). Aunque el seguidor solar puede incrementar la ganancia de energía de un arreglo fotovoltaico, en su instalación hay algunos problemas como el costo, la fiabilidad, el consumo de energía, mantenimiento y desempeño, los cuales deben tomarse en cuenta (Mousazadeh, et al. 2009)

Sin embargo, existen varias fuentes de error que hay que tomar en cuenta, por lo que se requiere tolerancia a la desalineación o "off-tracking". Usualmente, esta tolerancia, o precisión de seguimiento mínima requerida, caracterizada por medio del ángulo de aceptación del sistema de concentración, normalmente definido como

el ángulo de off-tracking en cual la potencia de salida cae por debajo del 90% (Luque-Heredia, et al. 2012).

La Gráfica 2.5 muestra las causas de la reducción del rendimiento del seguimiento solar, que pueden ser clasificadas en dos tipos principales: aquellas relacionadas solamente al apuntamiento preciso del seguidor hacia el sol, y aquellas que provocan la contracción del ángulo general de aceptación del sistema de concentración, haciendo que se tenga que incrementar la precisión de seguimiento requerida.



Gráfica 2.5. Factores que afectan el desempeño del seguimiento solar relacionados con la exactitud del control de seguimiento o con las pérdidas en el ángulo de aceptación.

Entre aquellas causas relacionadas con pérdidas del ángulo de aceptación producidas por el sistema de seguimiento son, por una parte, producidas por la precisión que se pueda lograr en el montaje y alineación del sistema de concentración sobre el seguidor. Este es, en primera instancia, un problema de diseño que tiene que ver con los accesorios mecánicos provistos para este propósito, la precisión de su ensamble, y los medios de regulación provistos para nivelar los módulos, pero también los protocolos de montaje diseñados para llevar a cabo esta tarea. Otro factor que reduce el ángulo de aceptación es la rigidez

conferida al seguidor, es decir la deformación permitida de los diferentes elementos de su estructura en condiciones de operación.

Sobre las otras causas que tienen que ver con la precisión del seguimiento, son básicamente, por un lado, la exactitud del posicionamiento de las coordenadas del sol generadas por el sistema de control, expresadas en términos de rotación de ángulos de los ejes del seguidor. Estas serán producidas por los cálculos computacionales del sistema de control, en lazo abierto, o resultado de la retroalimentación del sensor de detección solar, en lazo cerrado, o la combinación de ambas. De cualquier manera, la posición del sol calculada va a ser afectada por varias fuentes de error. Por otro lado, se tendrá que contar con la precisión con la que el seguidor pueda ser posicionado a dicha orientación calculada. Como lo menciona Luque Heredia (et al., 2012), un ejemplo es “la resolución del posicionamiento del actuador del seguidor y su sistema de control, que depende del desempeño del control de la velocidad del seguimiento y del ‘backlash’ mecánico de los engranajes del actuador”.

Para el dimensionamiento del seguidor solar, las cargas de viento son decisivas y por eso deben conocerse lo más precisamente posible (Pfahl, Buseleier y Zschke, 2011). La caracterización de las condiciones de operación para un seguidor de concentración consiste, básicamente, en ajustar o establecer un valor para la velocidad máxima de viento que hay que soportar durante la operación de seguimiento. Entre mayor sea esta velocidad, más pesada y más costosa será la estructura requerida para mantener las deformaciones por debajo de un nivel necesario para un seguimiento preciso. Una aproximación barata y eficiente es determinar la llamada máxima velocidad de viento en operación (MSWS, por sus siglas en inglés) mediante una correlación cruzada entre la velocidad de viento y la radiación solar directa, en la locación o grupo de locaciones en los cuales se planea comercializar e instalar los seguidores. Cuando la velocidad de viento esté por arriba de este valor, las especificaciones de rigidez no tienen que ser cumplidas y el seguidor puede cambiar a modo de protección, o sea, una posición en la que el arrastre del viento se disminuya.

Se han realizado estudios buscando esta correlación (Randall y Grandjean, 1983) basadas en información de un período de 12.5 años obtenida de 26 estaciones meteorológicas SOLMET, las cuales se encontraban distribuidas alrededor de Estados Unidos. Estas correlaciones indicaron que, en las 26 estaciones, el 95 por ciento de la radiación solar directa disponible ocurría a velocidades de 11 m/s o menores. Estos resultados implican que el criterio de diseño MSWS para seguidores solares pueden ser menos rigurosas que las que se requiere para los criterios de sobrevivencia en la posición de protección (o stow, en inglés).

Un análisis más detallado del umbral de velocidad de viento puede ser obtenido si se es posible obtener una función que relacione el costo del seguidor vs. el MSWS, para un diseño de seguidor particular seleccionado para el proyecto. Considerando que podremos estimar la energía producida por el sistema de concentración por decir, su vida operativa útil, también como función del MSWS, podremos ser capaces de obtener un costo de electricidad y determinar el valor óptimo de MSWS en el que el menor costo de electricidad ocurre, como lo realizó el especialista español de seguidores solares, Inspira (Luque-Heredia et al., 2003).

Existe la posibilidad de optimizar costos al diseñar el seguidor solar para una cierta locación, lo que sería una buena opción siempre y cuando se construya una planta de gran escala, proveyendo la oportunidad de ajustar parámetros en el diseño de la estructura y su manufactura, además de poder hacerlo sin comprometer el costo beneficio de la cadena de suministro (Cristóbal, Martí y Luque, 2012).

Otra variable involucrada en la caracterización de las condiciones de operación es la deformación máxima aceptada, medida en la superficie de abertura, y que tiene intención de establecer un límite en las pérdidas causadas por la flexibilidad del seguidor en el ángulo de aceptación de sus módulos CPV. La determinación del valor del criterio de deformación máxima permitida dependerá del ángulo de aceptación la tecnología CPV particular, para la cual se diseña el seguidor, teniendo en mente que la precisión final de este será comprendida dentro del ángulo de aceptación total del arreglo CPV (Luque-Heredia, et al. 2012).

La fatiga en los componentes de los seguidores solares es un tema que se ha estudiado recientemente (Blackmon, 2014; Ho et al., 2012). Los requerimientos de los seguidores solares son basados en el uso de fuerzas de viento dinámicas, especificadas para un período de vida de 30 años. Desde el punto de vista de la fatiga, alcanzar esta vida útil dependerá del factor de seguridad utilizado. La selección del factor de seguridad utilizado es difícil para cualquier diseño enfrentando incertidumbre y condiciones de operación altamente variables. Esto es especialmente cierto para seguidores solares, los cuales están sujetos a cargas de viento cíclicas aún en posición de reposo (stow, en inglés). A lo largo de las últimas décadas ha habido ejemplos de seguidores solares diseñados con factores de seguridad relativamente bajos que incurren en fallas prematuras atribuibles a condiciones de velocidad de viento especialmente altas, pero posiblemente la fatiga y la amplificación de cargas dinámicas jugaron un papel al mismo tiempo. Estudios como los de Veers (1987) han documentado que los seguidores solares son sujetos a decenas de millones de ciclos de carga de viento en su vida útil requerida de 30 años, y que estos ciclos contribuyen a daños por fatiga acumulada. Uno de los componentes especialmente vulnerable a esta condición son las unidades de accionamiento o drive units (Blackmon, 2014).

Cómo lo comenta Luque Heredia (et al., 2012), ¿cómo medir la precisión del seguimiento es todavía un tema no resuelto, pues a la fecha no existe un instrumento estándar, o procedimiento de medición, capaz de proveer la sensibilidad suficiente para medir los rangos de precisión de fracciones de grado utilizados normalmente. Con frecuencia, los desarrolladores de tecnologías CPV pasan por alto esta cuestión, y siempre hablan de las altas precisiones de seguimiento solar que pueden alcanzar, sin proveer ninguna explicación de cómo las midieron. La medición de la precisión del seguimiento requiere básicamente del monitoreo continuo de diferentes ángulos con respecto a la posición que produce la máxima potencia de salida. Los autores proponen un instrumento de medición basado en un sensor de imágenes de estado sólido para realizar las mediciones mencionadas.

A parte del rendimiento del seguimiento solar, el tiempo de inactividad o la relación de disponibilidad es otra preocupación relacionada a los seguidores de concentración. Supuestamente, se considera al mecanismo y estructura del seguidor 'libre de culpa', siempre y cuando se cumplan con los códigos estructurales pertinentes en el diseño, y tomando en cuenta los engranajes están sujetos a un desgaste muy bajo, una rotación por eje al día, comparado con las aplicaciones comunes en el mercado de las máquinas herramientas, grúas, etc. La mayoría de los problemas reportados tienen que ver con las partes eléctricas y electrónicas las cuales, primero que nada, son diseñadas para operar en exteriores, pero también cumplen con las normas de compatibilidad electromagnética (EMC, por sus siglas en inglés) y los estándares de seguridad eléctricos, anticipando así los problemas de campo comunes como picos o subidas de tensión. Cuando cantidades considerables de software son involucrados, como sucede actualmente con los sistemas de control de seguimiento solar que integran microprocesadores, no es solo una cuestión de un diseño electrónico fiable y bien protegido, sino también de código redundante, inmune a bloques y capaz de recuperarse con gracia de interrupciones de potencia y tropiezos (Luque-Heredia, et al. 2012).

2.11 Arquitecturas de seguidores solares

Existe una gran cantidad de tipos de mecanismos de seguimiento solar, algunos expuestos en la literatura como propuestas de diseño y otros disponibles comercialmente. Mousazadeh (et. al, 2009) analizó los principios y los métodos de seguimiento solar para maximizar la potencia de salida de los sistemas solares, encontrando que las arquitecturas más populares y eficientes de seguimiento son los de eje polar y los altazimutales.

Los seguidores solares han sido clasificados tradicionalmente en dos categorías: los seguidores pasivos (mecánicos) y los seguidores activos (electromecánicos). Los seguidores pasivos se basan en la expansión térmica de un gas (típicamente argón) o en aleaciones con memoria. Normalmente este tipo de seguidores se compone de un par de actuadores encontrados donde si la radiación es igual en ambos, el mecanismo es balanceado, pero si la radiación es diferente, el sistema

se desbalancea provocando el movimiento de su superficie colectora hasta que la radiación sea equitativa, para detener el movimiento. Estos seguidores son menos complicados pero trabajan con bajas eficiencias, y en bajas temperaturas dejan de funcionar. Aunque los seguidores pasivos son más económicos que los seguidores activos, no han sido bien aceptados por el consumidor (Mousazadeh, et. al 2009). La figura 2.6 muestra el principio de operación de este tipo de dispositivos.

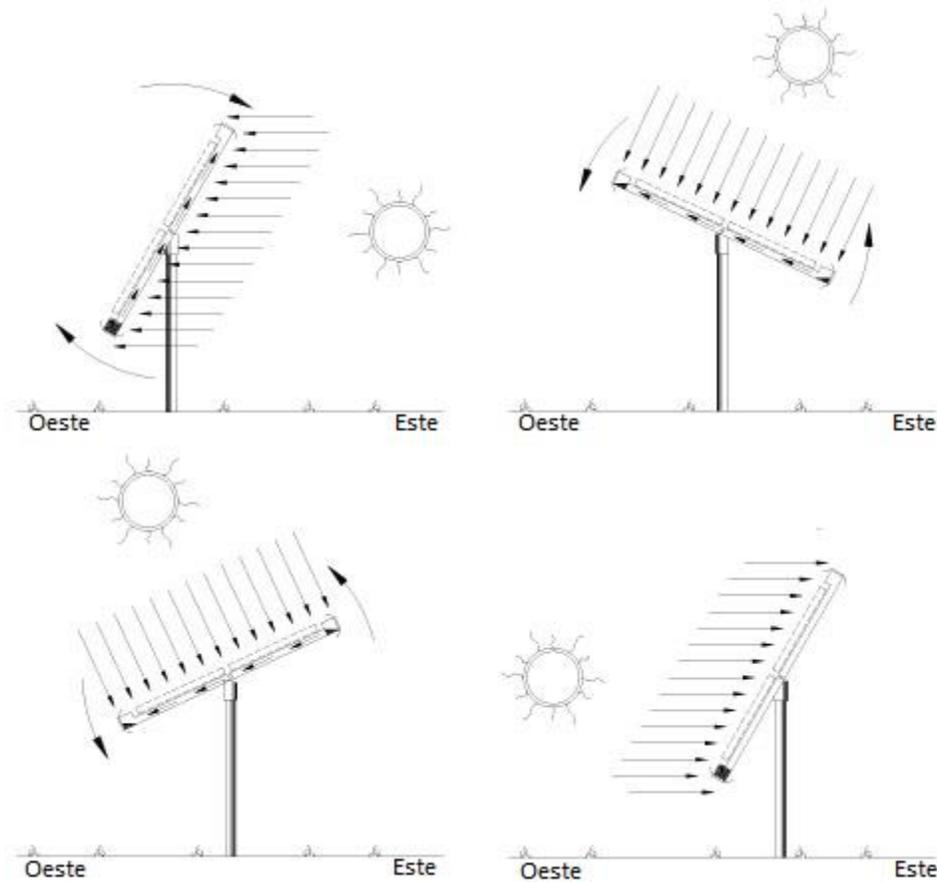


Figura 2.6. Principio de operación de los seguidores solares pasivos (AWWASC, 2014).

Los seguidores solares activos pueden categorizarse por los grados de libertad que manejan. Los seguidores solares de un grado de libertad pueden realizar el movimiento a lo largo de diferentes ejes según el diseño, como puede ser de norte a sur (como el modelo MS-1EH, de Mecasolar), de este a oeste (como el modelo Everlight ELT-540E, de Helios Photovoltaic), en eje polar (como el modelo MS-1EP, de Mecasolar), o incluso en el azimut (como el MS-1E, de Mecasolar). La figura 2.7 muestra el modelo Modelo MS-1EH de Mecasolar.



Figura 2.7. Modelo MS-1EH, el actuador lineal mueve varios arreglos de paneles dispuestos alrededor de un eje, situado de norte a sur (1 Axis Solar Tracker, 2012).

Por otro lado, los seguidores solares de dos ejes pueden ser altazimutales o polares con ajuste automático de elevación, aunque en la literatura existen configuraciones diferentes como el diseño propuesto por Barker (et. al, 2013) en la Universidad de Santa Clara del cual se hablará más adelante. La arquitectura altazimutal más utilizada en los diseños propuestos en la literatura consiste en una estructura metálica que contiene los colectores solares, los cuales pueden ser planos o de concentración. Dicha estructura está sujeta a un mecanismo que le provee el movimiento de inclinación, el cual puede estar activado por un tren de engranes (como el modelo SF45 de Feina, Fig 2.8) o con un actuador lineal (como el modelo MS-2 de Mecasolar).

El movimiento de azimut de este tipo de configuración es típicamente provisto por un mecanismo de engranes los cuales pueden contener un engranaje simple sin-fin corona (como el modelo SF45 de Feina), un engranaje “slew-drive” como el propuesto por Angel (et. al, 2014), o un engranaje “slew-ring” (como el modelo MS-2 de Mecasolar). El sistema compuesto por la estructura metálica y los mecanismos

de movimiento es soportado por un poste metálico o de concreto, o por una armadura (como el modelo SF45 de Feina).

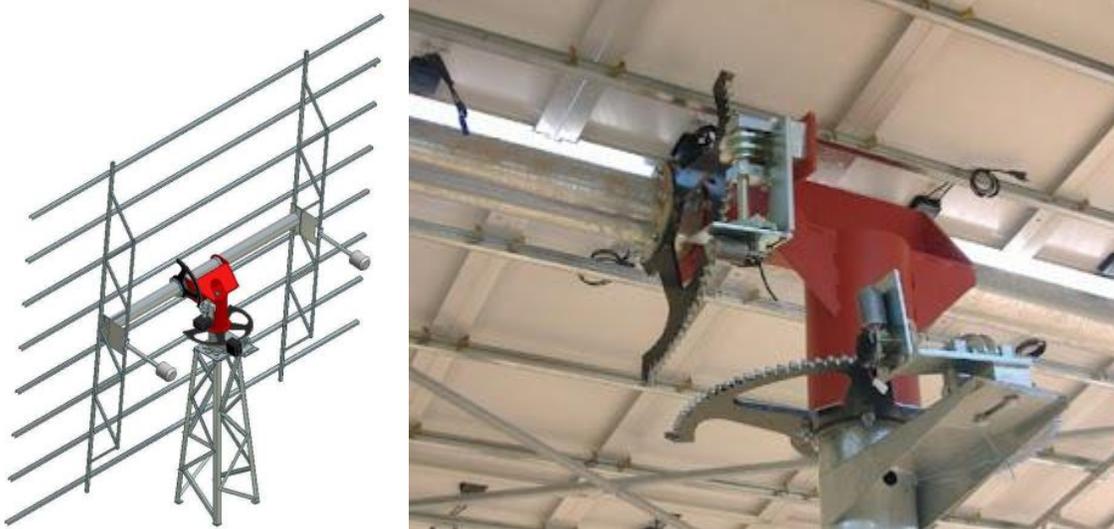


Figura 2.8. Modelo SF-45 de Feina con engranaje sin-fin corona en movimientos de inclinación y azimut (Tracker Feina, 2014).

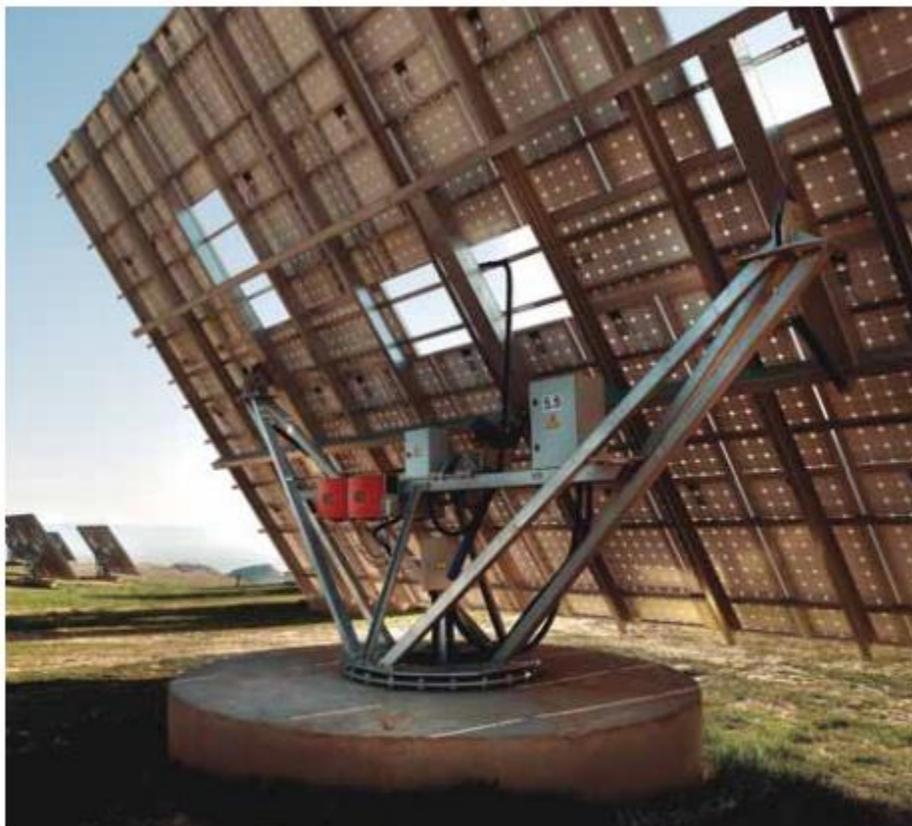


Figura 2.9. Modelo MS-E2 de Mecasolar con movimiento de elevación provisto por actuador lineal y movimiento azimutal por engranaje "slew-ring" (Mecasolar, 2014).

El seguidor polar de dos ejes contiene mecanismos que permiten impulsar el movimiento de volteo y de elevación con actuadores lineales. En modelo IntelliTrack 3000 de Sedona Solar Technology (Fig 2.10), paneles planos son colocados en arreglos dispuestos para que con un mecanismo de barras impulsado por un actuador lineal se provea el movimiento de volteo. El diseño propuesto en la Universidad de Santa Clara (Barker et. al, 2013) para paneles de concentración, utiliza actuadores lineales para proveer el movimiento necesario para apuntar un concentrador parabólico en los dos ejes (Fig 2.11).

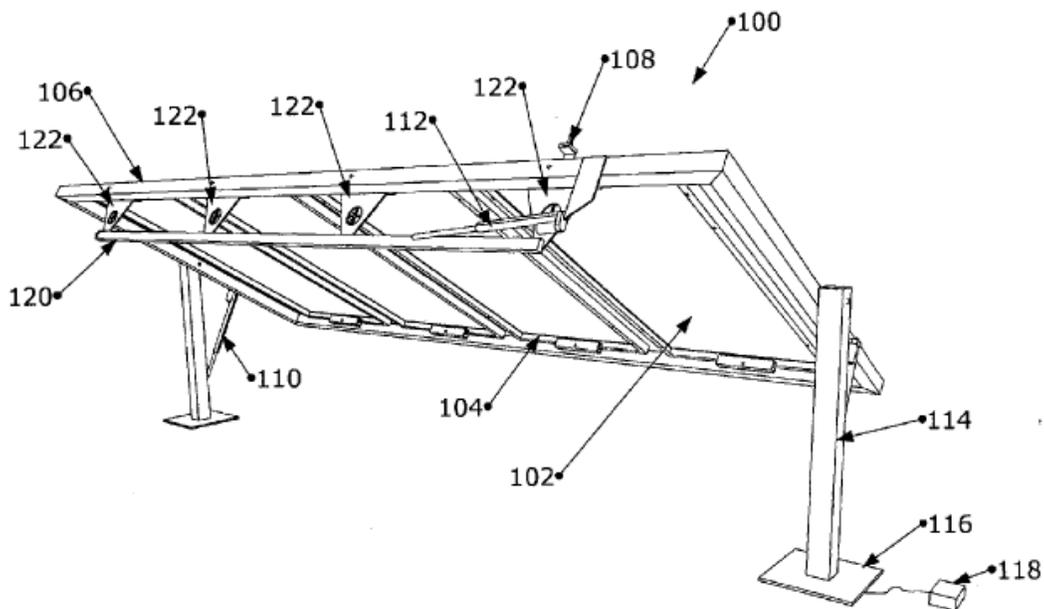


Figura 2.10. Seguidor polar de arreglos de Sedona Energy Labs (US 20120235017).

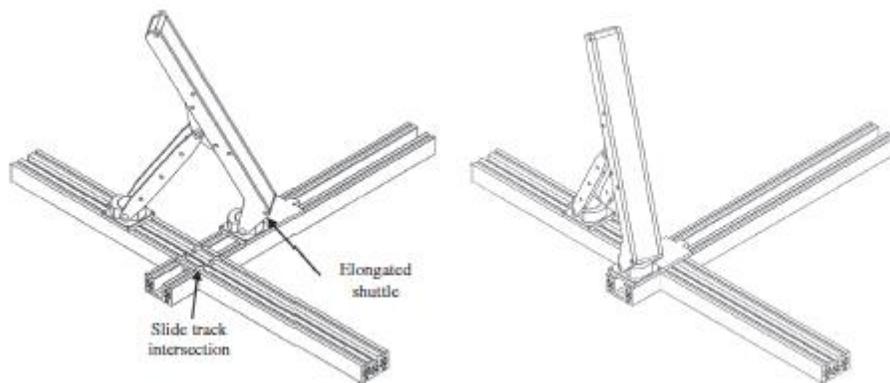


Figura 2.11. Seguidor solar de dos ejes de bajo perfil desarrollado en la Universidad de Santa Clara (Barker et. al, 2013).

2.12 Cargas de viento, deformación estructural y las pérdidas en el ángulo de apertura

A medida que la tecnología fotovoltaica de concentración se vuelve más importante para la producción energética mundial, los seguidores solares se producen en cantidades cada vez mayores. Para su dimensionamiento, las cargas de viento son decisivas y por lo tanto se deben conocer lo más precisamente posible (Pfahl et. al, 2011).

Peterka y Derickson (1992) estudiaron extensivamente las cargas de viento en heliostatos mediante túneles de viento. Sus reportes documentaron los coeficientes de carga de viento para los mayores componentes. Estudios posteriores (Pfahl, 2011), repitieron el experimento con heliostatos de diferentes formas, cambiando el radio de aspecto, encontrando correlación entre el arrastre del viento y el radio de forma de la superficie colectora (o reflectora en el caso de heliostatos).

El reporte de Peterka y Derickson (1992) explica los pasos a seguir para calcular el efecto de arrastre del viento en seguidores solares con superficie colectora cuadrados, en términos de fuerzas y torques en distintos ejes, que ayudan al diseñador de seguidores solares a dimensionar los elementos mecánicos y estructurales. El sistema de coordenadas propuesto por este estudio (Fig. 2.12) es ampliamente utilizado por estudios hasta nuestros días.

Las ecuaciones de Peterka y Derickson (1992) para el cálculo de los efectos del arrastre del viento en seguidores solares se enlistan a continuación (fuerzas en lb, momentos en lb-ft):

$$\text{Fuerza de arrastre:} \quad F_x = C_{F_x} * Q * A \quad (2.1)$$

$$\text{Fuerza de levante:} \quad F_z = C_{F_z} * Q * A \quad (2.2)$$

$$\text{Momento de volteo en base:} \quad M_y = C_{M_y} * Q * A * H \quad (2.3)$$

$$\text{Momento de bisagra:} \quad M_{H_y} = C_{M_{H_y}} * Q * A * h \quad (2.4)$$

$$\text{Momento azimutal:} \quad M_z = C_{M_z} * Q * A * h \quad (2.5)$$

$$\text{C}_{M_y} \text{ es obtenido por:} \quad C_{M_y} = C_{F_x} + C_{M_{H_y}} * \left(\frac{h}{H}\right) \quad (2.6)$$

Donde:

$$Q = \text{presión dinámica de la velocidad media del viento (psf)} \\ = 0.00256 * U^2 \text{ con U en mph (0.00256 incluye la densidad del aire al nivel del mar en condiciones normales);}$$

- U = velocidad media del viento a la elevación $H = U_{media} \left(\frac{H}{Z_{viento}} \right)^n$;
- n = exponente de la ley de potencia para viento normal;
- U_{media} = viento normal medio a la elevación $Z_{viento} = U_{max}/R$ ó $U_{media} = U_{ráfaga}/1.6$;
- $U_{ráfaga}$ = magnitud de la ráfaga de 2-3 segundos a la altura Z_{viento} sobre el suelo;
- $U_{máxima}$ = magnitud de la velocidad máxima a la altura Z_{viento} sobre el suelo;
- R = 1.30 si la velocidad máxima del viento es 90 mph } (Hollister, 1970)
 = 1.24 si la velocidad máxima del viento es 60 mph }
 R sin unidades;
- A = área de la superficie sólida (incluye aperturas en el área sólida si estas constituyen menos del 15% del área total (ft²);
- h = longitud de cuerda del heliostato (ft);
- H = altura del centro de giro hasta el suelo (ft);
- C_{Fx} = coeficientes respectivos de fuerza y momentos (sin unidades).
- C_{Fz}
- C_{My} ,
- etc

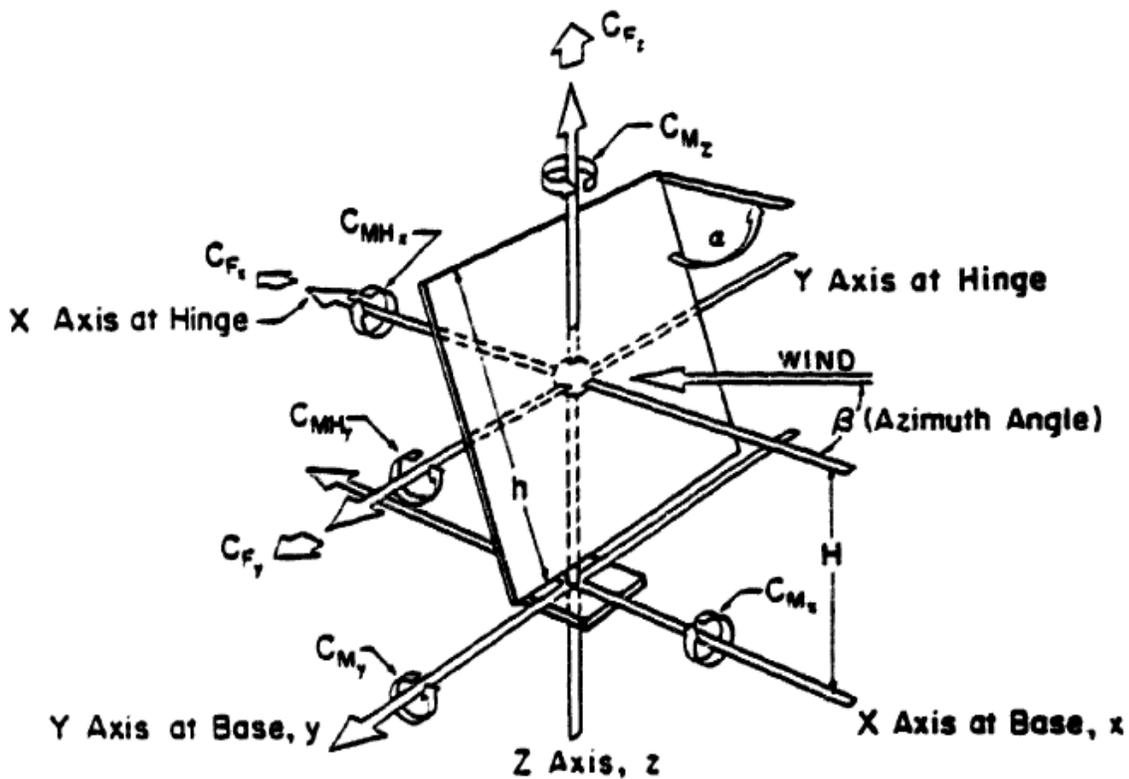


Figura 2.12. Sistema de coordenadas para seguidores solares (Peterka y Derickson, 1992).

Los coeficientes de fuerza y momentos se determinaron experimentalmente en una prueba de túnel de viento, instrumentando seguidores solares con superficies colectoras planas, donde se determinó además los casos más críticos, la siguiente tabla (2.1):

	F_x, M_y Max	F_z, M_{Hy} Max	M_z Max	Cargas en Stow
α , grados	90	30	90	0
B, grados	0	0	65	0
Cargas Máximas				
F_x	<u>4.00</u>	2.10	3.70	0.60
F_z	1.00	<u>2.80</u>	0.50	0.90
M_{Hy}	0.25	<u>0.60</u>	0.15	0.20
M_z	0.29	0.06	<u>0.07</u>	0.02
Cargas Medias				
F_x	<u>2.00</u>	1.00	1.60	0.10
F_z	0.30	<u>1.35</u>	0.30	0.10
M_{Hy}	0.02	<u>0.25</u>	0.02	0.02
M_z	0	0	<u>0.25</u>	0
$n = 0.15$		$Tu = 18\%$		$Zo = 0.03$

Tabla 2.1. Coeficientes de carga de viento para heliostato plano donde un componente es el máximo (Peterka y Derickson, 1992).

Las cargas de viento producen esfuerzos y deformaciones en los componentes del seguidor solar, y deben ser calculadas para asegurar primero la integridad estructural del mismo, y segundo el efecto de las deformaciones en el ángulo de apertura del seguidor. Luque - Heredia (et al., 2012) nos muestra un ejemplo de lo anterior en el libro “Next Generation Photovoltaics”: En un seguidor solar de dos ejes de pedestal diseñado por Inspira, con una superficie colectora (o de apertura) de 30 m², diseñada para módulos de concentración fotovoltaica con un factor de concentración de 1,000x en desarrollo por el productor español de fotoceldas Isofoton. Los módulos tienen un ángulo de aceptación nominal de $\pm 0.6^\circ$, determinado mediante pruebas de laboratorio con un láser colimado. Sustrayendo a ese ángulo 0.26° , la mitad del ángulo del sol, significa que se requirió 0.34° de precisión en el seguimiento.

En el desarrollo del seguidor de Inspira, se introdujo una sobreestimación de la precisión para permitir pérdidas del ángulo de aceptación extras durante errores en el nivelado de los módulos por encima de la superficie colectora del seguidor, tomando como la pérdida de apertura máxima causada por la deformación de la estructura de 0.01° . Esto significa que es el giro máximo inducido por la deformación estructural de cualquier vector normal a la superficie de apertura cuando se encuentra en condiciones de operación, en cualquier inclinación de la superficie de apertura (Inspira utilizó 43 km/h como velocidad de operación máxima, y el cálculo

fue realizado cuando el viento sopla desde atrás o por enfrente de la superficie reflectora).

El primer paso fue escoger la arquitectura (o topología) de la estructura metálica (o frame). Esto se realizó determinando solamente el largo de las vigas estructurales y sus conexiones alrededor de la transmisión de elevación, buscando la optimización de diferentes aspectos como transportación, instalación en campo, montaje de los módulos fotovoltaicos de concentración, etc. Una vez se decidió la forma del frame, se determinó las formas específicas de los elementos estructurales tomando en cuenta el ratio de rigidez contra peso, costos, disponibilidad en el mercado, costos de manufactura, etc. (Luque-Heredia, et al. 2012).

En este punto, las limitaciones de rigidez empezaron a mandar sobre el diseño, lo que hizo necesario un análisis preciso con elementos finitos sobre la estructura completa, cuando esta se encontraba bajo las cargas máximas de operación (el peso propio de la estructura, el peso de los módulos fotovoltaicos y las cargas por el arrastre del viento). Se obtuvo así una solución basada en vigas estructurales estándar, que resultó en el menor peso de la estructura de seguidor que, acorde con las simulaciones de elementos finitos, no pase de 0.1° de pérdida de ángulo de apertura en cualquier parte de la superficie de apertura. El análisis se realizó en tres segmentos separados (1) el frame, (2) el pedestal y los mecanismos de giro y (3) la cimentación.

Una vez que el dimensionamiento de la estructura fue optimizado, el siguiente paso fue la determinación de las pérdidas en el ángulo de apertura inducidas por la deformación en la estructura determinada por el análisis de elementos finitos. Una aproximación a este problema fue realizada mediante un modelo geométrico en el cual, asumiendo que cada módulo CPV montado en la superficie de apertura se considera sin deformación en las condiciones de operación, un vector normal se considera en cada módulo CPV, como se ve en la Fig. 2.12. Este vector normal se considera como el vector de apuntamiento de cada módulo, cuando este vector es alineado con el vector solar se produce la máxima producción de potencia. El ángulo de aceptación para cada módulo es caracterizado por un cono con el eje central en

el vector de apuntamiento, y con un ángulo igual al ángulo de apertura del módulo. Simplificando, la potencia se asume como cero fuera del cono de aceptación, por lo que el peor caso debe ser tomado en términos de las pérdidas en el ángulo de aceptación. El método de determinación de las pérdidas del ángulo de aceptación por la deformación estructural es profundizado en el capítulo “El seguidor solar en fotovoltaicos de concentración” del libro “Siguiendo generación de fotovoltaicos” (2012).

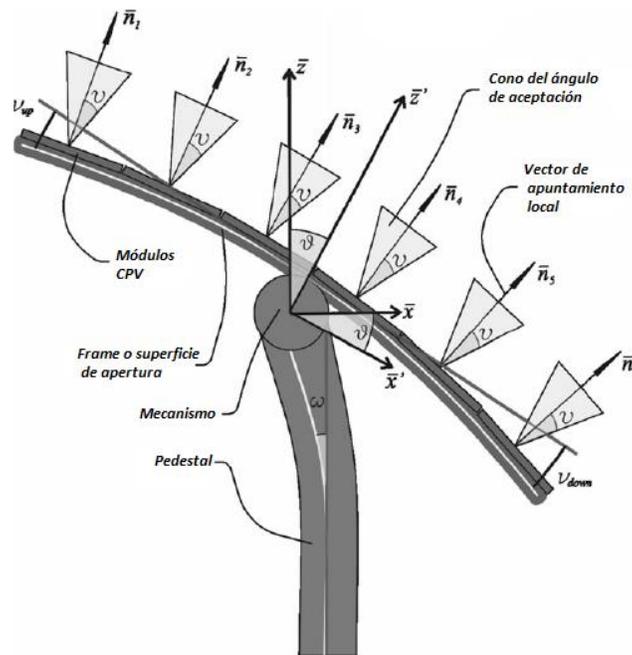


Figura 2.13. Sección transversal de un seguidor de pedestal sujeto a flexión. A una cierta elevación de apertura (ángulo zenit θ). Los vectores locales de apuntamiento para cada módulo \vec{n}_i y sus conos formados por sus ángulos de aceptación (ψ) (Luque-Heredia, et.al 2012).

El uso de elementos finitos para el cálculo de la flexión máxima ha sido ampliamente utilizado por estudios en la literatura. Chih-Kuang (et. al, 2013) realizó una simulación de las cargas de viento mediante un software comercial de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Los valores de las presiones en el seguidor solar determinadas por el estudio fueron introducidos al análisis estructural de elementos finitos, calculando los esfuerzos y deformaciones en la estructura del seguidor. Para comprobar sus resultados, se construyó un seguidor solar para realizar mediciones con sensores de deformación, tomando en cuenta cargas de gravedad solamente.

Gong (et. al, 2012) realizó un estudio para determinar la respuesta dinámica inducida por el viento en un heliostato. Mediante un túnel de viento determinaron los coeficientes de presión y los compararon con los de Peterka y Derickson (1992). Introdujeron estos valores a una simulación con elementos finitos para calcular el desplazamiento, la distribución de esfuerzos y la frecuencia natural de la estructura.

2.13 Control en seguidores solares

Los primeros controladores solares fueron desarrollados con lazos de control cerrado integrando sensores solares capaces de proveer señales de error de apuntamiento, una por cada eje, que generaban los movimientos de control. Estos sensores estaban constituidos por un par de fotodiodos y alguna clase de dispositivo de sombreamiento, que proyectaba una sombra diferente a estos fotodiodos cuando no estaban alineados al sol, por lo que cada uno generaba una corriente diferente (Fig. 2.14a). Además, los fotodiodos podían ser montados en planos inclinados para incrementar la sensibilidad del sensor por el efecto coseno (Fig. 2.14b). Otra configuración muy común en aplicaciones CPV es en la que el elemento de sombreamiento es un tubo de colimación para evitar que la radiación difusa entre al sensor, haciendo más preciso la detección de la desalineación (Fig. 2.14c) (Luque-Heredia, et. al 2012).

Aunque los sistemas de lazo cerrado pueden ser económicos y simples de implementar, han venido dejándose de utilizar por problemas recurrentes que afectan su confiabilidad (Maish, 1991), mayormente causado por deriva en la electrónica analógica utilizada y el requerimiento de limpieza. Esto requiere de mantenimiento frecuente que puede ser financiable en los centros de investigación, donde se cuenta con personal especializado, pero no es factible para el control de plantas industriales a gran escala de seguidores solares. Peor aún, los controladores de lazo cerrado no han probado buen desempeño a menos que se tengan condiciones ideales de iluminación (Luque-Heredia, et. al 2012).

Una alternativa al control con sensores de apuntamiento solar es el cálculo computacional de las efemérides solares para convertirlas en ejes de giro para el

seguimiento, en un sistema de control a lazo abierto. Esto permite continuar con el seguimiento sin importar que tan claro (sin nubes) esté el cielo, y se puede programar fácilmente la gestión de situaciones donde se tiene que detener el seguimiento como la noche o mandar a posición de protección en casos de emergencia. Sin embargo, estos sistemas necesitan un sistema de tiempo muy preciso para alimentar el cálculo de las ecuaciones de efemérides solares, además, para implementar una precisión sub-gradados, se necesita algún dispositivo capaz de medir el giro en los ejes.

Los primeros heliostatos en campos termosolares utilizaban el lazo abierto para el control de sus posiciones, por el año 1981. Como en ese tiempo las computadoras eran costosas, se implementó un sistema de cálculo central en el que una computadora calculaba todas las posiciones y se las mandaba a cada uno de los heliostatos para que estos la siguieran mediante una red de comunicación en campo. A la llegada de microcontroladores económicos y sistemas electrónicos embebidos, se permitió el desarrollo de controladores de lazo abierto específicos, a precios factibles, que permitieron el control autónomo en cada seguidor en una planta (Luque-Heredia, et. al 2012).

El control de seguimiento autónomo no solamente es más factible por su configuración distribuida, pero también porque se libera de sistemas de comunicación complejos y costosos, que a parte de sus límites en cobertura, fue reportado frecuentemente por sus vulnerabilidades. Las primeras patentes y publicaciones proponiendo los sistemas de lazo abierto con controladores específicos pueden ser rastreadas hasta la década de los 80s (US 4,215,410). El controlador SolarTrack desarrollado al principio de los 90's por los Sandía Labs fue el primer esfuerzo serio y bien documentado realizado en esta dirección (Luque-Heredia, et. al 2012).

De cualquier manera, un controlador de lazo abierto, aunque opere con ecuaciones de efemérides muy precisas disponibles a la fecha, es afectado, una vez se conecta al campo con su concentrador correspondiente, por una serie de fuentes de errores que pueden degradar en gran medida su precisión de seguimiento por debajo del

valor nominal de las ecuaciones, hasta el punto de salirse de las especificaciones del concentrador. Entre estas fuentes de error, las más significativas tienen una naturaleza determinística. Son resultado de una caracterización deficiente del concentrador por el controlador, y operan sobre las transformadas empleadas para convertir las coordenadas de las efemérides solares, usualmente el formato Az.-El. topocéntrica horizontal utilizado en aplicaciones solares, a giro en los ejes de seguimiento. Las tolerancias de la manufactura y los procesos de ensamble e instalación del concentrador van a producir algunas desviaciones respecto a las especificaciones y por eso, también a las asunciones echas para transformar las coordenadas del sol en posiciones de los ejes de giro (Luque-Heredia, et. al 2012).

Derivas en el temporizador interno requerido para el cálculo computacional de las efemérides solares es otra fuente de error mayor y deben ser atendidas. Fuentes de errores de segundo orden, predecibles hasta cierto punto, como la flexión en la estructura causada por la gravedad en seguidores con una gran superficie de apertura, el efecto de falta de coincidencia en los ejes de seguidores multi-secundarios, o hasta inexactitudes de efemérides causadas por el efecto de la refracción atmosférica local, deben ser consideraras también. La retroalimentación de los errores en el seguimiento causados por esas fuentes debe ser integrada de alguna manera, en la estrategia de control, de manera que se eliminen. A esta estrategia basada en laso abierto pero integrando un laso de retroalimentación es mencionada en la literatura como la aproximación híbrida (Luque-Heredia, et. al 2012).

Luque-Heredia (2012) expuso dos tipos de controladores para seguidores solares híbridos: (1) el enfoque basado en el modelo calibrado y el (2) modelo de enfoque libre predictivo. El primero se basa en la modelación matemática del error, capaz de caracterizar una serie de fuentes sistemáticas de errores responsables de degradar la precisión de seguimiento por debajo de la provista por las ecuaciones de efemérides. Después de una sesión completa en un día claro midiendo los errores en el seguimiento (deriva), estos son utilizados para ajustar los parámetros del modelo. Siempre que la adquisición de las medidas del error es una tarea tediosa,

se requerirá algún grado de automatización cuando se utilice en plantas fotovoltaicas con grandes campos de seguidores, de manera que se permita la calibración de todos ellos y evitar que se ocupe personal para llevar a cabo la tarea.

Después de la sesión de calibración, el modelo del error sintonizado con los parámetros que mejor ajusten se utilizará en la transformación de las coordenadas del sol provisto por las ecuaciones de efemérides, y por eso, en principio, operará en un lazo abierto sin mayor requerimiento de retroalimentación del error de seguimiento. Este tipo de rutinas de autocalibración son utilizadas comúnmente en productos de instrumentación electrónica, enfoques muy similares son utilizados en la calibración del control de apuntamiento de muchos telescopios en observatorios científicos a lo largo del mundo (Luque-Heredia, 2012).

Por otro lado, el enfoque predictivo para el control híbrido del seguimiento solar evita realizar cualquier modelado del error y su ajuste subsecuente. En vez de esto, evita supuestos iniciales respecto a los errores de seguimiento que se encontrarán, por lo tanto, busca un concepto de propósito general capaz de superar cualquier grupo de errores de seguimiento de cualquier diseño de seguidor solar (Luque-Heredia, 2004). Para lograr lo anterior se requiere la integración de vigilancia permanente de la deriva, implicando un esquema de escaneo para determinar la correcta posición del sol. Para este caso, la corrección a la posición del sol provista por el algoritmo computacional (cálculon de efemérides) resultara de una estimación basada en una serie de medidas de la deriva pasadas y estimaciones, para este propósito, de un conjunto de herramientas matemáticas predictivas para series de tiempo. La Fig. 2.14 muestra el diagrama de control de este enfoque.

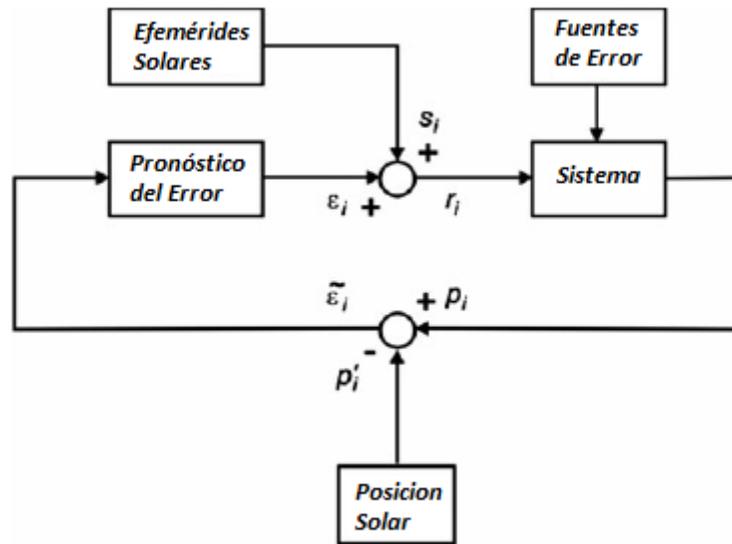


Figura 2.14. Modelación del error en control híbrido libre de seguimiento solar dependiendo del escaneo del error y pronóstico iterativo.

Por otro lado, es posible utilizar programadores lógicos programables (PLC, por sus siglas en inglés) para realizar las rutinas de control mencionadas. Abdallah y Nijmeh (2004), desarrollaron un seguidor solar de dos ejes implementando un PLC como controlador, utilizando un dispositivo LOGO 24RC de Siemens. Sungur (2009) diseñó un sistema de control para un seguidor solar de dos ejes para paneles fotovoltaicos, utilizando un PLC SIMATIC S7 200 de Siemens y su módulo analógico EM 232.

Recientemente, Siemens anunció la capacidad de su PLC SIMATIC S7-1200 para introducir el algoritmo especializado de posicionamiento solar (SPA, por sus siglas en inglés) desarrollado por el Laboratorio de Energías Renovables (NREL) de Estados Unidos. Con este algoritmo y utilizando transmisiones de alta precisión, el fabricante asegura que se pueden obtener precisiones de $\pm 0.05^\circ$ incluyendo las tolerancias mecánicas. La ventaja de la utilización de este tipo de dispositivos de control es su gran versatilidad para instrumentar los seguidores con electrónica de comunicación, anemómetros, dispositivos rastreadores de deriva, etc.

2.14 Métodos de evaluación de seguidores solares

El seguimiento solar preciso y verificable es un reto clave de frente a la industria solar y de seguidores solares, especialmente en los campos de concentración fotovoltaica (CPV). Las variaciones en la elevación del sol, cargas de viento y otras condiciones climatológicas a lo largo del año y en diferentes sitios hacen difícil predecir el comportamiento de un sistema de seguimiento solar con datos de pruebas en condiciones reales. Incluso en las etapas de desarrollo del seguidor, algoritmo de control, sistema o instalación en sitio, es difícil producir datos cuantitativos que demuestren el desempeño del seguimiento

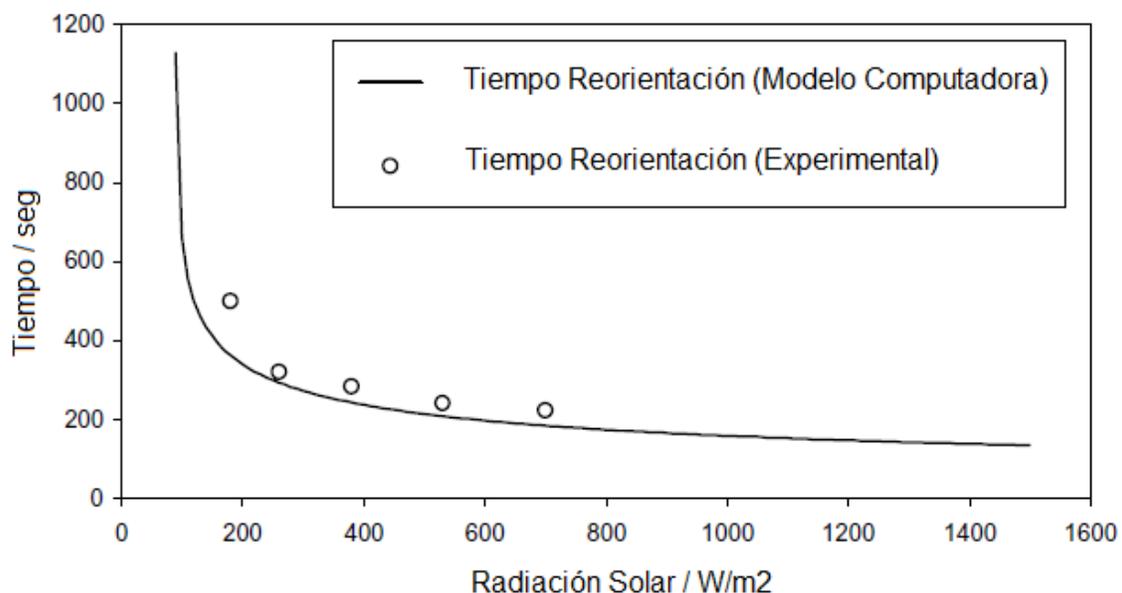
La salida del arreglo fotovoltaico (potencia, corriente, etc.) no es suficiente información para determinar la precisión del seguimiento, debido a que existen muchas condiciones que pueden contribuir a cambios en el desempeño total del sistema, por ejemplo la irradiación, radio de la irradiación global vs directa, temperatura de la celda, velocidad del viento afectando el enfriamiento de las celdas, deformaciones de la estructura causada por el peso o la carga del viento, etc. Además, la falta de estándares para reportar el desempeño hace difícil evaluar y comparar las especificaciones de los fabricantes de seguidores, y entender como estos datos se traducirán a las condiciones reales de operación.

Diferentes tecnologías solares (HCPV, CPV, paneles planos) tienen diferentes relaciones entre la potencia generada y la deriva en cada eje, dando paso a diferentes requerimientos de seguimiento para cada tecnología. Todos esos retos llaman a encontrar un método para caracterizar con precisión la deriva, en el campo, durante una variedad de condiciones ambientales (Lawley, Reich y Williams, 2008).

La evaluación de la precisión del seguidor solar no puede ser dejada la lado durante el desarrollo de las tecnologías de concentración fotovoltaica, sobre todo, cuando los dispositivos alcanzan grandes concentraciones más allá de la frontera de 100X. Algunos análisis apuntan a que el ángulo de aceptación de los diseños con ópticas de concentración debe ser sobre estimado incluso desde un punto de vista teórico, en el que las pérdidas del ángulo de aceptación no controladas causadas en el

sistema total por procesos de ensamble en serie, pueden sacar de especificación la tolerancia aceptable y causar problemas serios en la producción de potencia y la integridad de los dispositivos (Luque-Heredia, 2012).

Se han propuesto diversos métodos para evaluar la ganancia y la precisión de los seguidores solares. A la diferencia entre el vector de apuntamiento y el vector solar se le conoce como error de seguimiento o deriva. Muchos estudios utilizan simulaciones computacionales para, en base a parámetros calculados o medidos, predecir el comportamiento de la deriva de seguidor solar. Por ejemplo, Clifford (et. al., 2004) utilizó un programa para modelar el desempeño de su seguidor solar pasivo. En cada etapa del sistema, desde el calentamiento hasta la reorientación del panel solar a su posición óptima fue incorporada. Gracias al modelo computacional, se predijo un comportamiento del tiempo que le tomaría a este reorientarse hacia la posición óptima, que luego fue comparado con los datos experimentales cuando el prototipo fue construido. La Gráfica 6 muestra la comparación entre el análisis teórico y el experimental, del tiempo que le toma al seguidor reorientarse en la mañana de un nuevo día según la radiación solar.



Gráfica 2.6. Tiempo que le toma al seguidor solar para reorientarse de oeste a este comparando el modelo computacional con los resultados experimentales (Clifford, et al. 2004).

Lawley (et. al, 2008) propuso un sistema que utiliza visión artificial para caracterizar la deriva del seguidor, el cual utiliza cámaras y un sistema preciso de calibración para medir y registrar la deriva en una variedad de condiciones climatológicas. La figura 2.15 muestra dos dispositivos Trac-Stat SL1 probados en paralelo. Luque Heredia (et al., 2012) propone un sistema de instrumentación para monitorear el desempeño un dispositivo sensor de precisión desarrollado por la empresa Inspira llamado sensor de precisión del seguimiento SunSpear (TAS, por sus siglas en inglés). El modelo SunSpear (figura 2.16) funciona a base de un sensor PSD, colocado debajo de un tubo colimador que puede detectar resoluciones en el rango de $1/1000^{\text{th}}^{\circ}$ con un ángulo de apertura de $\pm 1^{\circ}$. Los dos sistemas anteriores son soluciones comerciales que pueden obtenerse de los fabricantes, reduciendo el esfuerzo necesario para evaluar el desempeño del seguidor solar.



Figura 2.15. Dos sistemas Trac-Sat SL1 probados en paralelo (Davis et. al., 2008).

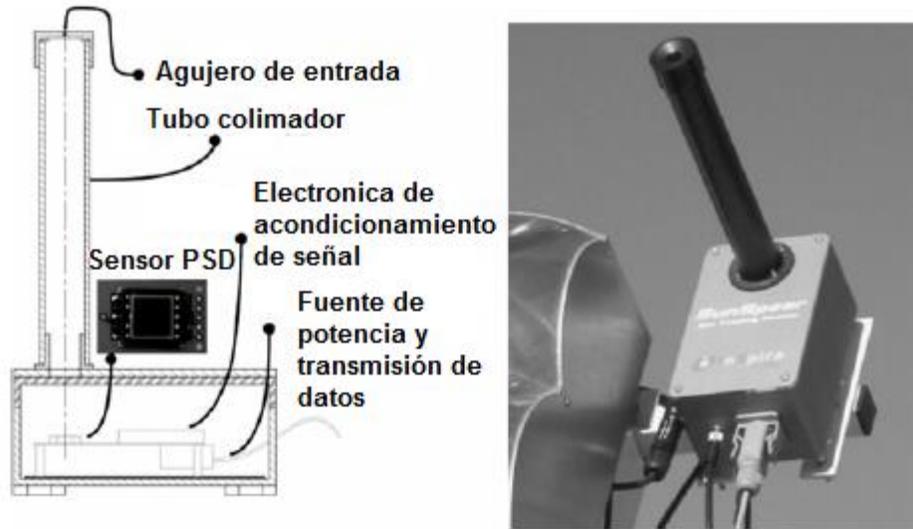


Figura 2.16. Sistema de monitoreo de precisión de seguimiento SunSpear de Inspira (Luque-Heredia, et. al 2012).

3. METODOLOGÍA

El proyecto de tesis forma parte del proyecto “Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados” el cual fue financiado por el Programa de CONACYT “Centros Mexicanos de Innovación en Energía Solar”, el cual tiene como objetivo “impulsar la generación de productos y/o servicios comercializables sobre una base de innovación sólida, la creación de capacidades de emprendimiento en la industria solar en México desde una edad temprana, la generación de conocimiento sostenido y ascendente...” (SENER, 2013).

Los entregables del proyecto de tesis serán evaluados según los objetivos del programa patrocinador (CEMIEsol), por lo cual se propone la siguiente metodología teniendo como visión la generación de propiedad industrial y de tecnologías con posibilidades de transferirse al sector productivo. Dicha metodología cumple con los parámetros de estudio experimental con un enfoque cuantitativo según Hernandez-Sampieri (et al., 2010), pues se diseñará un mecanismo de seguimiento solar simulando las condiciones de operación, para luego construirlo y hacer pruebas preliminares, evaluando datos numéricos como el ángulo de apertura mínimo, el tiempo promedio sin fallas, las curvas de deriva, etc.

La metodología es adaptada de la propuesta de Luque-Heredia (et al, 2010), alimentada con técnicas utilizadas en Oficinas de Transferencia de Tecnología (OTC's) como por ejemplo estudio del estado de la técnica en documentos de patentes, vigilancia tecnológica y administración de proyectos, para incrementar las probabilidades de obtener resultados novedosos que generen propiedad industrial, y puedan ser transferidos al sector productivo quien los transformaría un producto innovador.

La propuesta de Luque-Heredia (et. al, 2010) fue propuesta debido a que documenta los pasos seguidos por la empresa Inspira (creada por el autor, y comprada por la empresa SolFocus en 2007) en el desarrollo de un dispositivo que se salió al mercado.

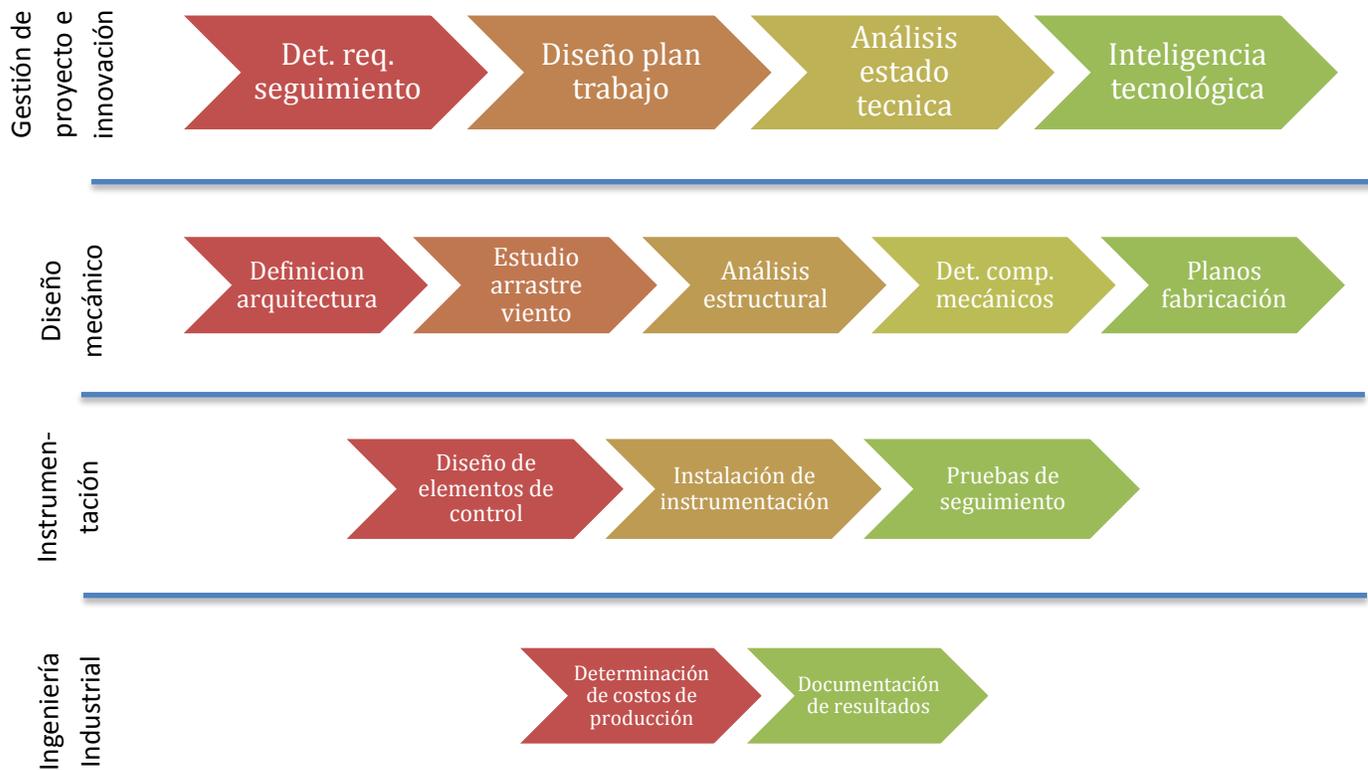
Los principales pasos de la metodología a seguir se describen a continuación:

1. **Determinación de requerimientos del seguimiento.** En este paso se estudia y documenta cuales serán los requerimientos a cumplir por el dispositivo creado para satisfacer las necesidades de la tecnología de aprovechamiento solar. Parámetros como horas de seguimiento diario, peso y forma de los módulos solares, ángulo de apertura, peso objetivo, velocidad de viento máximo, velocidad de viento de operación, grados de libertad, etc.
2. **Diseño del plan de trabajo.** En este paso se define el equipo de trabajo, determinando los requerimientos para que los objetivos del proyecto tengan la calidad deseada, en el tiempo establecido y con el presupuesto; se diseña una matriz de responsabilidades y se determinan las principales actividades a realizar con las fechas de ejecución (Verzuh, 2010).
3. **Análisis del estado de la técnica.** Se realiza una búsqueda de documentos de patentes de dispositivos similares y se documentan las principales características.
4. **Inteligencia tecnológica.** Se estudia y documenta la información relevante obtenida a partir de los documentos de patentes, la cual puede incluir gráficas de patentes por año, tendencias tecnológicas, características de patentes asignadas a empresas de interés, países con más patentes en la materia, tecnologías con protección y de uso libre en México.
5. **Definición de arquitectura del seguidor.** Se define la forma y/o apariencia que tendrá el seguidor con las características principales según lo documentado en el marco teórico. Se realiza un diseño CAD preliminar con las principales características de forma y funcionalidad del seguidor.
6. **Estudio del arrastre de viento.** Según la forma del seguidor y las características de los módulos solares, se diseña un modelo del arrastre del viento a las velocidades de diseño utilizando software de elementos finitos. Se determinan las presiones del viento y las fuerzas externas a las que será sometida la estructura del mecanismo. Se compararán los datos obtenidos con las ecuaciones de Peterka y Derickson (1992).
7. **Análisis estructural de elementos finitos.** Se modelará la estructura del seguidor solar mediante un software de elementos finitos, analizando los

esfuerzos y deformaciones causados por las diferentes fuerzas externas, se realizarán iteraciones en las características del seguidor hasta cumplir con los parámetros determinados en el paso 1. Se calcularán los requerimientos de actuadores y demás componentes mecánicos.

- 8. *Determinación de componentes mecánicos.*** Se escogen los componentes mecánicos y electromecánicos adecuados para el sistema, como actuadores, mecanismos, transmisiones, amortiguadores, etc.
- 9. *Creación de planos de fabricación.*** Se realizan los planos necesarios para la fabricación de los elementos mecánicos, incluyendo dimensiones, materiales y tolerancias necesarias para la correcta fabricación. Las variaciones en la manufactura son una fuente importante de pérdidas en el ángulo de apertura (Luque-Heredia et al., 2010) por lo que se debe especificar lo más detalladamente posible las especificaciones de fabricación, además se deben determinar las metodologías y tecnología que será utilizada para el monitoreo del cumplimiento de estas especificaciones.
- 10. *Diseño de elementos de control.*** Se determinará el sistema de control de seguimiento y se diseñarán las rutinas de software, los diagramas eléctricos y todo lo necesario para instrumentar al prototipo.
- 11. *Documentación de resultados.***

Es importante mencionar que el proceso de diseño en ingeniería es un proceso iterativo (Norton, 2009), donde no todas las actividades son realizadas de manera consecutiva ni siguiendo estrictamente la secuencia de los pasos descritos. El siguiente diagrama pretende ilustrar el proceso.



Gráfica 3.7. Metodología.

4. IMPLEMENTACIÓN

La implementación de la metodología propuesta para el desarrollo del trabajo de tesis se describe a continuación.

4.1 Análisis de arreglo óptico y unidades de conversión de potencia

La información de las unidades de potencia se explica claramente en la publicación de Coughenour (et. al., 2014). El arreglo óptico fue diseñado en el Laboratorio Solar del Observatorio Stewart de la Universidad de Arizona. El sistema consiste en un sistema de alta concentración fotovoltaica en el cual la luz solar es enfocada por un espejo parabólico con forma cuadrada de 1.65 m por lado, que provee potencia para varias pequeñas celdas de triple unión. El sistema óptico es de tipo RXR-Köhler, y comprende un reflector primario (X) y una lente esférica (R) en el foco que reparte la imagen del primer reflector en un arreglo de pequeños reflectores (X) que distribuye la luz en las celdas. El arreglo óptico provee una buena tolerancia al mal apuntamiento, una iluminación uniforme sobre cada celda, mínimas pérdidas ópticas y distribución equitativa entre celdas para una conexión en serie eficiente.

El sistema óptico es mostrado en la figura 2.2, y consiste en una primera etapa formada por un espejo cuadrado de 4 mm de grosor y 1.65 m de lado, el cual es curvado mediante un proceso patentado por la Universidad de Arizona, para darle una forma parabólica con distancia focal de 1.5 m. La segunda etapa es formada por una lente esférica de sílica se coloca en el foco del reflector, la cual distribuye la luz a una tercera etapa formada por un arreglo de reflectores, como se muestra en la figura 4.1. La configuración mencionada tiene la ventaja de proveer un mayor ángulo de apertura $\Theta = \pm .75^\circ$, lo que relaja los requerimientos necesarios del seguidor solar.

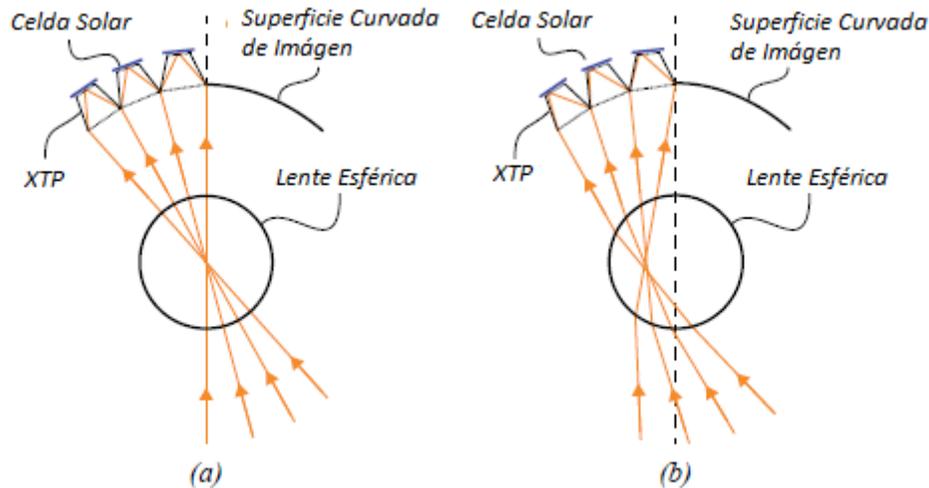


Figura 4.1. Diseño XTP del concentrador XRK-Köhler. Los rayos se reflejan en el XTP para iluminar la celda solar pareja y simétricamente para un seguimiento dentro de eje (a) y fuera de eje (b) (Coughenpur et al., 2014).

La unidad de potencia es formada por la segunda y tercera etapa del concentrador óptico, integrando además las celdas fotovoltaicas y un sistema de enfriamiento para dichas celdas. Una de las principales ventajas de esta tecnología es la posibilidad de intercambiar las celdas fotovoltaicas de triple unión por celdas solares de otras tecnologías, o por celdas con materiales novedosos; lo que permite a la tecnología evolucionar junto con los avances en materiales, como se muestra en la figura 2.4.

En la figura 2.3 se muestra la fotografía de la unidad de conversión de potencia bajo operación, donde se observa con claridad el spot solar reflejado por el concentrador solar. En la Tabla 4.1 se describen las principales características técnicas de cada unidad modular de generación de potencia por espejo.

	Parámetro	Valor	Notas
Espejo	Tamaño	1.65m x 1.65 m	Vidrio bajo en hierro, plateado de segunda superficie
	Especs. Ópticas	1.50 m dist. focal	Paraboloide axisimétrico
	Soporte	4-puntos	Almohadillas de 100 mm de diámetro
	Peso	28 kg	Incluyen almohadillas
Unidad de Conversión de Potencia (PCU)	Tipo de celda	FV triple unión	42% de eficiencia de conversión
	Diámetro PCU	152 mm	Entrada a 1457 mm sobre el vértice
	Flujo de refriger.	10 lt/min	Caída de presión 1500 Pa
	Salida térmica	1200W	Opcional, @ $T \leq 80^{\circ}\text{C}$
	Peso	3 kg	
Módulo (Espejo + PCU)	V_{pmax}	34 V	
	I_{pmax}	23.5A	@ DNI = 1000W/m ² , 25°C temperatura de celda
	Salida de potencia	800W _{DC} , 32% efic. del Sistema.	

Tabla 4.1. Especificaciones del Módulo de Potencia (Rehnu, 2014).

4.2 Consideraciones de diseño del mecanismo

Como consideraciones preliminares para el diseño del seguidor solar se consideraron los siguientes puntos:

1. Se considera como un diseño ideal aquel que cumpla las especificaciones de peso de la estructura por metro cuadrado planteadas por Angel de 23 kg/m² de colector (Angel et. al., 2014).

2. La velocidad máxima en posición de protección y la velocidad máxima de operación será de 39 y 11 m/s respectivamente, como lo recomendado por Luque-Heredia (Luque-Heredia, et. al, 2012).
3. Las pérdidas en el ángulo de aceptación causadas por la deformación deberán ser menores a un tercio del ángulo de aceptación del arreglo óptico $\Theta = \pm .75^\circ$ (Coughenour et. al., 2014).
4. Se buscará diseñar un dispositivo novedoso con posibilidades de obtener alguna figura de protección a la propiedad industrial.
5. Prioridad a la reducción de costos.

4.3 Análisis de configuraciones de módulos por seguidor

Se analizaron las posibilidades de configuraciones de arreglos fotovoltaicos considerando la cantidad de módulos por seguidor, la potencia de salida, el costo del seguidor y las medidas. La información resumida se presenta en la siguiente tabla:

<i>Número de Unidades</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>12</i>	<i>12</i>
Potencia pico	6400 W	7200 W	9600 W	9600 W
Arreglo sugerido (b*h)	4 x 2	3 x 3	4 x 3	6 x 2
Medidas	6.6 x 3.3	4.95 x 4.95	6.6 x 4.95	9.9 x 3.3
Aspecto	Rectangular	Cuadrada	Rectangular	Rectangular
“Aspect Ratio”	2	1	1.33	3
Inversor (SMA)	SB 6000-US*	SB 7000-US*	SB 8000-US*	SB 8000-US*
Costo inversor (FOB DLLS)	\$ 3,095.00	\$ 3,099.00	\$ 2,699.00	\$2,699.00
Costo espejos y PSU (FOB DLLS)	\$ 100,000.00	\$ 112,500.00	\$ 150,000.00	\$ 150,000.00
Transmisión Azimuth	PE9 (RTR)	PE9 (RTR)	PE9 (RTR)	SA5524C900 (JD)
Costo trans. Azim. (FOB DLLS)	\$ 665.00	\$ 665.00	\$ 665.00	\$ 665.00

Transmisión Elevación	SA5524C450 (JD)	SA5524C600 (JD)	SA5524C900 (JD)	SA5524C900 (JD)
Costo trans. Elev. (FOB DLLS)	ND	ND	\$ 230.00	\$ 230.00

Tabla 4.2. Análisis de arreglos y configuraciones por cantidad de unidades de potencia por seguidor.

Se concluye que la configuración más conveniente es la de 12 unidades, por lo que se presentan dos propuestas de seguidores solares utilizando dicha configuración.

4.4 Propuesta de diseño

La propuesta de mecanismo es llamada “Seguidor Polar”, por el tipo de movimiento que utiliza para posicionar el eje del concentrador en dirección al sol. Utiliza dos actuadores lineales para accionar a los 12 concentradores, posicionados como un arreglo de 6 x 2 módulos de potencia y soportados por una estructura metálica, como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3.

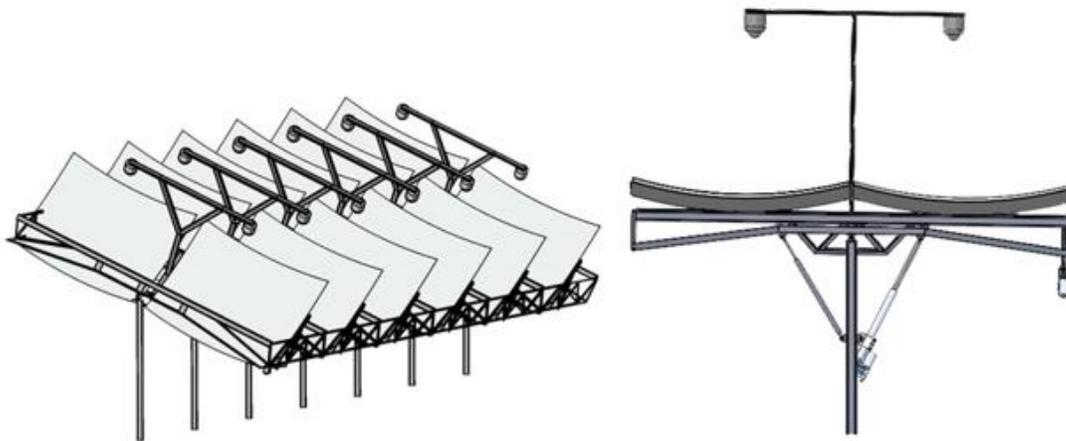


Figura 4.2. Vistas isométrica y lateral de mecanismo altazimutal.

La propuesta es un mecanismo de seguimiento solar para arreglos de paneles fotovoltaicos, planos o de concentración. El sistema comprende una estructura de soporte unida mediante juntas revolutas a postes anclados al suelo. Un actuador lineal provee el movimiento de elevación, y una pluralidad de amortiguadores magnetoreológicos proveen estabilidad contra las vibraciones, además de tener capacidad de comportarse como elementos estructurales en ráfagas de viento. Un

mecanismo de giro consiste en una estructura que soporta los concentradores y las unidades de potencia, o los paneles fotovoltaicos, y se encuentra unida a la estructura mediante juntas revolutas. El mecanismo de giro contiene un mecanismo de barras que replica el giro en todos los mecanismos de giro, que son accionados mediante un segundo actuador lineal. Un controlador programable controla el movimiento de los actuadores, mediante sensores de posición incluidos en los actuadores o en los mecanismos de giro; además, controla la dureza de los amortiguadores mediante un lazo de control retroalimentado por acelerómetros electrónicos. El controlador se comunica a una computadora central mediante un dispositivo que contiene los medios para enviar información a través de la red eléctrica. El sistema contiene además un inversor interconectado a red para inyectar la electricidad producida a la red eléctrica. Por otro lado, el sistema contiene los medios para retirar el calor excedente de las celdas solares mediante un sistema de circulación de un fluido de transferencia. El sistema completo está descrito en el documento de Patente MX/a/2014/012221 (Anexo I).

Las características principales del mecanismo se describen a continuación:

Número de concentradores	12
Peso total de la estructura metálica	1142 kg
Grados de libertad	2
Ángulo máximo de giro sin sombreado	120°
Rango de ángulo de elevación	15 – 90°
Mecanismo para movimiento de giro	Actuador lineal SA5524C900 (Joyce Dayton) y mecanismo de 4 barras.
Mecanismo para movimiento de elevación	Actuador lineal SA5524C900 (Joyce Dayton) y desaceleradores hidráulicos WM-Z7-100-K4G4-C (Weforma).
Material de fabricación	Acero estructural A36, acabado galvanizado.
Cimentación	Anclaje de pilote simple con tubular rectangular

Tabla 4.3. Características técnicas de Seguidor Polar V 1.0.

4.5 Diseño del mecanismo

El mecanismo de seguimiento solar consta de una estructura de soporte la cual se encuentra conectada mediante una pluralidad de juntas revolutas a un conjunto de postes de soporte, los cuales contienen los medios para anclarse al suelo. La estructura de soporte consiste en elementos estructurales con los medios para ensamblarse, formando cadenas de elementos que proveen soporte a los mecanismos de giro de los colectores solares, los cuales son colocados en arreglos como lo muestra la figura 4.3. Uno o más actuadores lineales son conectados a la estructura de soporte y a un poste de soporte, de manera que acciona a la estructura de soporte para proveer el movimiento de inclinación, como es mostrado en la figura 4.2.

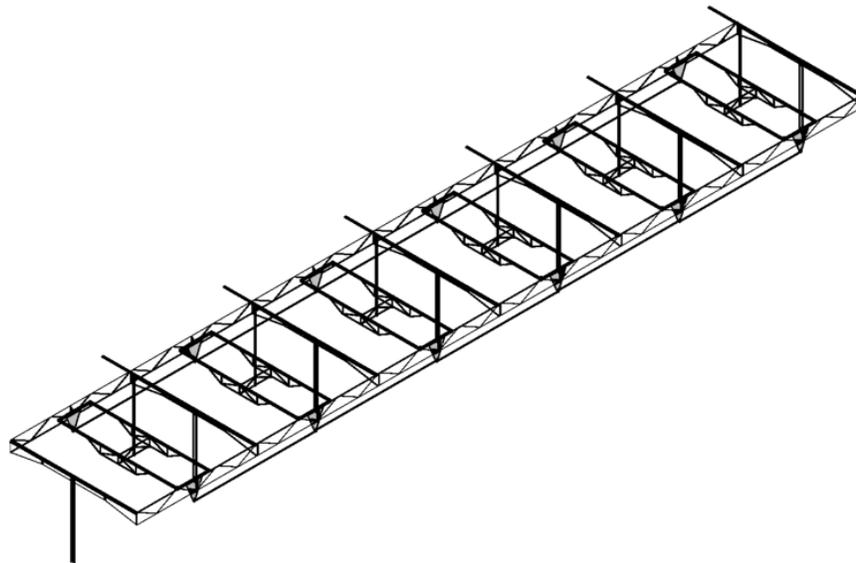


Figura 4.3 Estructura metálica del seguidor polar.

Una pluralidad de amortiguadores o desaceleradores son colocados conectados por una parte a la estructura de soporte y por otra parte a un poste de soporte, de manera que mitiguen las vibraciones causadas por el viento, y funcionen como elementos estructurales en ráfagas de viento para proteger la integridad estructural de la estructura de soporte. Lo anterior debido a que en ráfagas de viento, la fuerza de resistencia al movimiento de los amortiguadores reacciona proporcionalmente a

la velocidad del movimiento, siendo alta en condiciones de ráfagas; haciendo que la dureza del amortiguador lo haga comportarse como un elemento rígido en el instante en que la ráfaga impacta al seguidor. Dichos amortiguadores pueden ser magnetoreológicos, de manera que permitan controlar su dureza mediante un controlador electrónico, mediante un sistema de control retroalimentado por un sensor de vibración.

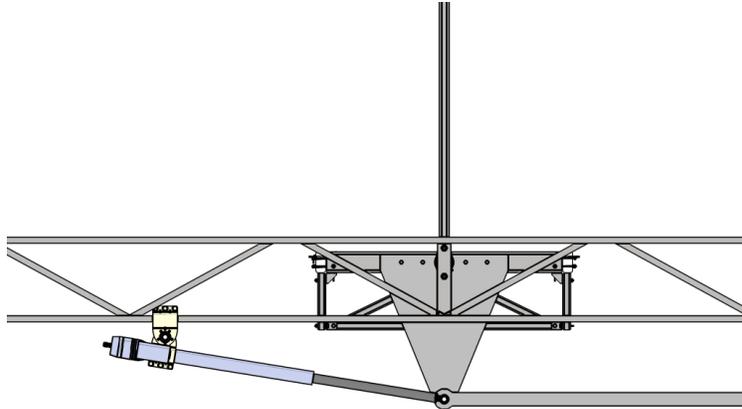


Figura 4.4 Posicionamiento del actuador en el mecanismo de giro.

Los actuadores lineales cuentan con juntas clevis para acoplarse a los elementos mecánicos a los que se proveerá el movimiento. El mismo actuador cuenta con una pluralidad de sensores para marcar la posición cero y el fin de carrera, y un sensor de posición que otorga una salida de pulso por fracción de pulgada que le permite al controlador ubicar su posición con precisión.

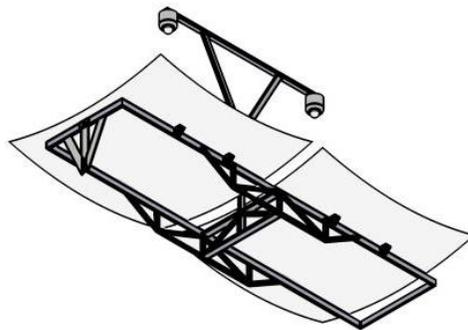


Figura 4.5 Mecanismo de giro con las unidades de concentración.

Los colectores solares son colocados en el mecanismo de giro (figura 4.5), el cual consiste en una estructura con dos juntas revolutas unidas a la estructura de soporte. Un mecanismo de barras es posicionado de manera que permita replicar el giro en cada uno de los mecanismos de giro, y es accionado mediante un actuador lineal colocado de manera que permita tener un giro aproximado a los 180 grados. El mecanismo de barras se muestra en la Figura 4.6.

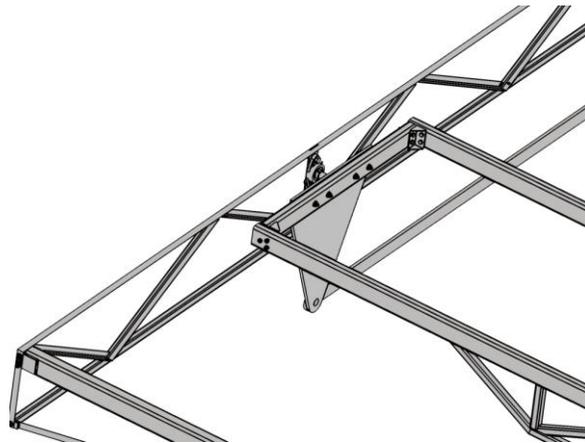


Figura 4.6. Mecanismo de 4 barras montado en estructura metálica.

En una configuración preferente, el mecanismo de giro es colocado en unos postes con la altura suficiente para que la sombra proyectada por las unidades de concentración sean utilizadas a manera de techumbre para automóviles, como se muestra en la siguiente figura.

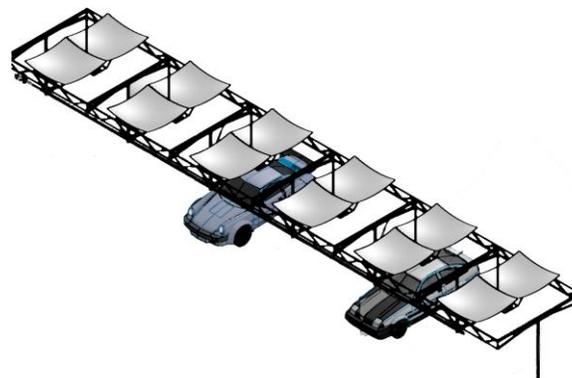


Figura 4.7. Seguidor polar utilizado como techumbre de estacionamiento.

4.6 Diseño del sistema de control

Para el sistema de control se utilizó un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés) marca Siemens de la serie S1200. El CPU S1217C tiene la capacidad de contener dos lazos de control de motores de corriente directa, mediante sus salidas digitales las cuales controlan la dirección y avance del motor, y digitalizar la posición del actuador mediante dos contadores rápidos conectados al sistema de retroalimentación (sensor tipo reed) del actuador. Tiene además la capacidad de controlar la velocidad de los actuadores mediante dos salidas analógicas, y la capacidad de recibir las señales de dos señores analógicos, como

Función		CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C	CPU 1216C	CPU 1217C
Dimensiones físicas (mm)		90 x 100 x 75	90 x 100 x 75	110 x 100 x 75	130 x 100 x 75	150 x 100 x 75
Memoria de usuario	Trabajo	30 kB	50 KB	75 kB	100 kB	125 KB
	Carga	1 MB	1 MB	4 MB	4 MB	4 MB
	Remanente	10 kB	10 kB	10 kB	10 kB	10 KB
E/S integradas locales	Digital	6 entradas/4 salidas	8 entradas/6 salidas	14 entradas/10 salidas	14 entradas/10 salidas	14 entradas/10 salidas
	Analógico	2 entradas	2 entradas	2 entradas	2 entradas/2 salidas	2 entradas/2 salidas
Tamaño de la memoria imagen de proceso	Entradas (I)	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes
	Salidas (Q)	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes
Área de marcas (M)		4096 bytes	4096 bytes	8192 bytes	8192 bytes	8192 bytes
Ampliación con módulo de señales (SM)		Ninguna	2	8	8	8
Signal board (SB), Battery Board (BB) o Communication Board (CB)		1	1	1	1	1
Módulo de comunicación (CM) (ampliación en el lado izquierdo)		3	3	3	3	3
Contadores rápidos	Total	Se han configurado un máximo de 6 para usar cualquier entrada integrada o de SB.				
	1 MHz	--	--	--	--	De Ib.2 a Ib.5
	100/180 kHz	De Ia.0 a Ia.5	De Ia.0 a Ia.5	De Ia.0 a Ia.5	De Ia.0 a Ia.5	De Ia.0 a Ia.5
	30/120 kHz	--	De Ia.6 a Ia.7	De Ia.6 a Ib.5	De Ia.6 a Ib.5	De Ia.6 a Ib.1
Salidas de impulsos ²	Total	Se han configurado un máximo de 4 para usar cualquier salida integrada o de SB				
	1 MHz	--	--	--	--	De Qa.0 a Qa.3
	100 kHz	De Qa.0 a Qa.3	De Qa.0 a Qa.3	De Qa.0 a Qa.3	De Qa.0 a Qa.3	De Qa.4 a Qb.1
	20 kHz	--	De Qa.4 a Qa.5	De Qa.4 a Qb.1	De Qa.4 a Qb.1	--
Memory Card		SIMATIC Memory Card (opcional)				
Tiempo de respaldo del reloj de tiempo real		20 días típ./12 días mín. a 40 °C (condensador de alto rendimiento sin mantenimiento)				
Puerto de comunicación		1	1	1	2	2

Tabla 4.4. Características técnicas de los PLC's de la serie S1200 de Siemens.

es necesario para monitorear la velocidad del viento mediante un anemómetro, para asegurar la integridad del mecanismo en condiciones de ráfagas de viento. Las características principales del dispositivo se detallan a continuación en la tabla 4.25.

Dos actuadores lineales marca Joyce Dayton SA9024C900 proveen el movimiento de elevación y giro de los mecanismos. Estos actuadores están formados por un motor de 24V de corriente directa conectado a un mecanismo lineal tipo acme. El dispositivo contiene electrónica para detener el movimiento en las posiciones límite y proveer un tren de pulsos por cada fracción de movimiento mediante un sensor tipo reed. Los actuadores cuentan con una capacidad dinámica de 9,000 N, y una capacidad estática de 17,100 N; lo cual supone una capacidad mayor a la calculada en las reacciones máximas de la estructura en condiciones de vientos (tablas 4.22 y 4.24). La velocidad máxima de los actuadores es de 5 mm/s aproximadamente, y cuentan con una carrera máxima de 900 mm. El consumo de corriente máximo a 24 V es de 4 amperes cuando se encuentra con la carga máxima. El diagrama de conexiones eléctricas del actuador se encuentra en la figura 4.8.

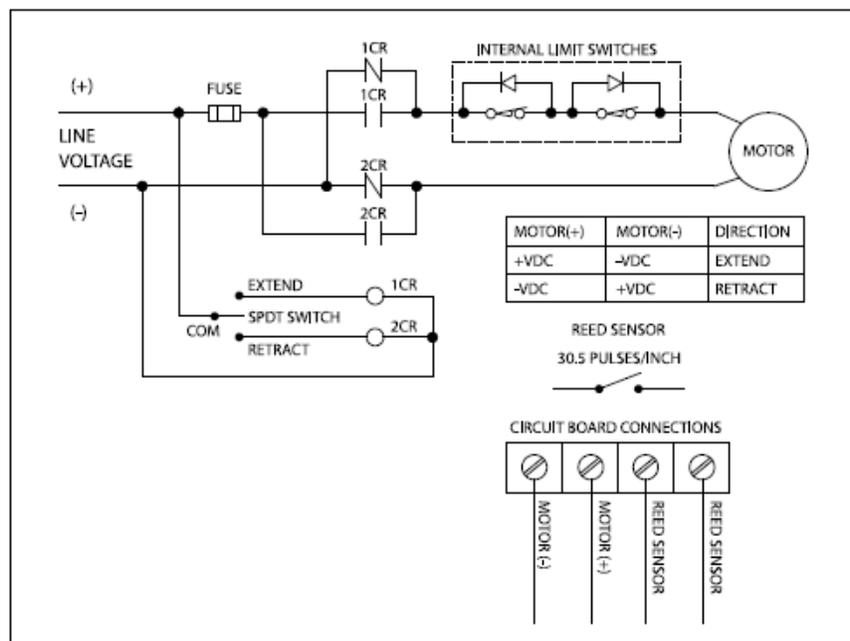


Figura 4.8. Diagrama eléctrico de actuador Joyce Dayton SA90.

Debido a las características de consumo de corriente del actuador y de inversión de polaridad para el cambio de sentido del movimiento, se introdujo un sistema de relevadores de doble polo doble tiro para el cambio de sentido en el giro, los cuales están conectados a las salidas digitales del PLC. Además, se instrumentó el sistema de control con un par de transistores industriales, cuya base está conectada a las salidas analógicas del PLC, y sirve para controlar la velocidad de los actuadores. El diagrama del sistema de control se encuentra en el Anexo III.

Por otro lado, se instrumentó al sistema de control con un sensor de velocidad de viento QS-FS, con salida analógica de 0.4V a 2V, el cual tiene un rango de velocidad de 0.5 m/s a 50 m/s, con una resolución de 0.1 m/s, una precisión de 1 m/s (en el peor caso) y una velocidad máxima de sobrevivencia de 70 m/s. Este sensor fue conectado a una de las entradas analógicas del PLC.

Además, se colocó una torreta luminosa para indicar el estado del sistema mediante 3 colores, los cuales están conectados directamente a salidas digitales del PLC. Esta torreta indicará el estado del dispositivo y posibles fallas, y sirve como mecanismo de seguridad ante eventos como altas velocidades de viento, precaución por entrar en operación, error de comunicaciones, falla en el sistema eléctrico, etc.

También se instrumentó el sistema con un módulo de comunicaciones RS-485, el cual tendrá capacidad de conectar distintos tipos de dispositivos de control como tarjetas de adquisición de datos, inversor interconectado y el sistema de enfriamiento entre otros. Se colocaron dispositivos de control manual y una parada de emergencia, el cual desconecta los motores en caso de emergencia. El sistema completo fue colocado dentro de un gabinete de control, el cual se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.9. Gabinete de control.

4.7 Diseño del método de control

Se propone un sistema de control del seguidor solar que puede ser descrito siguiendo los pasos a continuación:

Primero. El controlador lógico programable, con los medios para determinar la hora y fecha exacta, compara en sus registros la hora establecida como de inicio de operaciones con la hora actual. Si la hora actual se encuentra dentro del rango de operación, entonces procede al siguiente paso, si no, se establece la posición de protección.

Segundo. El controlador lógico programable lee la velocidad del viento a través de un dispositivo con los medios para hacerlo, si la velocidad del viento se encuentra dentro del rango permitido se procede al siguiente paso; si no, se mantiene en posición de protección.

Tercero. El controlador lógico programable lee los valores de los registros de emergencia, los cuales pueden ser activados al exceder valores preestablecidos en los sensores, o a través de la computadora central, la cual se comunica con el controlador mediante un dispositivo con los medios para transmitir información

mediante la red eléctrica. Los registros de emergencia pueden estar activados por ejemplo en caso de pronosticarse un día nublado, o para realizar operaciones de mantenimiento. Si no existen registros de emergencia activados se procede al siguiente paso, si existe algún registro de emergencia se coloca en la posición preestablecida para dicho registro, que puede ser la de protección, o la de mantenimiento.

Cuarto. Se activa el sistema de enfriamiento de los módulos de potencia, se determina que el sistema funciona correctamente. Si el sistema enciende y funciona correctamente, se pasa al siguiente paso, si no, se manda una alerta a la computadora central y se mantiene la posición de protección.

Quinto. Se manda la señal de control a los amortiguadores magnetoreológicos para disminuir su dureza.

Sexto. Se calcula la posición del sol en términos de inclinación y rotación, y se manda la posición al sistema de control de movimiento, pudiendo este estar embebido en el controlador lógico programable, para posicionar al mecanismo en la posición del vector solar a través de los actuadores eléctricos.

Séptimo. Una vez se cumpla la posición de inclinación, se manda la señal a los amortiguadores magnetoreológicos para incrementar la dureza, activando a la vez el sistema de control de vibraciones retroalimentado por los sensores acelerómetros.

Octavo. Determinar los valores de todos los sensores del sistema y reportarlos a la computadora central mediante el circuito de comunicación.

Noveno. Cuando el sistema se dirija hacia el sol, el inversor interconectado detectará que hay potencia de corriente directa, por lo que activará sus operaciones inyectando dicha potencia en la red eléctrica.

Décimo. El método se repite hasta que los parámetros de velocidad de viento o de hora de operación o de registro de alarma se dejen de cumplir, haciendo que el mecanismo se lleve a la posición de protección.

4.8 Diseño del sistema de refrigeración y aprovechamiento del calor residual

El sistema de refrigeración de las celdas solares se diseñó pensando en el futuro aprovechamiento del calor residual. El sistema de enfriamiento es compuesto de un manifold que hace fluir un líquido de transferencia térmica (Agua Glicol 40%) entre las unidades de concentración para retirar el calor residual de las celdas multi-unión. El calor es almacenado en un termotanque mediante un intercambiador de calor donde después se conecta a sistemas de calor de proceso. Después, un radiador enfría al líquido de transferencia para hacerlo recircular nuevamente por las unidades de concentración. Una válvula proporcional regula el flujo para controlar la temperatura de las celdas y del termotanque. El diagrama del sistema de refrigeración se muestra en la figura 4.10.

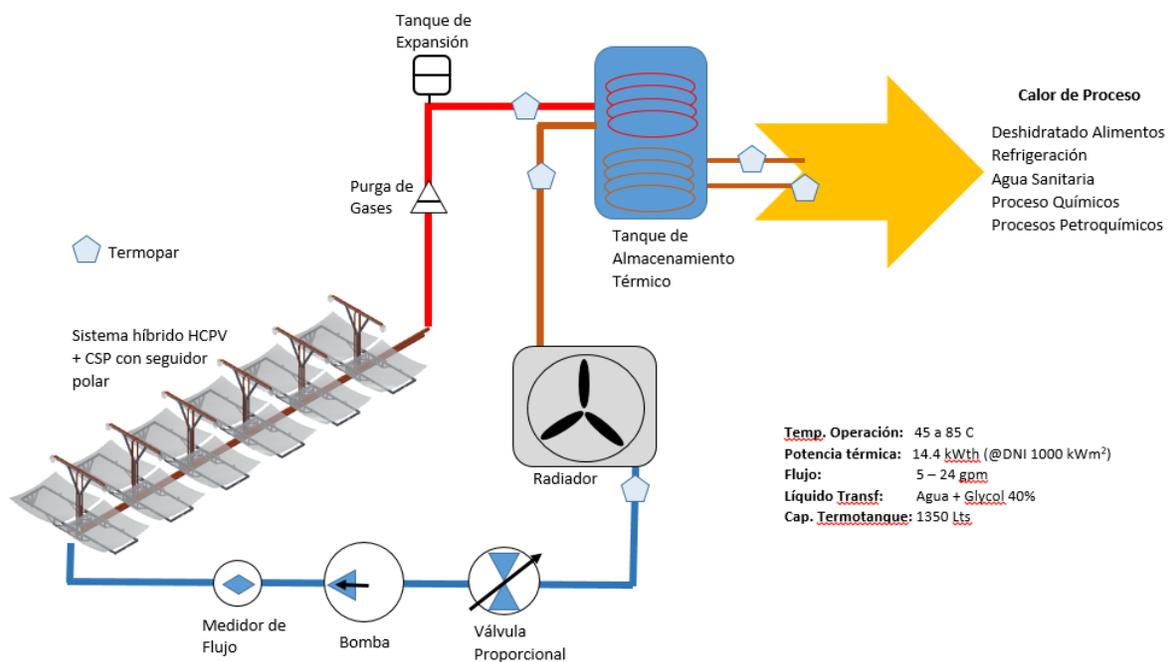


Figura 4.10. Sistema de refrigeración de celdas solares.

5. RESULTADOS

Se realizaron cálculos para determinar las cargas producidas por diversos factores, como el peso de los concentradores y el arrastre del viento, calculados analíticamente y comparados con análisis computacionales, y se procedió a realizar un análisis estructural con el método de elementos finitos. Se siguió una metodología de cálculo estructural similar a la publicada en diversos estudios (Lin et al, 2013; Gong et al., 2012; Zang et al., 2007).

A continuación se documenta los resultados de dichos análisis, mediante las memorias de cálculo y resultados de software.

5.1 Cálculo analítico de cargas de viento

Para el cálculo analítico de cargas de viento, se utilizó la metodología propuesta por Peterka y Derickson (1992) y la mejora a las ecuaciones de Pfahl (et al, 2011). En ambos artículos se realizaron pruebas experimentales en heliostatos altazimutales, con espejos planos y sin considerar separación entre espejos, pero se toman como referencia pues se presentan fuerzas similares causadas por el arrastre del viento en la superficie reflectora.

Se toma como referencia para la designación del sistema de coordenadas, fuerzas y momentos, la figura 2.12. Los resultados de la aplicación de las ecuaciones de Peterka (et. al, 1992) y las correcciones por la relación de aspecto (b / h) (Pfahl et. al, 2011) se calcularon sobre una de las 6 facetas que contienen 2 concentradores en el seguidor y se tomaron en cuenta los escenarios con los valores de α y β sugeridos como los críticos. Se calcularon las velocidades medias para las ráfagas de la velocidad de servicio máxima (MSWS, por sus siglas en inglés) para los escenarios 1, 2 y 3, y la velocidad media para la ráfaga con mayor velocidad esperada (MWS, por sus siglas en inglés) para el escenario 4 (posición de protección o stow). Los resultados se muestran a continuación, tomando como referencia la nomenclatura de las publicaciones de Pfahl (et al., 2011):

h	3.3	m				
b	1.65	m				
H	1.95	m				
ra	0.5					
A	5.445	m ²				
U_{media}	5.46	m/s	MSWS_{ráfaga}	11 m/s		
U_{media Stow}	19.38	m/s	MWS_{ráfaga}	39 m/s		
ρ	1.2466	kg/m ³	@10 °C			
Escenario	1	2	3	4		
α	90	30	90	0		
β	0	0	65	0		
Fz	N/D (pfahl)	304.59	N/D (pfahl)	870.21	N	Lift Force
Fx	466.35	251.28	N/D (pfahl)	656.55	N	Drag Force
Fy	N/D (pet)	N/D (pet)	N/D (pet)	N/D (pet)	N	
Mz	48.57	N/D (pfahl)	117.23	N/D (pfahl)	Nm	Azimuthal Moment
Mx	N/D (Pet)	N/D (Pet)	N/D (Pet)	N/D (Pet)	Nm	
My	1,005.58	N/D (pfahl)	N/D (pfahl)	2,642.30	Nm	Base Overturning Moment
MHx	N/D (Pet)	N/D (Pet)	N/D (Pet)	N/D (Pet)	Nm	
MHy	N/D (Pfahl)	200.96	N/D (Pfahl)	879.66	Nm	Hinge Moment

Tabla 5.1. Resultados de ecuaciones de Peterka y Derickson (1992) y Pfahl (et al., 2011) para una faceta del seguidor solar.

5.2 Simulación de elementos finitos de cargas de viento

Partiendo de los resultados anteriores, se realizó una simulación de elementos finitos para la distribución de las cargas causadas por el arrastre del viento en las superficies reflectoras, con los 4 escenarios mencionados anteriormente, considerando MSWS para el escenario 1, 2 y 3; y MWS para el 4. Se utilizó el Software Solid Works 2014, y el módulo de simulación de fluidos. Los resultados se muestran a continuación:

5.2.1 Escenario 1

En este escenario se considera que la superficie de los espejos se encuentran a una inclinación de 90° respecto a la horizontal, y que el ángulo azimutal formado por el vector de dirección del viento es de 0° . La velocidad de viento que se consideró es de 11 m/s. Los resultados obtenidos de presión y esfuerzos se resumen en la tabla 6 y 7.

Local parameters

Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	101187.942	101464.596	101340.653		11.1485297
Total Pressure [Pa]	101187.942	101464.596	101340.653		11.1485297

Tabla 5.2. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 1.

Integral parameters

Parameter	Value	X- component	Y- component	Z- component	Surface Area [m ²]
Normal Force [N]	564.984	-0.024	0.007	-564.984	11.148
Force [N]	564.811	-0.023	0.010	-564.811	11.148
Torque [N*m]	275.954	64.716	-268.258	0.002	11.148
Torque of Normal Force [N*m]	276.038	64.736	-268.340	0.001	11.148

Tabla 5.3. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 1.

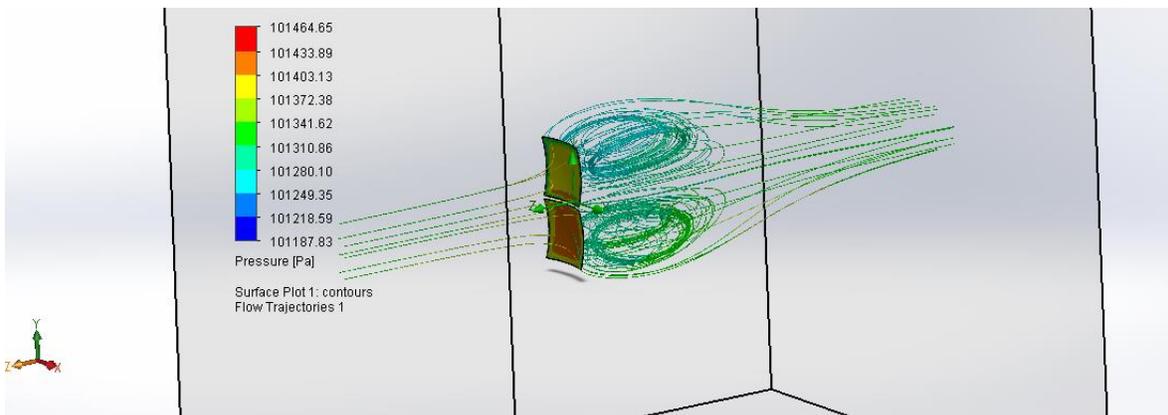


Figura 5.1. Simulación y análisis del efecto del arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 1.

5.2.2 Escenario 2

En este escenario se considera que la superficie de los espejos se encuentra a una inclinación de 30° respecto a la horizontal, y que el ángulo azimutal formado por el vector del viento es 0° . La velocidad de viento considerada es de 11 m/s. Los resultados obtenidos de presión y esfuerzos se resumen en la tabla 8 y 9.

Local parameters

Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	101205.181	101405.427	101309.53		11.1534401
Total Pressure [Pa]	101205.181	101405.427	101309.53		11.1534401

Tabla 5.4. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 2.

Integral parameters

Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]
Normal Force [N]	416.628	-0.088	-368.259	-194.844	11.153
Force [N]	416.532	-0.063	-367.588	-195.903	11.153
Torque [N*m]	154.478	119.943	-45.782	85.913	11.153
Torque of Normal Force [N*m]	154.405	119.832	-45.543	86.064	11.153

Tabla 5.5. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 2.

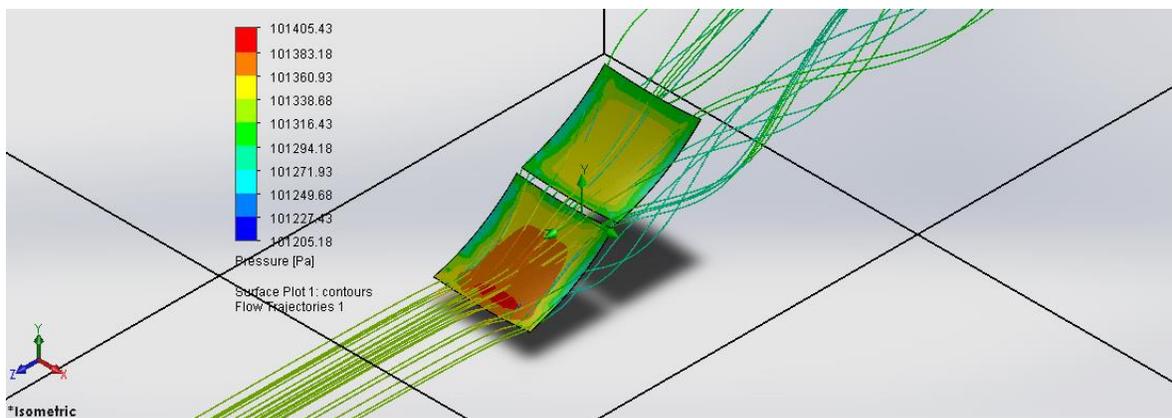


Figura 5.2. Simulación y análisis del efecto del arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 2.

5.2.3 Escenario 3

En este escenario se considera que la superficie de los espejos se encuentran a una inclinación de 90° respecto a la horizontal, y que el ángulo azimutal formado por el vector del viento es de 65°. La velocidad del viento considerada fue de 11 m/s. Los resultados obtenidos de presión y esfuerzos se resumen en la tabla 10 y 11.

Local parameters

Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	101224.873	101463.942	101335.423		11.1497175
Total Pressure [Pa]	101224.873	101463.942	101335.423		11.1497175

Tabla 5.6. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 3.

Integral parameters

Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]
-----------	-------	-------------	-------------	-------------	--------------------------------

Normal Force [N]	478.476	-251.210	0.002	-407.226	11.149
Force [N]	478.347	-250.654	0.000	-407.416	11.149
Torque [N*m]	501.454	28.172	-500.368	-17.157	11.149
Torque of Normal Force [N*m]	501.507	28.157	-500.421	-17.200	11.149

Tabla 5.7. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 3.

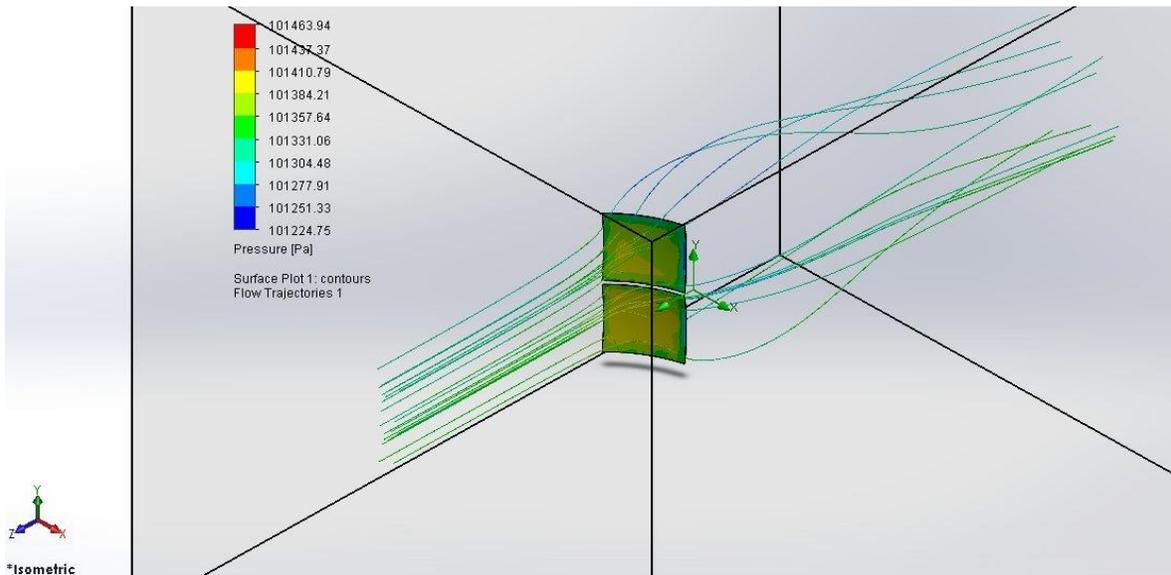


Figura 5.3. Simulación y análisis del efecto del arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 3.

5.2.4 Escenario 4

Para el escenario 4 o posición de seguridad, el sistema se debe de encontrar en su posición de descanso. El ángulo de inclinación de los espejos respecto a la horizontal es de 0° y el ángulo azimutal del vector del viento respecto al espejo es también de 0° . Como el objetivo de este escenario es asegurar la integridad y resistencia del sistema bajo fuertes cargas de viento, la velocidad de viento considerada fue de 39 m/s. Los principales resultados de presión y esfuerzos se muestran en la tabla 12 y 13.

Local parameters

Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	99365.786	102343.928	101285.103		11.1586554
Total Pressure [Pa]	99365.786	102343.928	101285.103		11.1586554

Tabla 5.8. Resultados de presiones normales causadas por el arrastre del viento, escenario 4.

Integral parameters

Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]

Normal Force [N]	489.593	-3.116	-460.861	-165.225	11.158
Force [N]	495.065	-3.112	-460.084	-182.762	11.158
Torque [N*m]	1329.794	1324.539	-47.895	107.956	11.158
Torque of Normal Force [N*m]	1331.942	1326.825	-43.707	108.133	11.158

Tabla 5.9. Resultados de fuerzas y torques causadas por el arrastre del viento, escenario 4.

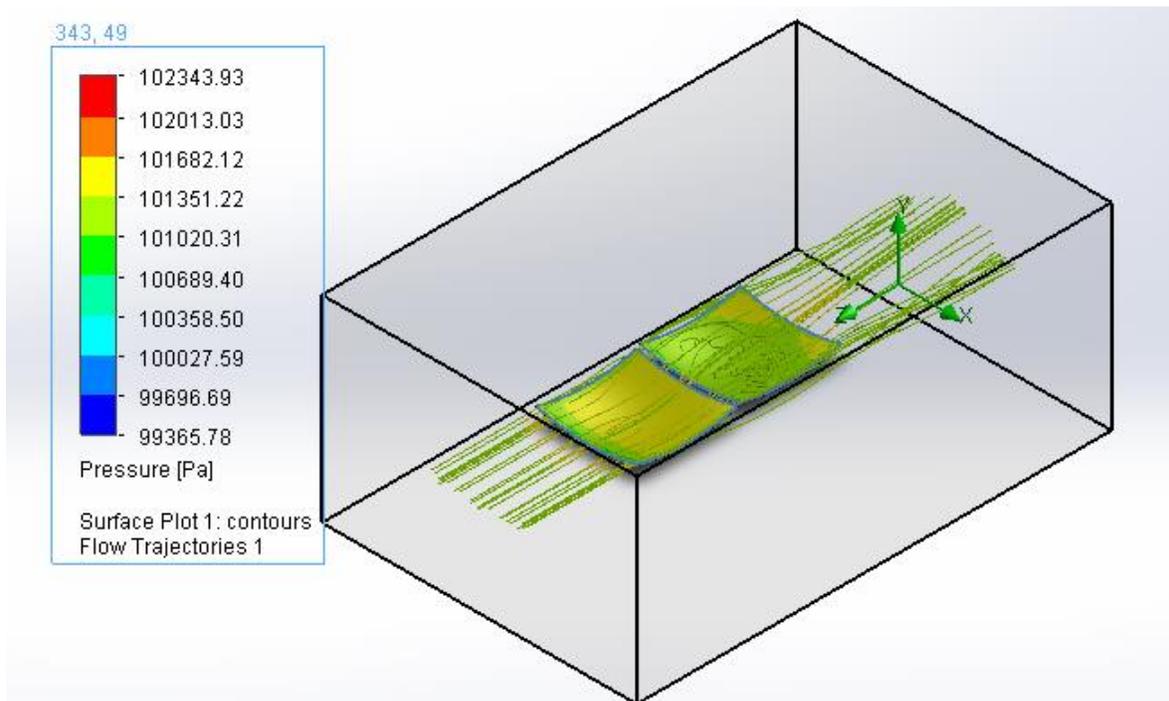


Figura 5.4. Simulación y análisis del efecto del arrastre del viento en faceta de seguidor polar, escenario 4.

5.3 Análisis de esfuerzos y deformaciones

Para el análisis de esfuerzos y deformaciones, se utilizó la herramienta de análisis de armaduras de Autodesk Inventor para analizar los elementos estructurales del seguidor. Se separó al mismo en 3 etapas: soporte de espejos, que es la unidad que integra a los espejos y los concentradores, y que provee el movimiento de giro; marco, que integra la unidad intermedia entre el soporte de espejos y el anclaje al suelo, y provee del movimiento de elevación; y el anclaje al suelo. A continuación los resultados del análisis:

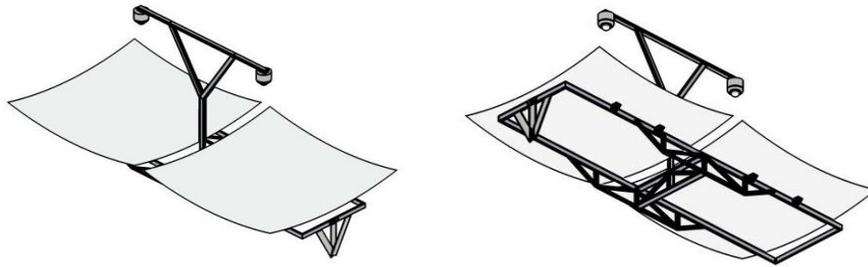


Figura 5.5. Vistas isométricas de etapa de mecanismo de giro.

5.3.1 Mecanismo de giro: Escenario 1

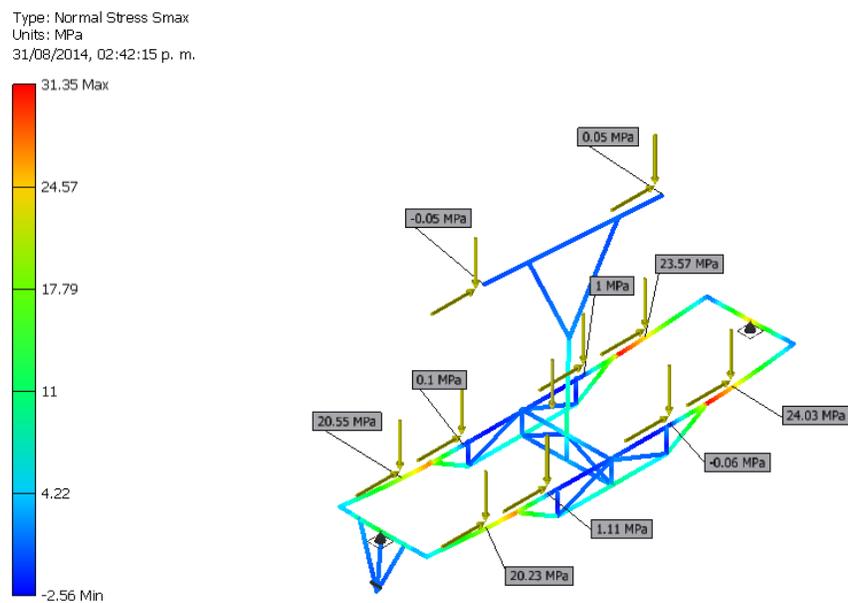


Figura 5.6. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 1.

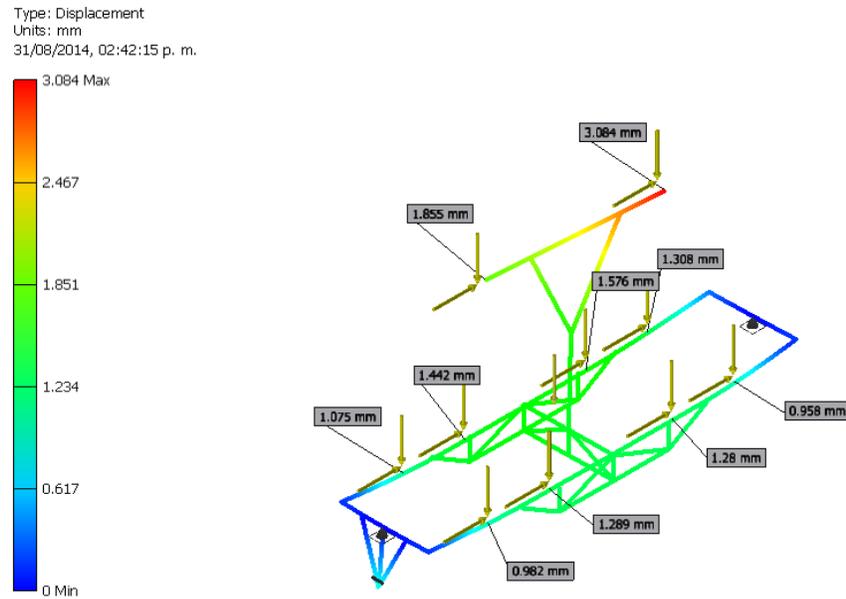


Figura 5.7 . Resultados de análisis de deformaciones, escenario 1.

Name		Minimum	Maximum
Displacement		0.000 mm	3.084 mm
Forces	Fx	-191.732 N	178.666 N
	Fy	-762.582 N	772.626 N
	Fz	-2035.752 N	1869.480 N
Moments	Mx	-247771.917 N mm	137653.396 N mm
	My	-50378.223 N mm	39089.208 N mm
	Mz	-13872.138 N mm	10701.945 N mm
Normal Stresses	Smax	-2.564 MPa	31.354 MPa
	Smin	-31.549 MPa	5.224 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	28.316 MPa
	Smin(Mx)	-28.316 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	11.188 MPa
	Smin(My)	-11.188 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	-3.329 MPa	6.042 MPa
Shear Stresses	Tx	-1.331 MPa	1.428 MPa
	Ty	-2.188 MPa	2.160 MPa
Torsional Stresses	T	-20.850 MPa	27.027 MPa

Tabla 5.10. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones.

Constraint Name	Reaction Force	
	Magnitude	Components (Fx,Fy,Fz)
Pasador Superior:2	860.752 N	-1.868 N
		-369.314 N
		777.495 N
Pasador Inferior:1	760.687 N	0.505 N
		-238.906 N
		722.197 N
Pasador Mecanismo:1	1.363 N	1.363 N
		0.000 N

0.000 N

Tabla 5.11. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores.

5.3.2 Mecanismo de giro: Escenario 2

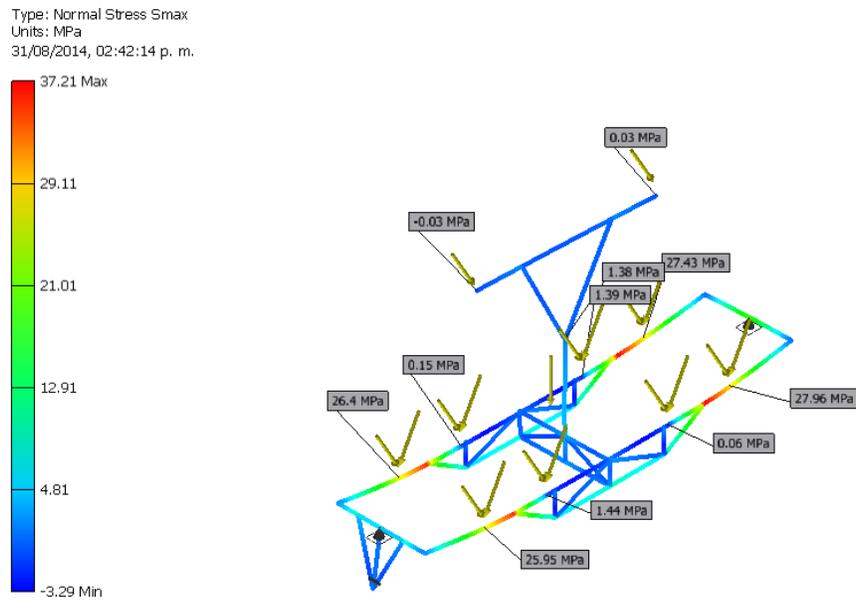


Figura 5.8. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 2.

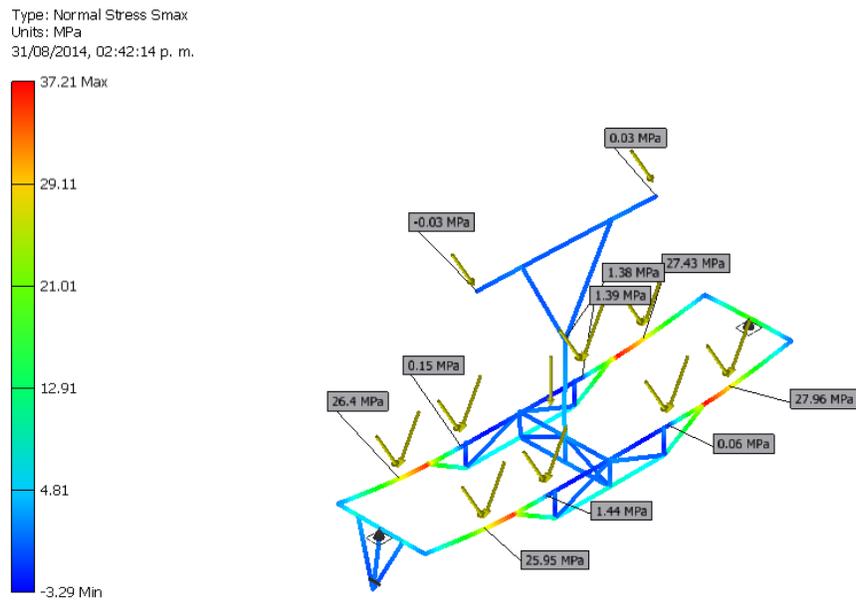


Figura 5.9. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 2.

Name		Minimum	Maximum
Displacement		0.000 mm	2.550 mm
Forces	Fx	-123.439 N	118.104 N
	Fy	-938.315 N	951.145 N
	Fz	-2443.913 N	2162.092 N
Moments	Mx	-300294.187 N mm	166375.022 N mm
	My	-37185.281 N mm	35565.931 N mm
	Mz	-8601.895 N mm	12913.309 N mm
Normal Stresses	Smax	-3.294 MPa	37.206 MPa
	Smin	-37.145 MPa	6.251 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	34.318 MPa
	Smin(Mx)	-34.318 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	13.428 MPa
	Smin(My)	-13.428 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	-3.850 MPa	7.253 MPa
Shear Stresses	Tx	-0.742 MPa	0.776 MPa
	Ty	-2.694 MPa	2.658 MPa
Torsional Stresses	T	-25.159 MPa	16.759 MPa

Tabla 5.12. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 2.

Constraint Name	Reaction Force	
	Magnitude	Components (Fx,Fy,Fz)
Pinned Constraint:2	962.117 N	-2.608 N
		-123.158 N
		954.198 N
Pinned Constraint:1	872.858 N	0.524 N
		13.888 N
		872.748 N
Custom Constraint:1	2.083 N	2.083 N
		0.000 N

Tabla 5.13. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 2.

5.3.3 Mecanismo de giro: Escenario 3

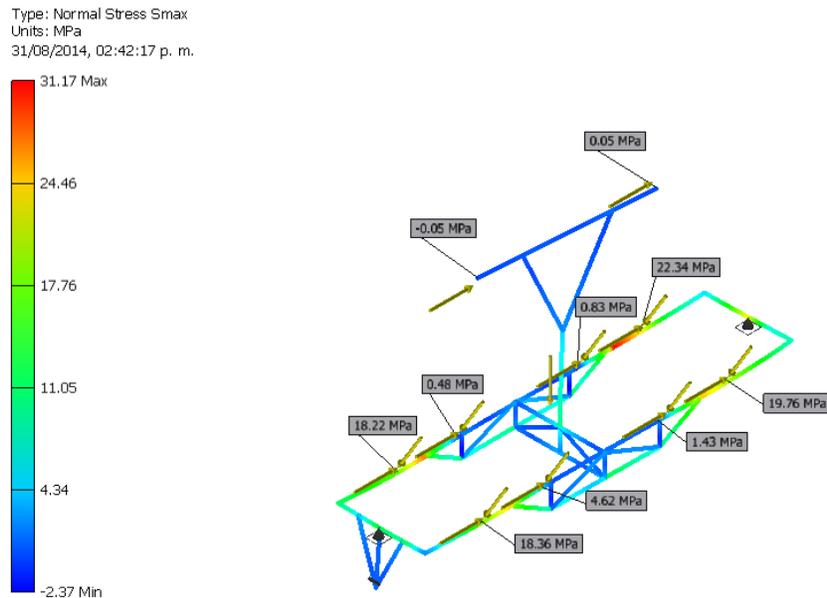


Figura 5.10. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 3.

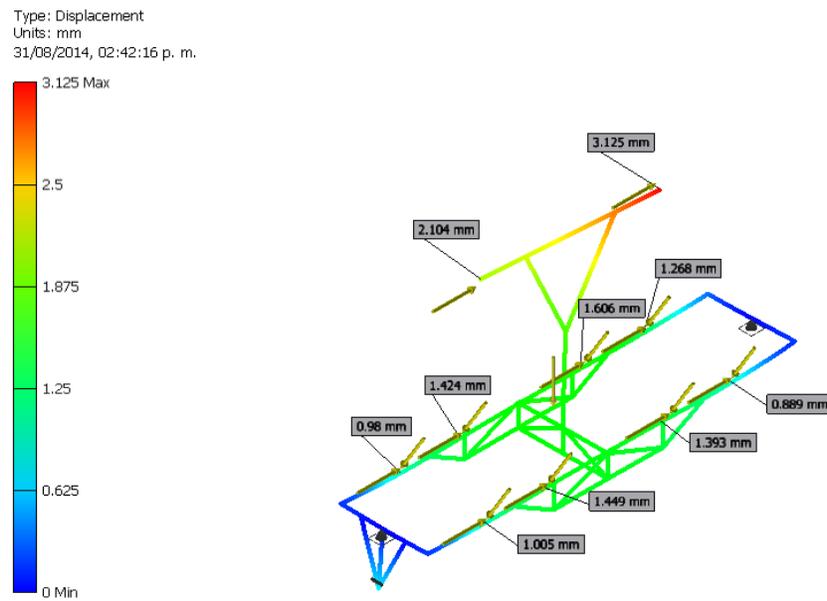


Figura 5.11. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 3.

Name		Minimum	Maximum
Displacement		0.000 mm	3.125 mm
Forces	Fx	-263.138 N	201.985 N
	Fy	-707.587 N	654.914 N
	Fz	-1888.284 N	1673.456 N
Moments	Mx	-221604.180 N mm	122169.120 N mm
	My	-48821.309 N mm	49540.785 N mm

Normal Stresses	Mz	-13571.026 N mm	10218.918 N mm
	Smax	-2.366 MPa	31.172 MPa
	Smin	-31.080 MPa	3.860 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	25.325 MPa
	Smin(Mx)	-25.325 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	11.002 MPa
	Smin(My)	-11.002 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	-2.980 MPa	5.604 MPa
Shear Stresses	Tx	-1.505 MPa	1.960 MPa
	Ty	-1.855 MPa	2.004 MPa
Torsional Stresses	T	-19.909 MPa	26.440 MPa

Tabla 5.14. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 3.

Constraint Name	Reaction Force	
	Magnitude	Components (Fx,Fy,Fz)
Pinned Constraint:2	796.054 N	123.775 N
		-363.463 N
		697.335 N
Pinned Constraint:1	698.577 N	126.066 N
		-244.757 N
		642.037 N
Custom Constraint:1	1.369 N	1.369 N
		0.000 N
		0.000 N

Tabla 5.15. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 3.

5.3.4 Mecanismo de giro: Escenario 4

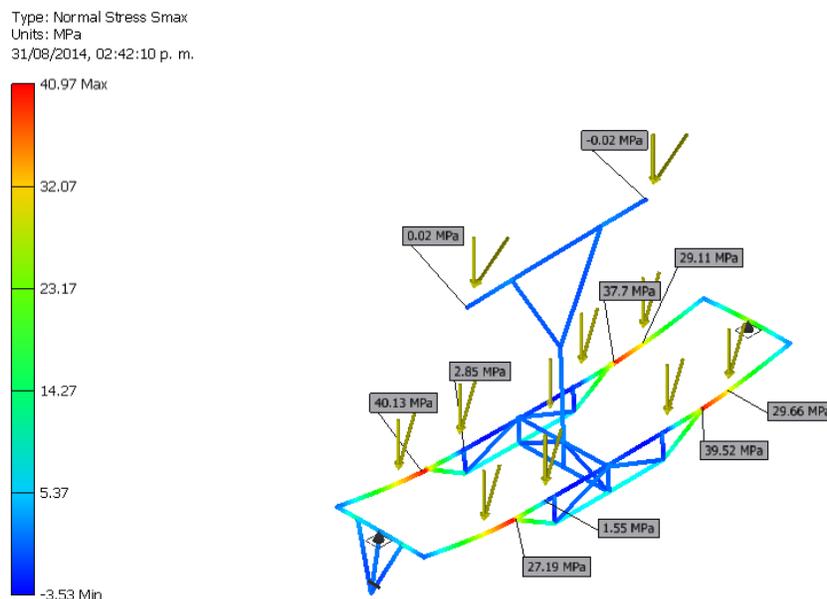


Figura 5.12. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 4.

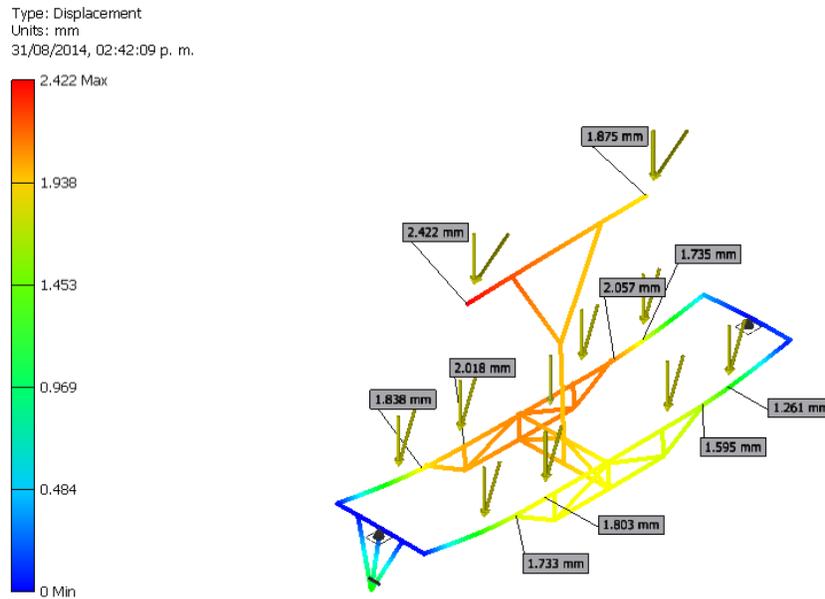


Figura 5.13. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 4.

Name		Minimum	Maximum
Displacement		0.000 mm	2.422 mm
Forces	Fx	-132.512 N	134.990 N
	Fy	-1042.867 N	1056.262 N
	Fz	-2682.657 N	2385.180 N
Moments	Mx	-330951.226 N mm	180052.517 N mm
	My	-40872.510 N mm	40778.592 N mm
	Mz	-8700.461 N mm	14033.679 N mm
Normal Stresses	Smax	-3.532 MPa	40.969 MPa
	Smin	-40.945 MPa	6.994 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	37.822 MPa
	Smin(Mx)	-37.822 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	14.760 MPa
	Smin(My)	-14.760 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	-4.247 MPa	7.962 MPa
Shear Stresses	Tx	-0.848 MPa	0.833 MPa
	Ty	-2.992 MPa	2.954 MPa
Torsional Stresses	T	-27.341 MPa	16.951 MPa

Tabla 5.16. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 4.

Constraint Name	Reaction Force	
	Magnitude	Components (Fx,Fy,Fz)
Pinned Constraint:2	1069.766 N	-3.787 N
		30.675 N
		1069.319 N
Pinned Constraint:1	960.896 N	0.525 N
		170.085 N
		945.723 N
Custom Constraint:1	3.262 N	3.262 N
		0.000 N

	0.000 N
--	---------

Tabla 5.17. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 4.

Las fuerzas de reacción calculadas en los análisis anteriores fueron trasladadas hacia la siguiente etapa para calcular los esfuerzos y las deformaciones. Los resultados de ese análisis se demuestran a continuación.

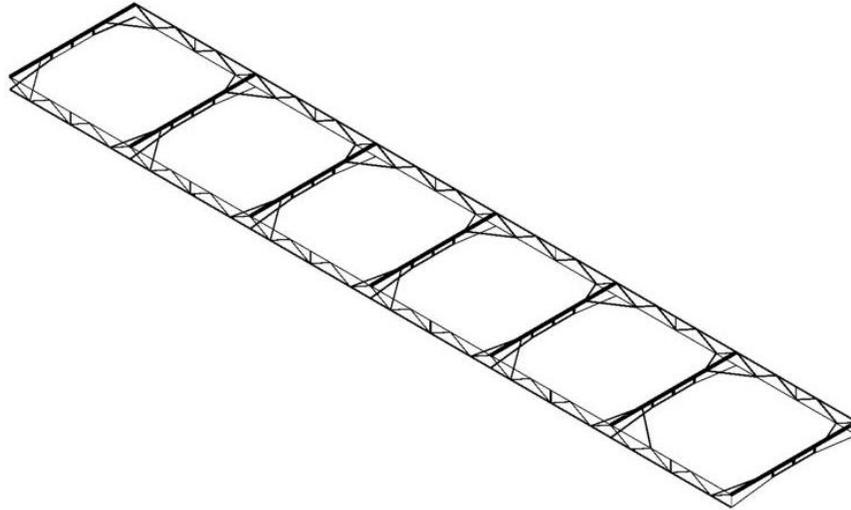


Figura 5.14. Vistas isométricas del marco de inclinación.

5.3.4 Marco de inclinación: Escenario 2

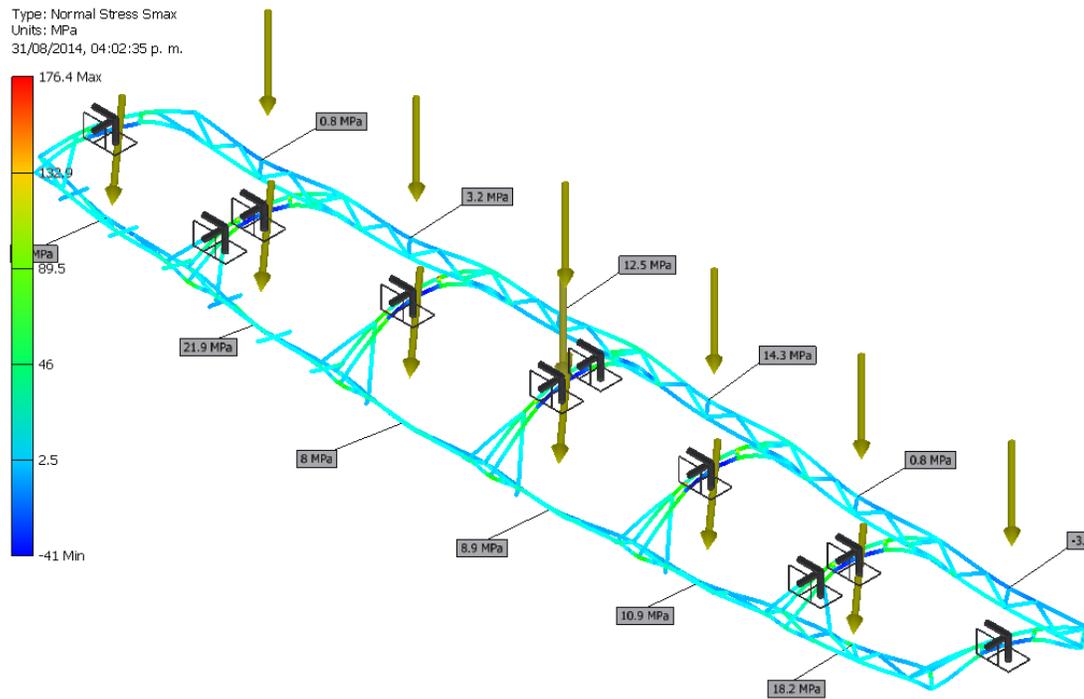


Figura 5.16. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 2.

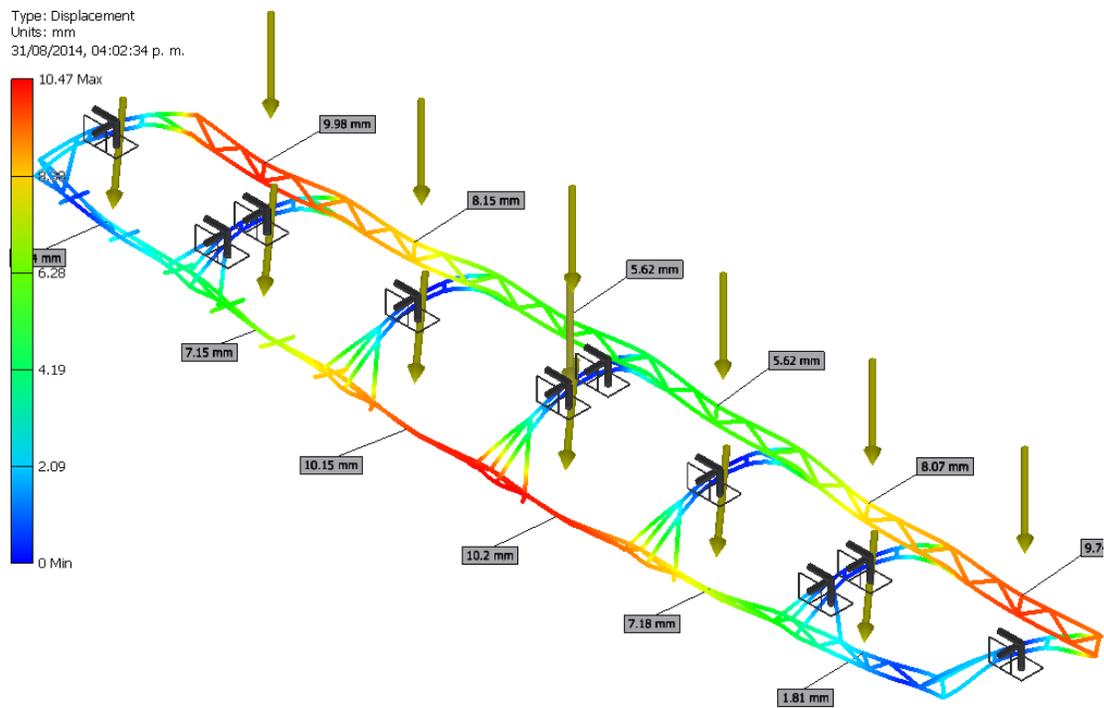


Figura 5.17. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 2.

Name		Minimum	Maximum
Displacement		0.000 mm	10.472 mm
Forces	Fx	-5373.135 N	4994.118 N
	Fy	-7114.686 N	10791.620 N
	Fz	-7454.561 N	7396.951 N
Moments	Mx	-1264983.859 N mm	1056317.418 N mm
	My	-93787.429 N mm	49283.061 N mm
	Mz	-38094.936 N mm	50924.012 N mm
Normal Stresses	Smax	-40.975 MPa	176.406 MPa
	Smin	-176.644 MPa	13.270 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	173.353 MPa
	Smin(Mx)	-173.353 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	48.079 MPa
	Smin(My)	-81.350 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	-48.488 MPa	13.974 MPa
Shear Stresses	Tx	-89.090 MPa	95.851 MPa
	Ty	-192.512 MPa	104.196 MPa
Torsional Stresses	T	-42.556 MPa	31.835 MPa

Tabla 5.18. Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 2.

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Components (Fx,Fy,Fz)	Magnitude	Components (Mx,My,Mz)
Custom Constraint:7	1263.508 N	55.782 N	63152.861 N mm	0.000 N mm
		1261.808 N		-38234.308 N mm
		34.371 N		-50263.520 N mm
Custom Constraint:6	4610.801 N	34.076 N	36049.149 N mm	0.000 N mm
		1650.747 N		-28610.064 N mm
		-4305.039 N		21931.834 N mm
Custom Constraint:9	4468.115 N	-10.831 N	89886.969 N mm	0.000 N mm
		613.342 N		-77803.021 N mm
		4425.804 N		-45015.076 N mm
Custom Constraint:5	2379.602 N	30.553 N	27330.521 N mm	-0.000 N mm
		2376.763 N		-25770.657 N mm
		112.124 N		9101.134 N mm
Custom Constraint:8	4956.808 N	-72.585 N	23788.214 N mm	-0.000 N mm
		589.302 N		-22808.091 N mm
		-4921.118 N		6757.966 N mm
Custom Constraint:4	5401.631 N	63.239 N	15934.964 N mm	-0.000 N mm
		1933.186 N		13120.130 N mm
		5043.452 N		9043.521 N mm
Custom Constraint:3	2368.836 N	26.730 N	18281.253 N mm	0.000 N mm
		2366.159 N		4792.414 N mm
		109.349 N		17641.910 N mm
Custom Constraint:2	4712.328 N	49.272 N	15973.631 N mm	0.000 N mm
		1682.657 N		-15866.584 N mm
		-4401.394 N		1846.189 N mm
Custom Constraint:10	4545.728 N	-109.413 N	81006.465 N mm	-0.000 N mm
		601.922 N		69848.554 N mm
		4504.371 N		41027.148 N mm
Custom Constraint:1	1258.832 N	-66.822 N	51852.819 N mm	0.000 N mm
		1255.945 N		29697.437 N mm

	52.852 N	42506.200 N mm
--	----------	----------------

Tabla 5.19. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 2.

5.3.5 Marco de inclinación: Escenario 4

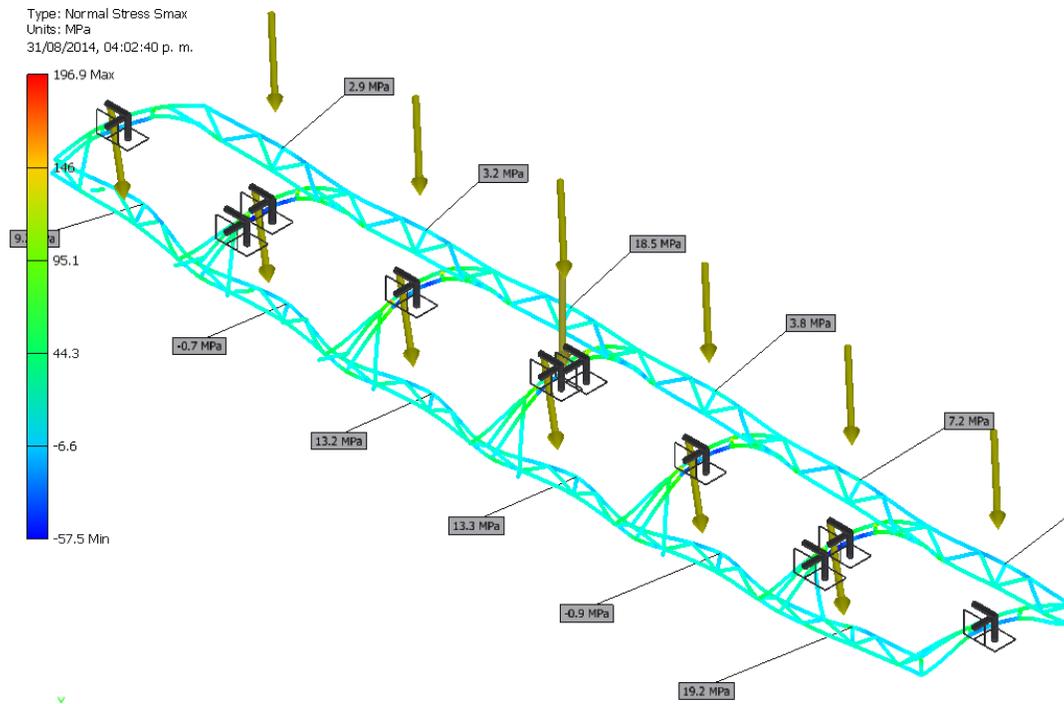


Figura 5.18. Resultados de análisis de esfuerzos, escenario 4.

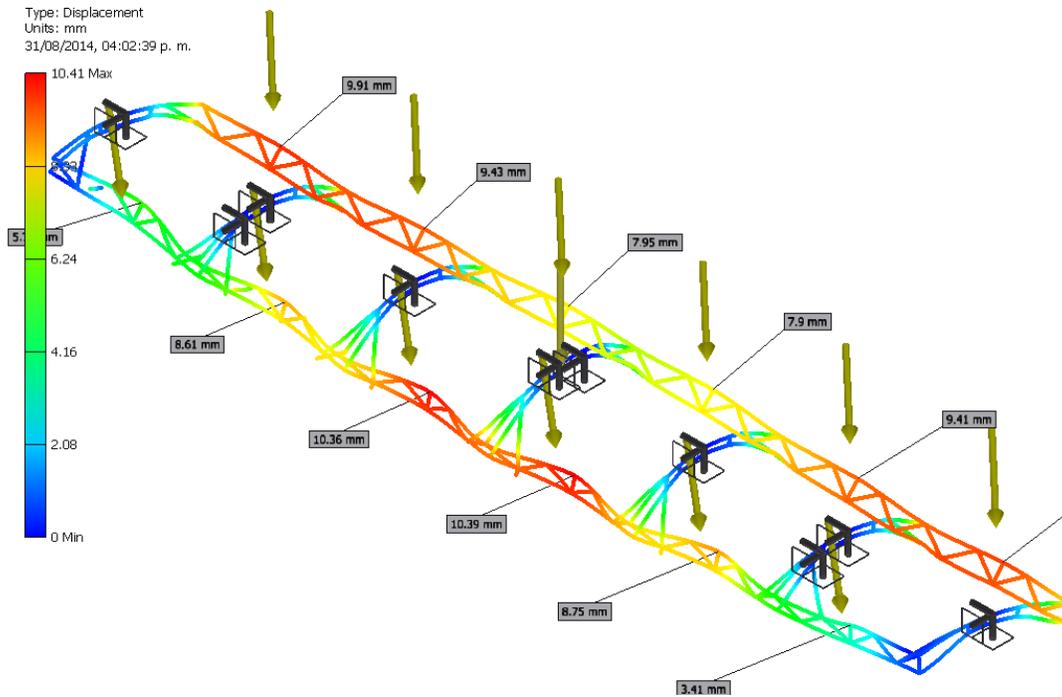


Figura 5.19. Resultados de análisis de deformaciones, escenario 4.

Name		Minimum	Maximum
Displacement		0.000 mm	10.408 mm
Forces	Fx	-5961.979 N	6195.493 N
	Fy	-7999.493 N	10236.834 N
	Fz	-8223.196 N	9090.346 N
Moments	Mx	-1585166.420 N mm	1188428.532 N mm
	My	-44485.133 N mm	33767.074 N mm
	Mz	-38261.415 N mm	49523.956 N mm
Normal Stresses	Smax	-57.538 MPa	196.933 MPa
	Smin	-197.176 MPa	10.920 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	193.393 MPa
	Smin(Mx)	-193.393 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	57.025 MPa
	Smin(My)	-89.807 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	-59.588 MPa	13.123 MPa
Shear Stresses	Tx	-110.522 MPa	106.356 MPa
	Ty	-182.615 MPa	112.606 MPa
Torsional Stresses	T	-41.386 MPa	31.974 MPa

Tabla 5.20 Resultados de análisis de esfuerzos, fuerzas internas y deformaciones, escenario 4.

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Components (Fx,Fy,Fz)	Magnitude	Components (Mx,My,Mz)
Custom Constraint:7	1383.535 N	37.046 N	61095.649 N mm	-0.000 N mm
		1381.513 N		21195.156 N mm
		-64.936 N		-57301.341 N mm

Custom Constraint:6	3948.890 N	44.205 N	45744.789 N mm	0.000 N mm
		1732.803 N		-43448.399 N mm
		-3548.123 N		-14311.615 N mm
Custom Constraint:5	2618.465 N	9.099 N	12093.873 N mm	0.000 N mm
		2610.566 N		-1298.004 N mm
		-203.032 N		12024.015 N mm
Custom Constraint:4	1634.992 N	-4.903 N	30156.701 N mm	-0.000 N mm
		1178.996 N		28603.425 N mm
		1132.759 N		9553.569 N mm
Custom Constraint:3	2606.181 N	10.599 N	23488.293 N mm	-0.000 N mm
		2598.222 N		15410.170 N mm
		-203.246 N		17726.436 N mm
Custom Constraint:2	3978.391 N	23.836 N	33037.472 N mm	-0.000 N mm
		1768.218 N		-4087.576 N mm
		-3563.766 N		32783.629 N mm
Custom Constraint:1	1379.495 N	-59.085 N	53150.089 N mm	0.000 N mm
		1374.698 N		-21185.655 N mm
		-98.587 N		48745.256 N mm
Custom Constraint:9	3367.963 N	-7.955 N	55336.877 N mm	0.000 N mm
		637.470 N		55329.805 N mm
		3307.075 N		-884.689 N mm
Custom Constraint:8	2040.976 N	-9.705 N	53089.406 N mm	0.000 N mm
		1553.757 N		-53062.930 N mm
		-1323.377 N		1676.463 N mm
Custom Constraint:10	3418.494 N	-43.139 N	51539.920 N mm	0.000 N mm
		624.611 N		51323.879 N mm
		3360.670 N		4714.113 N mm

Tabla 5.21. Resultados de fuerzas de reacción en pasadores, escenario 4.

Los resultados obtenidos para el seguidor polar en los diferentes escenarios planteados en este estudio, cumplen satisfactoriamente con los criterios de evaluación especificados de deformaciones y esfuerzos.

5.4 Estimación de costos de producción y herramientas necesarias

Se realizó un análisis de costos directos basado en los materiales y mano de obra necesarios para la construcción del seguidor solar sin considerar los elementos ópticos, ni generación de potencia. Las partidas fueron analizadas como el porcentaje que representa en cada concepto, y el porcentaje que cada concepto representa del total. En el análisis no se consideran costos indirectos, de transporte, instalaciones eléctricas, ni adecuaciones especiales al terreno. La siguiente tabla muestra los resultados del análisis de costos.

Materiales y Consumibles

PART.	CANT.	DESCRIPCIÓN	Porcentaje
1	8	<i>Ptr de 3" x 1.5" Cal. 11</i>	5%
2	4	<i>Ptr dre 2.5" x 1.5" Cal. 11</i>	3%
3	9	<i>Ptr de 1.25" x 1.25" Cal. 11</i>	7%
4	2	<i>Placa de 1/2"</i>	22%
5	12	<i>Chumacera UCFL205D1 NTN</i>	3%
6	1	<i>Pintura DQM 1808 Autoimprimante Epoxica</i>	24%
7	1	<i>Maquinados c/ machueliado</i>	7%
8	8	<i>Solera de 5 " x 1/4</i>	4%
10	7	<i>Ptr de 3" x 2" Cal. 11</i>	9%
11	12	<i>Ptr de 2" x 1" Cal. 14</i>	0%
13	12	<i>Ptr de 3" x 2" Cal. 14</i>	0%
14	2	<i>Solera de 3" x 1/4"</i>	2%
16	6	<i>Tornilleria</i>	1%
17	1	<i>Transporte</i>	3%
19	1	<i>Canal C4 pesado</i>	2%
20	7	<i>Bujes</i>	9%
24	12	<i>Redondo de 1.5 in</i>	0%
25		<i>Angulo de 1"x1"x1/8"</i>	0%
26	10	<i>Rotulas 1in rosca exterior juego izq y der</i>	0%
Total de Materiales y Consumibles			32%

Mano de Obra (Fabricación)

DIAS	CANT.	DESCRIPCIÓN	Porcentaje
5	1	Supervisor (50%)	15%
10	2	Soldador	47%
8	1	Ayudante	11%
2	1	Pintor	4%
7	1	Ingeniero de instrumentación	23%
Total de Mano de Obra			11%

Instrumentación y Automatización

PART.	CANT.	DESCRIPCIÓN	Porcentaje
1	1	Lote de selectores y accesorios ABB/Moeller	2%
2	1	Lote de clemas y accesorios de conexión ABB	3%
3	1	ITM, 230/400V CA, icn = 3 kA, 12-440V CA/12-60V CD	0%
4	2	Fuente de alimentación estandar 110-220 CA/24 V CD 5.0A	9%
5	5	Conector glándula, 1/2 npt	0%
6	1	Gabinete 60x40x25 marca Rittal IP 65	4%
7	2	Relevador universal 24V CD con 3 C/O(1 pines) incl. Base	1%
8	2	Relevador universal 24V CD con 2 C/O(1 pines) incl. Base	1%
9	4	Relevador tipo clema 24 V CD con 1 C/O incl. Base	2%
10	2	Relevador de estado sólido ZENSO	6%
11	1	Fuente de alimentación PM1207 24 V DC/2.5 A	5%
12	1	Simatic STEP 7 Basic v13 floating license	17%
13	1	Modulo de comunicación CM 1241, RS232, 9 PIN	6%
14	1	Simatic S7-1200, CPU 1217C, Compact CPU, DC/DC/DC	37%
15	1	Sensor anemómetro analógico 0.4V to 2V, 0.5m/s to 50m/s	3%
16	1	Torreta de luces indicadores siemens Rojo, Verde, Amarillo	4%
17	2	Actuadores Joyce Dayton 900 mm, 24 V, 9000 N	4%
Total de Instrumentación y Automatización			28%

Mano de Obra (Instalación)

DIAS	CANT.	DESCRIPCIÓN	Porcentaje
2	1	Supervisor	67%
2	1	Ayudante	33%
Total de Mano de Obra para Instalación			2%

Obra Civil

PART.	CANT.	DESCRIPCIÓN	Porcentaje
1	7	Zapata aislada para poste, incluye excavación y armado	100%
Total de Obra Civil			27%

Tabla 5.22. Análisis de costos directos para la fabricación e instalación del prototipo.

5.5 Pruebas preliminares

Se realizaron pruebas preliminares con la primera etapa de las unidades ópticas, los espejos concentradores, montadas en las estructuras de soporte. Se colocaron los actuadores lineales para comprobar el movimiento del mecanismo, obteniendo resultados satisfactorios. Se midió la deformación causada por el peso de los mecanismos y las unidades ópticas, estando dentro de los límites establecidos por las unidades ópticas. Se realizó una prueba de vibración causada por el arrastre del viento, utilizando un abanico industrial colocado frente a las unidades de concentración y haciendo una inspección visual del reflejo en los espejos, obteniendo también resultados satisfactorios.

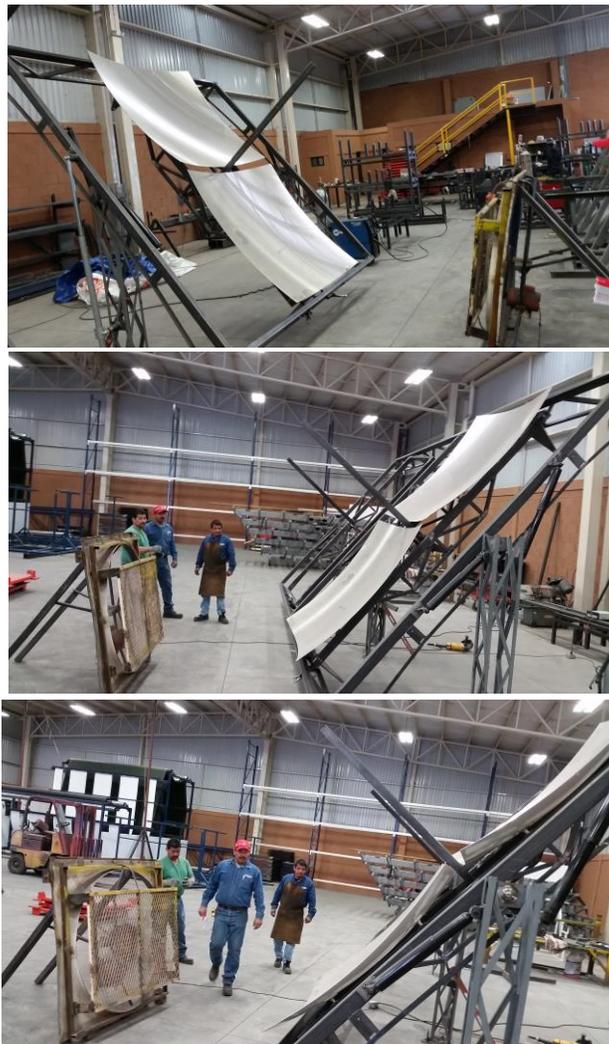


Figura 5.20. Pruebas preliminares al seguidor solar.

6. CONCLUSIONES

El proceso de diseño del mecanismo de seguidor solar permitió utilizar herramientas computacionales para simular el efecto de las cargas de viento en la estructura, para posteriormente traducirlas en pérdidas del ángulo de aceptación de la tecnología de concentración solar.

Al utilizar herramientas como la búsqueda del estado de la técnica y vigilancia tecnológica, se permitió obtener un diseño novedoso cuya patente fue tramitada en Septiembre de 2014. Utilizando la tecnología de prototipado rápido, se fabricó a su vez un prototipo a escala del mecanismo, el cual permitió que se presentase el concepto a los investigadores de la UNAM y de la Universidad de Arizona, obteniendo muy buenos comentarios.

Por otro lado se realizó la fabricación del prototipo, el cual será instalado en la Plataforma Solar de Hermosillo integrando el sistema Óptico de la Universidad de Arizona, y el sistema de refrigeración y aprovechamiento de calor residual. El sistema pasará un año siendo evaluado por personal de la institución para caracterizar su precisión, depurar sus posibles fallas y mejorar sus sistemas de control.

La siguiente fase en el proceso de investigación en la cual este trabajo fue enmarcado es la etapa de programación del software y pruebas de operación, así como el desarrollo de sistemas de reducción de las vibraciones mediante sensores acelerómetros y amortiguadores magnetoreológicos como se reivindica en la solicitud de patente.

Finalmente, el proyecto de investigación permitió realizar la prueba de concepto del sistema de seguimiento polar para paneles de concentración. La empresa Manufactura y Servicio SOGO Hermosillo integrará el diseño a su línea de productos mediante un convenio de licenciamiento que se encuentra en proceso de firma al momento de presentar el presente documento.

6.1 Modelo de transferencia de tecnología y/o conocimiento

El proyecto de LACYQS, enmarca varios resultados importantes de vinculación, que se han derivado en el Campo Experimental de Torre Central CEToC (antes CPH), en este proyecto se han desarrollado varias tecnologías que se han protegido por medio de solicitudes de patentes, de estas solicitudes de patentes que se han generado se ha buscado poder transferirlas al sector productivo para que impacten en el desarrollo económico y generen impactos de mitigación de gases efecto invernadero, pues al adoptarlas se dejan de consumir combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica.

En este sentido la tecnología que se ha logrado transferir a una empresa local dedicada al sector automotriz, donde su expertiz es el trabajo de la metalmecánica, es la de estructuras de seguimiento solar de dos ejes, con la cual esta empresa abre una unidad de negocio dedicada a la fabricación de estructuras fijas y de seguimiento solar para atender el mercado Fotovoltaico y de concentración solar de potencia, ya que sirve para ambas tecnologías solares.

Esta transferencia se ha realizada basada en un modelo conceptual vinculación empresa-academia, desarrollado por Dávila y Rodríguez (2015), el cual propone un marco como el que se presenta a continuación en la figura 6.1.

En el modelo se presentan líneas de acción que contribuyen a que los resultados que se van obteniendo de este proyecto nacional se conviertan en innovación, estas líneas de acción se describen a continuación.

Estas líneas de acción desprenden las siguientes actividades que son:

- Generación y transferencia de tecnología .- mediante la protección de propiedad industrial el IMPI y sus similares internacionales y su posterior licenciamiento y capacitación a empresas mexicanas y extranjeras
- Diseño a la Medida y evaluación de tecnología.- de productos tecnológicos y procesos de empresas mexicanas y extranjeras, sean diseños propios o de terceros.

- Desarrollo de conocimiento.- Investigación Básica y aplicada además de desarrollo tecnológico de frontera, para generar conocimiento enfocado en la innovación
- Generación de empresas por académicos.- alianzas en entre empresas y/o entre investigadores que generen empresas de base tecnológica Start-up, Spin-off.



Figura 6.1. Modelo conceptual de Vinculación Empresa-Academia (Davila, Rodriguez, 2015).

Al plantear este modelo se tienen ya resultados encaminados a mostrar la pertinencia del trabajo generado en el proyecto LACYQS II donde se ha generado como resultado la participación del equipo de trabajo en el proyecto “Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados P03” del Proyecto Nacional Centro Mexicano en Innovación en Energía Solar, que se alberga en la instalación del CEToC, del cual se han tenido buenos resultados como se describen a continuación.

El proyecto “Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados” (P03) esta siendo financiado por el programa Centros Mexicanos de Innovación en Energía Solar del Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética

SENER - CONACyT, por lo que el objetivo final es el de crear innovaciones a partir de la investigación en las tecnologías del estado del arte. Los principales logros del proyecto hasta ahora, tienen que ver con la integración de equipos de trabajo multidisciplinarios de diferentes instituciones, y la generación de propiedad industrial reflejada en solicitudes de patentes, así como la integración de empresas en desarrollo en la industria solar que generan mayores oportunidades de llevar los resultados del proyecto a la explotación comercial.

Esta tesis es resultado de dicho proyecto y el producto que se ha generado que es una solicitud de patente del seguidor Polar y se transferirá en el año 2016 a una empresa local que está interesada en hacer negocio con la tecnología que estamos generando.

8. REFERENCIAS

A.B. Maish (1991) The solartrack solar array tracking controller. SAND90-1471, Sandia National Laboratories.

Abdallah, S. y Nijmeh, S. (2004) Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Conversion and Management*, 45, pp 1931-1939.

Adams, S. F. (2006). *Solar thermionic space power technology testing: A historical perspective*. AIP Conf. Proc. 813, pp. 590-597.

Alatorre, C. (2009). *Renewable energies for sustainable development in México*. SENER.

Angel, R., Cuerden, B. y Whiteside, A. (2014) Lightweight dual-axis tracker designs for dish-base HPCV. AIP Conference Proceedings.

Becquerel, A.E. (1839) *Comt Rend. Academie d. Sciences*, 9, p. 561

Bernede, J.C., Derouiche, H., Djara, V. (2005) *Organic photovoltaic devices: influence of the cell configuration on its performances*. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 87. pp 261–70.

Blackmon, J.B. (2014). Heliostat drive unit design considerations – Site wind load effects on projected fatigue life and safety factor. *Solar Energy*, 10. pp 170 – 180.

Chih-Kuang, L., Chen-Yu, D., Jiunn-Chi, W. (2013) Analysis of structural deformation and deformation-induced solar radiation misalignment in a tracking photovoltaic system. *Renewable Energy* 59, pp 65-74.

Cleveland, C. and Morris, C. (2014) *Section 42 - Wars and Conflicts*, In *Handbook of Energy*, edited by Cutler J. Cleveland and Christopher Morris, Elsevier, p725-744.

Coughenour, B.M., Stalcup, T., Wheelwright, B., Geary, A., Hammer, K. y Angel, R. (2014) *Dish-based high concentration PV system with Khöler optics*. Optical society of America, 22.

Cvetković, A., Hernandez, M., Benítez, P., Miñano, J.C., Schwartz, J., Plesniak, A., Jones, R. y Whelan, D. (2008) *The free form XR photovoltaic concentrator: a high*

performance SMS3D design. High and low concentration for solar electric applications III.

Davis, M, Lawler, J., Coyle, J., Reich, A. y Williams, T. (2008) Machine vision as a method for characterizing solar tracker performance. Photovoltaic Specialists Conference, PVSC '08. 33rd IEEE.

De Winter, F. (1991) *Solar collectors, energy storage, and materials*. Massachusetts: The MIT press.

EPIA (2010). *Unlocking the sunbelt potential of photovoltaics*.

Ferekides, C.S., Marinskiy, D., Viswanathan, V., Tetali, B., Palekis, V., Selvaraj, P., Morel, D.L. (2000) *High efficiency CSS CdTe solar cells*. Thin Solid Films. pp. 361–362.

Franklin, E., Everett, V., Blakers, A., Weber, K. (2007) *Sliver solar cells: high-efficiency low-cost PV technology*. Advances in OptoElectronics.

Gong, B., Li, Z., Wang, Z. y Wang, Y. (2012) Wind-induced dynamic response of Heliostat. Renewable Energy, 38, pp 206-213.

Green, M.A., Basore, P.A., Chang, N., Clugston, D., Egan, R., Evans, R., Hogg, D., Jarnason, S., Keevers, M., Lasswell, P., Sullivan, J.O., Schubert, U., Turner, A., Wenham, S.R., Young, T. (2004) *Crystalline silicon on glass (CSG) thin-film solar cell modules*. Solar Energy, 77. pp 857–63.

Hatsopoulos, G. N. y Kaye, J. (1958). *Measured thermal efficiencies of a diode configuration of a thermo electron engine*. J. Appl. Phys. 29, pp 1124-1125.

Ho, C.K., Griffith, D.T., Sment, J., Moya, Adam, C., Joshua, M., James, K., Paterick, S. (2012) en Dynamic Testing and Analysis of Heliostats to Evaluate Impacts of Wind on Optical Performance and Structural Fatigue. Solar PACES, Marrakech, Marruecos. Septiembre 11-14, 2012.

Huacuz, J. (2005). *The road to green power in Mexico—reflections on the prospects for the large-scale and sustainable implementation of renewable energy*. Energy Policy. 33, pp2087–2099.

- IIE (2010). *Geographic information system for renewable energies*. Disponible en <http://sag01.iie.org.mx/evaluarer/welcomeSIGER.html>
- International Energy Agency, (2011) "Solar Energy Perspectives: Executive Summary" disponible en <http://www.iea.org/Textbase/npsum/solar2011SUM.pdf>
- Jørgensen, M., Norrman, K., Krebs, F.C. (2008) *Stability/degradation of polymer solar cells*. Solar Energy Materials & Solar Cells, 92. pp. 686–714.
- Leng G (2000) *RETScreen International: a decision-support and capacity-building tool for assessing potential renewable energy projects*. UNEP Ind Environ 3, pp 22–23.
- Leutz, R. y Suzuki, A. (2001) *Non-imaging Fresnel Lenses. Design and performance of solar concentrators*.
- Liverman, D., O'Brien, K. (1991) *Global warming and climate change in Mexico, Global Environmental Change*. Volume 1, Issue 5, p351-364.
- Luque-Heredia, I., Quémère, G., Cervantes, R., Laurent, O., Chiappori, E., y Ying-Chong, Jing. (2012). 'The Sun Tracker in Concentrator Photovoltaics', en Cristóbal López, A.B., Martí Vega, A., y Luque López, A. (eds), *Next Generation of Photovoltaics*, Springer Series in Optical Sciences, 165, pp. 61-93.
- Luque-Heredia, I. (2010) *Control de seguimiento solar de alta precisión con auto calibración*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Luque-Heredia, I., Gordillo, F., y Rodríguez, F. en Conference Record of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7–11 Jun 2004, pp. 2383 – 2387.
- Luque-Heredia, I., Martín, C., Mañanes, T., Moreno, J.M., Auger, J.L. y Bodin, V. (2003) *Conference Record of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, pp. 857–860.
- MacKay, D. (2009). *Sustainable Energy — without the hot air*. 3rd ed. Cambridge: UIT Cambridge Ltd. p5-6.

- Mehta, S. (2011). *PV News Annual Data Collection Results: 2010 Cell, Module Production Explodes Past 20 GW*. Disponible en: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/pv-news-annual-data-collection-results-cell-and-module-production-explode-p/>. Consultado el 16 Abril 2014.
- Ming, T., Richter, R., Liu, W. y Caillol, S. (2014) *Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change?*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 31, p792-834.
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K. y Sharifi, A. (2009) *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13. pp 1800 - 1818.
- Parida, B., Iniyar, S., Goic, R. (2011) *A review of solar photovoltaic technologies*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15. pp 1625 – 1636.
- PROMEXICO (2012). *Renewable energy*. Business Intelligence Unit.
- Randall, D.E. y Grandjean, N.R. (1983). Correlations of solar insolation and wind data for SOLMET stations. *J. Sol. Energy Eng.* 105, pp 168-173.
- REhnu Technology Overview* (2014), video, Monica Andrews, 19 May, visto 23 Julio 2014, < <http://www.youtube.com/watch?v=6c95ydbNhTU>>.
- Schwede, J.W., Bargatin, I., Riley, C.D., Hardin, B.H., Rosenthal S.J., Sun, Y., Schmitt, F., Pianetta, P., Howe, R.T., Shen, Z.X., y Melosh, N.A. (2010) *Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems*. *Nature Materials*, 9. pp 762 – 767.
- Sen, Z (2008). *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. Estambul: Springer.
- SENER (2003). *Electricity Sector Prospective 2003 – 2012*.
- Stern, N., Peters, S., Bakhshi, V., Bowen, A., Cameron, C., et al. (2006) *Stern review: the economics of climate change*. London: HM Treasury, p679.

Sungur, C. (2009) Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey.

Tiana, Y., Zhao, C.Y. (2013). *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*. Applied Energy. 104, pp 538–553.

Trillo, S. y Torruellas, W.E. (2001) Spatial Solitons.

Wei, H., Li, W., Li, M., Xin, Q., Niu, J., Zhang, Z., Hu, Z. (2007) White organic electroluminescent acceptor in a photovoltaic device. Journal of Alloys and Compounds.

Weslow, J.H. y Rodrian, J.A. (1980) Solar tracker. US Patent no. 4,215,410.

9. ANEXOS

Anexo I. Solicitudes de Patentes.

Anexo II. Planos de Fabricación.

Anexo III. Diagrama de Sistema de Control.

Anexo IV. Artículo publicado en Journal of Clean Energy Technologies.

ANEXOS

ANEXO I

Solicitudes de Patentes

ANEXO II

Planos de Fabricación

ANEXO III

Diagrama de Sistema de Control

ANEXO IV

Artículo publicado en JOCET

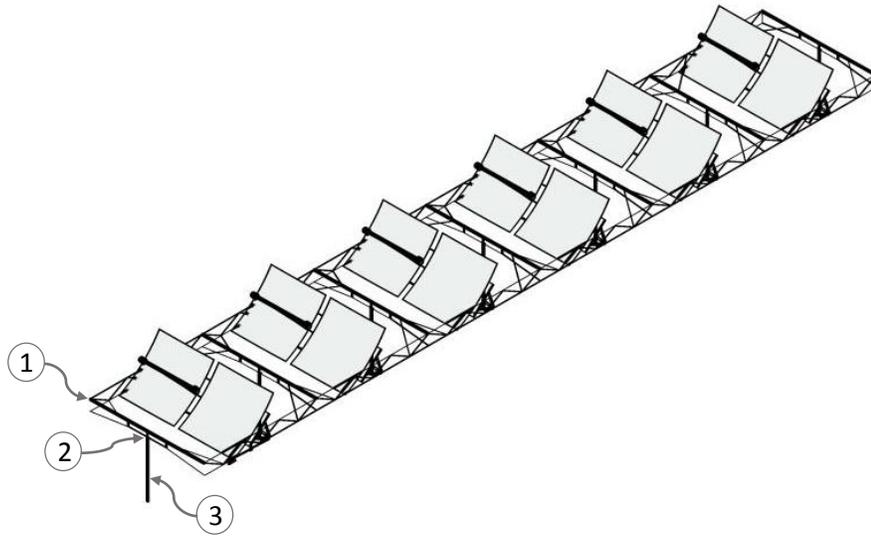


Figura 1

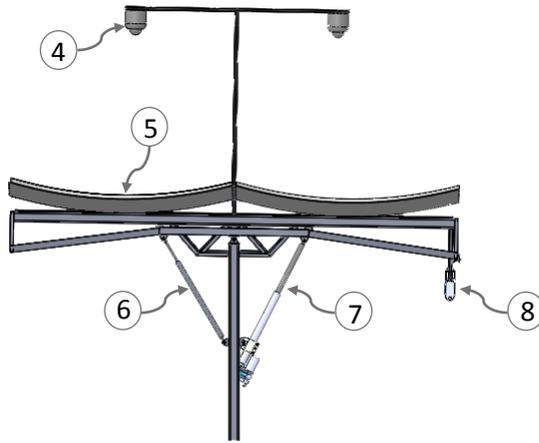


Figura 2

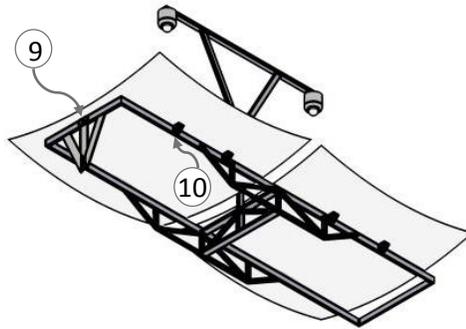


Figura 3

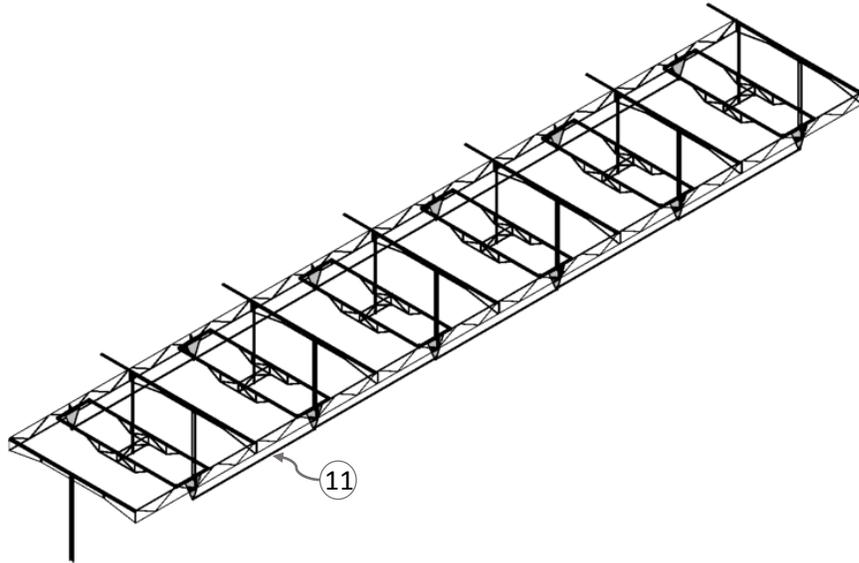


Figura 4

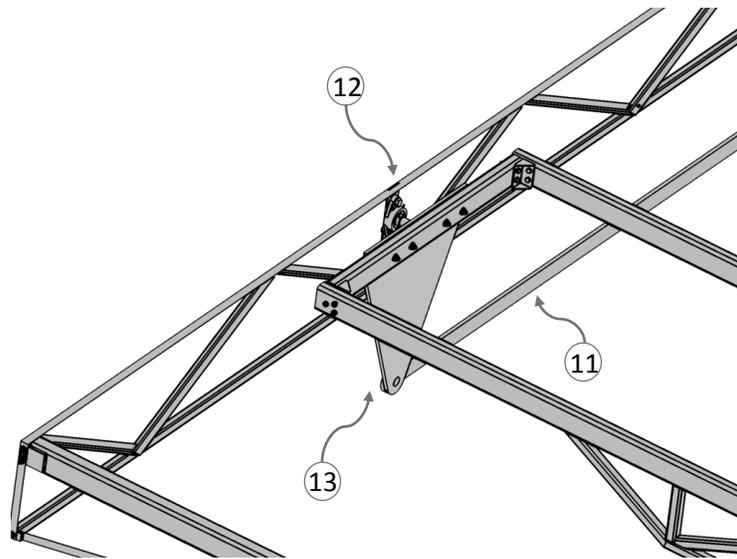


Figura 5

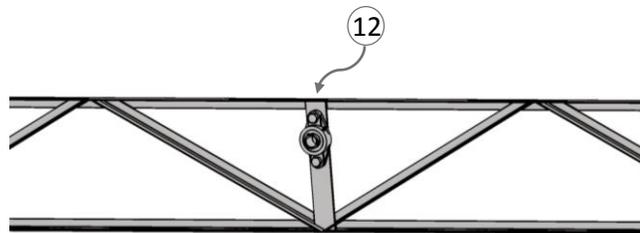


Figura 6

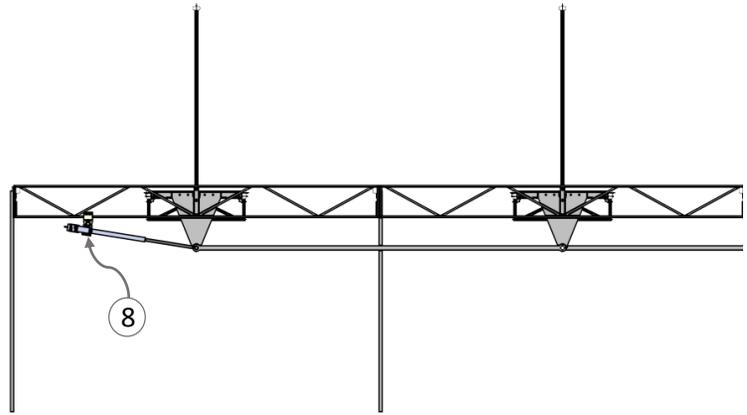


Figura 7

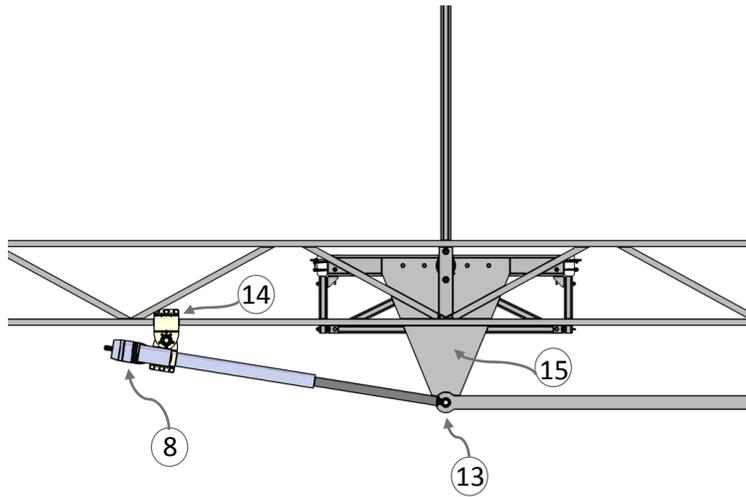


Figura 8

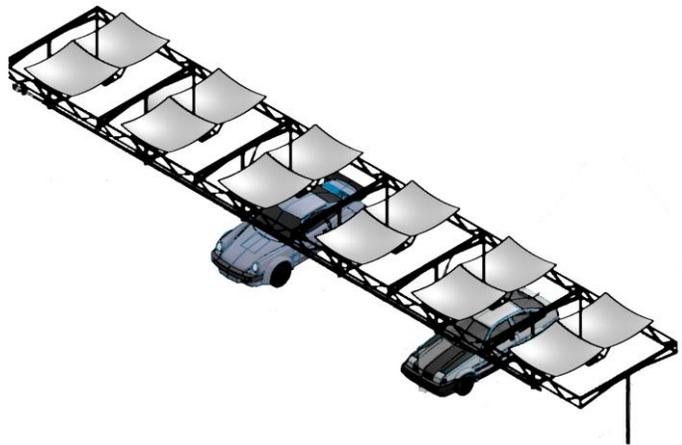


Figura 9

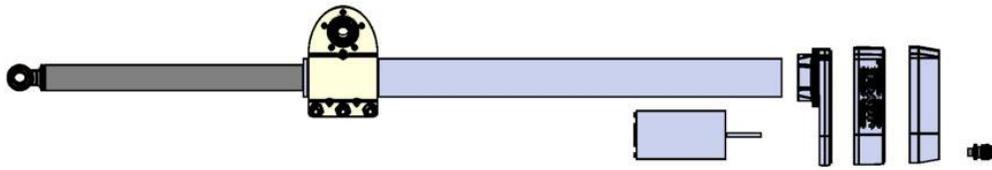


Figura 10

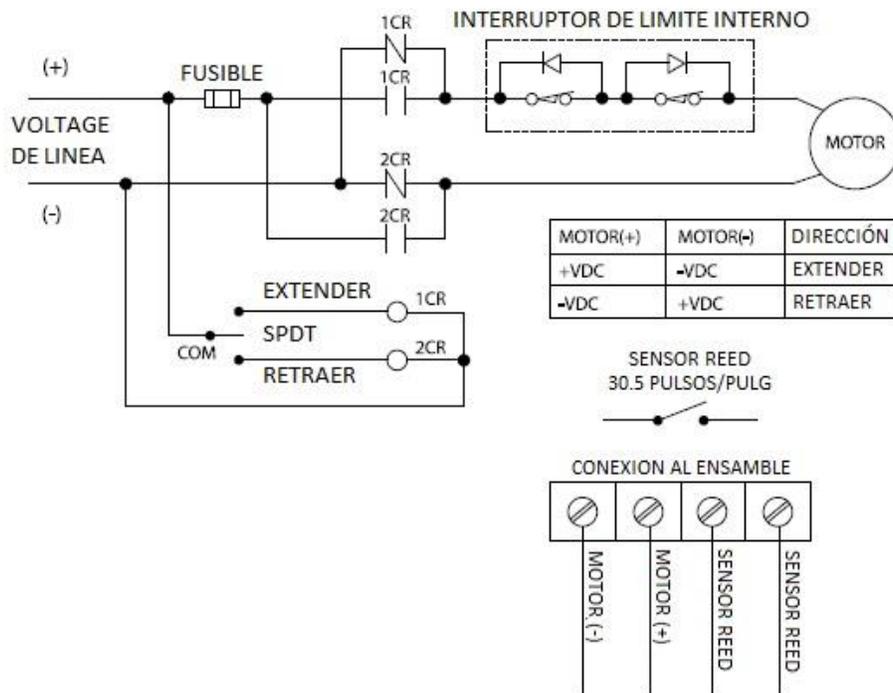


Figura 11

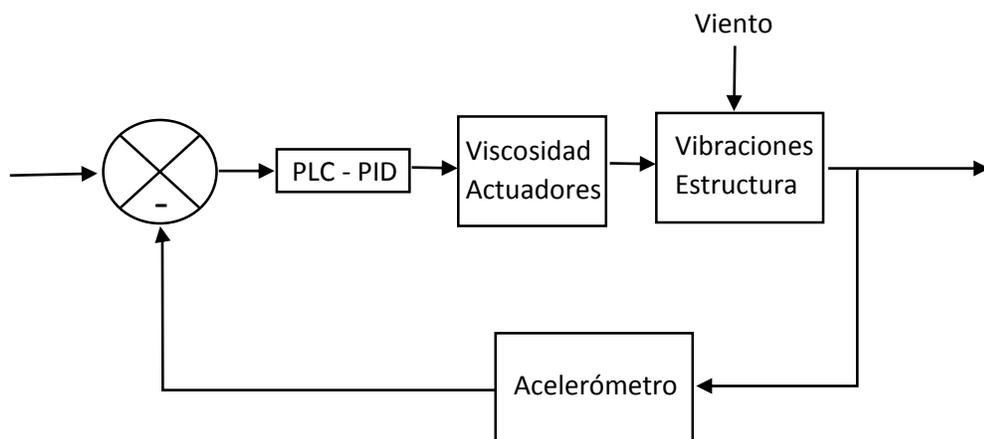


Figura 12

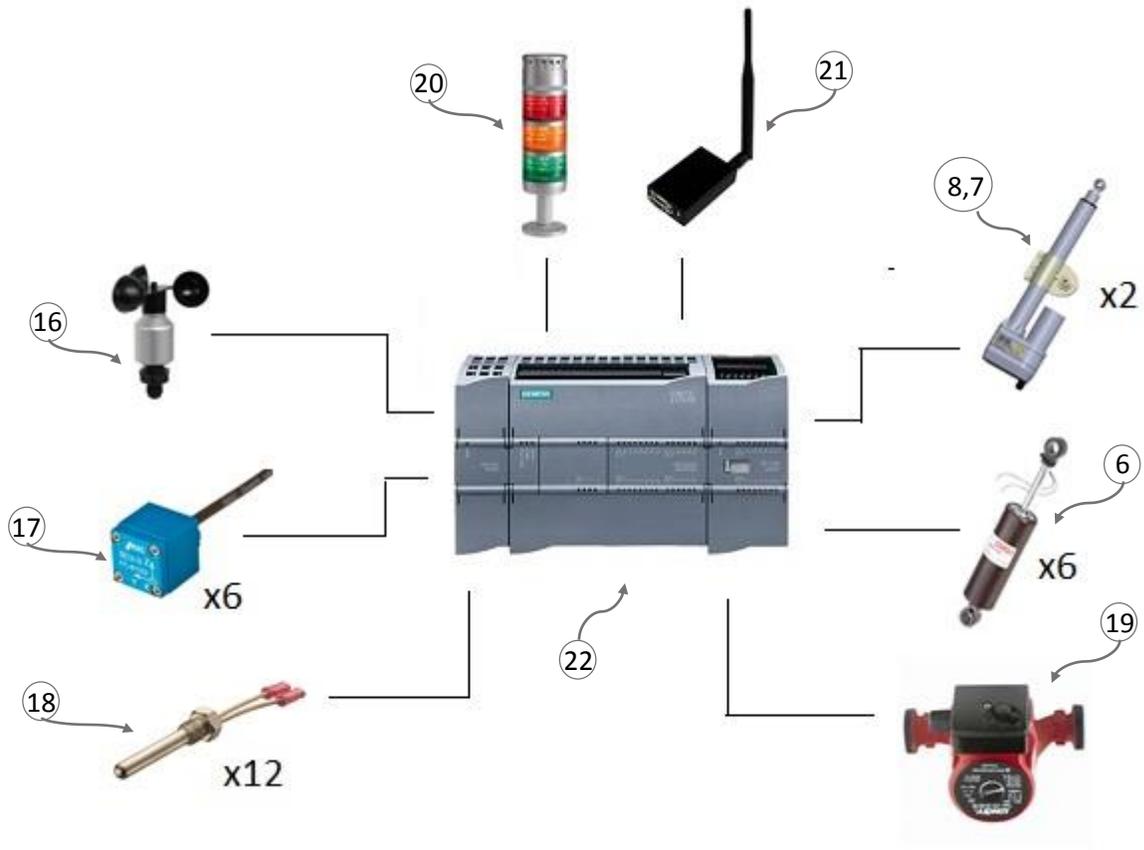


Figura 13

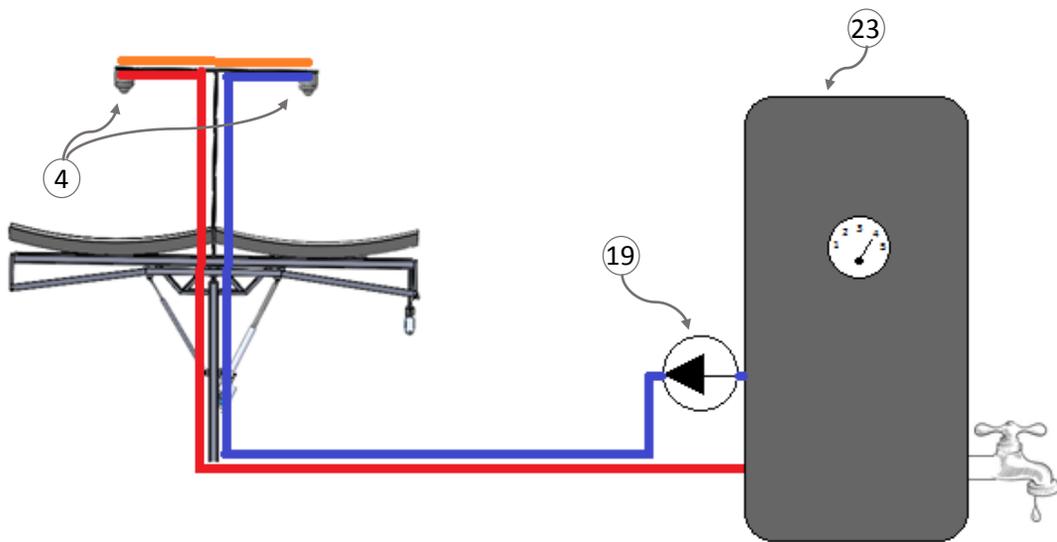


Figura 14

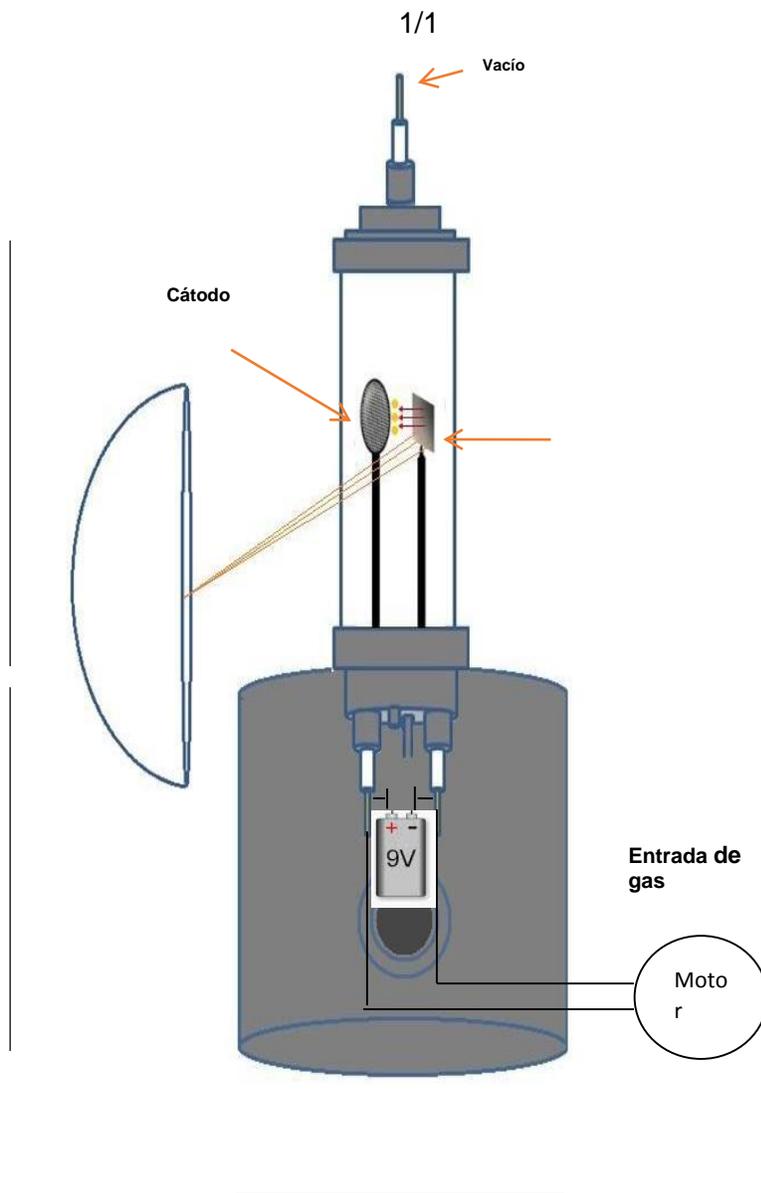


Figura 1

MECANISMO DE SEGUIMIENTO SOLAR DE DOS EJES OPERADO CON ACTUADORES LINEALES PARA PANELES DE ALTA CONCENTRACIÓN Y PLANOS

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION

- 5 La presente invención corresponde al campo técnico de la ingeniería mecatrónica, específicamente la de sistemas de control de movimiento para sistemas de concentración solar, por cuanto contiene elementos mecánicos y electrónicos para su control, además de ingeniería óptica para lograr la concentración.

ANTECEDENTES

- 10 Existe una gran cantidad de mecanismos y dispositivos para posicionar paneles fotovoltaicos, planos y de concentración, en dirección hacia el vector solar de manera que se aproveche la mayor cantidad de potencia según el llamado efecto coseno. Dichos mecanismos pueden tener uno o dos grados de libertad dependiendo de la precisión requerida para el seguimiento.
- 15 Los sistemas de alta concentración solar requieren de mecanismos con dos ejes de seguimiento, debido a la cantidad de energía en forma de radiación concentrada en un área relativamente pequeña, lo que requiere una precisión del apuntamiento que los sistemas de un solo eje no son capaces de satisfacer.
- Existen varias configuraciones de seguidores solares, siendo la configuración
- 20 altazimutal la más encontrada en invenciones y mecanismos comerciales. Dicha configuración utiliza un mecanismo que provee un movimiento de elevación en la superficie colectora mediante distintos tipos de actuadores, como motores con cajas de engranes o actuadores lineales. Un segundo mecanismo provee el movimiento azimutal, el cual requiere, en la mayoría de los casos, un sistema de
- 25 motores engranados, debido a que el movimiento es típicamente cercano a los 180 grados en este eje. La desventaja de estos sistemas reside en el costo de dichos mecanismos de engranes, además de otros costos como el de la cimentación y tener limitaciones en cuanto al número de módulos que pueden ser dirigidos por seguidor.

Otra configuración es la llamada polar, o de inclinación y giro; en donde se tienen los medios para inclinar la superficie colectora de manera manual o automática hasta posicionarse en la misma inclinación relativa del sol respecto al suelo, y otro mecanismo hace girar la superficie reflectora posicionando al vector solar de manera normal a la superficie reflectora a lo largo del día.

La invención estadounidense US 20130118099, trata de un sistema de seguimiento solar del tipo polar para arreglos de paneles planos, dirigido a través de dos actuadores lineales. La desventaja del mecanismo es que sería difícil colocar dispositivos de alta concentración solar debido a la configuración presentada, ya que los paneles harían sombra unos con otros. Otra desventaja es que no presenta ningún mecanismo de desaceleración o de amortiguamiento, haciéndolo vulnerable a las vibraciones y a ráfagas de viento. Por último, tiene la desventaja de tener un ángulo de seguimiento preciso limitado debido al sombreamiento que causan unos paneles con otros en las primeras y últimas horas del día.

El mecanismo descrito más adelante en la presente invención resuelve los problemas presentados por este mecanismo, y en general por muchos de los sistemas de alta concentración.

OBJETO DE LA INVENCION

La invención tiene por objeto el proveer un mecanismo de seguimiento solar para paneles planos y/o de concentración accionado con actuadores lineales, con la posibilidad de acomodar los módulos colectores solares en arreglos de manera que con solo dos actuadores lineales se permita controlar el movimiento de una pluralidad de dichos módulos colectores solares. Cuenta además con una pluralidad de dispositivos amortiguadores o desaceleradores que proveen estabilidad del mecanismo ante las vibraciones causadas por el viento, además funcionan como elementos estructurales en ráfagas de viento, permitiendo reducir el peso total del seguidor solar y por ende su costo. Dichos amortiguadores pueden ser magnetoreológicos para tener mayor control sobre la estabilidad de la estructura. El sistema es controlador mediante un dispositivo de control que

contiene los medios para contener un algoritmo de seguimiento solar, y los medios para controlar la posición de los ejes del mecanismo. Contiene además los medios para monitorear la velocidad del viento y la capacidad de decidir la velocidad a la que entrará al estado de protección, o sea la posición en la que el arrastre del viento provoca la menor fuerza. El mecanismo contiene los medios para convertir la energía eléctrica de corriente directa a energía de corriente alterna, mediante un inversor interconectado en red. Contiene además los medios para conectarse a una computadora remota en un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés) que permite el control del en un campo o huerta solar.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

El mecanismo de seguimiento solar consta de una estructura de soporte (1) la cual se encuentra conectada mediante una pluralidad de juntas revolutas (2) a una pluralidad de postes de soporte (3), los cuales contienen los medios para anclarse al suelo. La estructura de soporte (1) consiste en elementos estructurales con los medios para ensamblarse, formando cadenas de elementos que proveen soporte a los mecanismos de giro (Figura 3) de los colectores solares (5), los cuales son colocados en arreglos como lo muestra la Figura 1. Uno o más actuadores lineales (7) son conectados a la estructura de soporte (1) y a un poste de soporte (3), de manera que acciona a la estructura de soporte para proveer el movimiento de inclinación, como es mostrado en la Figura 2. Una pluralidad de amortiguadores (6) o desaceleradores son colocados conectados por una parte a la estructura de soporte (1) y por otra parte a un poste de soporte (3), de manera que mitiguen las vibraciones causadas por el viento, y funcionen como elementos estructurales en ráfagas de viento para proteger la integridad estructural de la estructura de soporte. Lo anterior debido a que en ráfagas de viento, la fuerza de resistencia al movimiento de los amortiguadores reacciona proporcionalmente a la velocidad del movimiento, siendo alta en condiciones de ráfagas; haciendo que la dureza del amortiguador lo haga comportarse como un elemento rígido en el instante en que la ráfaga impacta al seguidor. Dichos amortiguadores pueden ser

magnetoreológicos, de manera que permitan controlar su dureza mediante un controlador electrónico (22), mediante un sistema de control retroalimentado por un sensor de vibración, como se muestra en la Figura 12.

Los actuadores lineales (8 y 7), consisten en un motor de corriente directa, o motor
5 de corriente alterna o motor a pasos, conectado a un mecanismo de reducción
mediante engranajes con los medios para bloquear el movimiento y mantener su
posición inclusive en la pérdida de potencia en los motores. El actuador contiene
además los medios para convertir el movimiento rotativo del eje del motor y la caja
de engranes de reducción a un movimiento lineal mediante un mecanismo de bolas
10 (conocido como ball screw jack, por su nombre en inglés) o mediante un sistema
de engranes (machine screw jack, por su nombre en inglés). El actuador cuenta
además con juntas clevis para acoplarse a los elementos mecánicos a los que se
proveerá el movimiento. El mismo actuador cuenta con una pluralidad de sensores
para marcar la posición cero y el fin de carrera, y un sensor de posición que otorga
15 una salida de pulso por fracción de pulgada que le permite al controlador ubicar su
posición con precisión, como se muestra en la Figura 11. En ensamble total del
actuador es mostrado en la Figura 10.

Los colectores solares (9) son colocados en el mecanismo de giro (Figura 3), el
cual consiste en una estructura con dos juntas revolutas (12) unidas a la estructura
20 de soporte (1). Un mecanismo de barras (11) es posicionado de manera que
permita replicar el giro en cada uno de los mecanismos de giro, y es accionado
mediante un actuador lineal (8) colocado de manera que permita tener un giro
aproximado a los 180 grados. El mecanismo de barras se muestra en la Figura 5.

En una configuración preferente, el mecanismo de giro contiene los medios para
25 colocar una unidad de potencia (4) y un reflector parabólico (5) con foco en la
unidad de potencia. La unidad de potencia (4) contiene los medios para repartir la
radiación de manera equitativa en las celdas solares y contiene los medios para
hacer circular un fluido de transferencia térmica para extraer el calor excedente de
las celdas solares. Un sistema de enfriamiento hace circular el fluido de
30 transferencia hacia un radiador, el cual a su vez cuenta con un abanico que hace
circular aire para enfriar el líquido de transferencia en un proceso de convección

forzada. En otra configuración preferente, el líquido de transferencia térmica es bombeado a un intercambiador de calor y utilizado para proveer de calor de proceso a un sistema de producción o de aprovechamiento de la energía, o utilizado directamente como agua caliente, como se muestra en la Figura 14, donde se utiliza un tanque de almacenamiento térmico (23).

En una configuración preferente, un controlador lógico programable con los medios para contener un algoritmo de posicionamiento solar controla la posición de los actuadores lineales. Este es también conectado a un dispositivo con los medios para medir la velocidad del viento, de manera que se pueda programar la velocidad de viento máxima antes de colocar al mecanismo en posición de reposo, o sea, la posición en la que el arrastre del viento provoca en menor efecto en el mecanismo. El controlador lógico programable contiene además los medios para controlar la dureza de los amortiguadores (6) cuando estos sean magnetoreológicos.

En otra configuración preferente, una pluralidad de sensores acelerómetros (17) son colocados en los puntos de interés y conectados al controlador, proveyendo de retroalimentación al lazo de control de los amortiguadores, como se muestra en la Figura 12.

Otra configuración preferente consiste en colocar sensores de posición en las juntas revolutas (12 y 2) y conectados al controlador, para retroalimentar la posición del concentrador.

Otra configuración consiste en colocar sensores inclinómetros en los puntos de interés y conectados al controlador para retroalimentar la posición.

Un inversor interconectado a red es conectado eléctricamente a los módulos de potencia, y por otro a la red de corriente alterna; de manera que la potencia producida sea inyectada directamente a la red.

En otra configuración preferente, un dispositivo conecta al controlador lógico programable (22) a una computadora central mediante un protocolo de comunicación a través de la red eléctrica, de manera que se pueda controlar desde una computadora central en un sistema tipo SCADA.

Otra configuración preferente, un dispositivo de comunicación inalámbrico (21) es conectado al controlador lógico programable (22) para conectarlo a una

computadora central a través de algún protocolo de comunicación como puede ser wifi, zigbee, bluetooth, etc.

El método de control del seguidor solar consiste en los siguientes pasos:

Primero. El controlador lógico programable (22), con los medios para determinar la hora y fecha exacta, compara en sus registros la hora establecida como de inicio de operaciones con la hora actual. Si la hora actual se encuentra dentro del rango de operación, entonces procede al siguiente paso, si no, se establece la posición de protección.

Segundo. El controlador lógico programable (22) lee la velocidad del viento a través de un dispositivo (16) con los medios para hacerlo, si la velocidad del viento se encuentra dentro del rango permitido se procede al siguiente paso; si no, se mantiene en posición de protección.

Tercero. El controlador lógico programable lee los valores de los registros de emergencia, los cuales pueden ser activados al exceder valores preestablecidos en los sensores, o a través de la computadora central, la cual se comunica con el controlador mediante un dispositivo con los medios para transmitir información mediante la red eléctrica. Los registros de emergencia pueden estar activados por ejemplo en caso de pronosticarse un día nublado, o para realizar operaciones de mantenimiento. Si no existen registros de emergencia activados se procede al siguiente paso, si existe algún registro de emergencia se coloca en la posición preestablecida para dicho registro, que puede ser la de protección, o la de mantenimiento.

Cuarto. Se activa el sistema de enfriamiento de los módulos de potencia, se determina que el sistema funciona correctamente. Si el sistema enciende y funciona correctamente, se pasa al siguiente paso, si no, se manda una alerta a la computadora central y se mantiene la posición de protección.

Quinto. Se manda la señal de control a los amortiguadores magnetoreológicos (6) para disminuir su dureza.

Sexto. Se calcula la posición del sol en términos de inclinación y rotación, y se manda la posición al sistema de control de movimiento, pudiendo este estar

embebido en el controlador lógico programable, para posicionar al mecanismo en la posición del vector solar a través de los actuadores eléctricos (8,7).

Séptimo. Una vez se cumpla la posición de inclinación, se manda la señal a los amortiguadores magnetoreológicos (6) para incrementar la dureza, activando a la
5 vez el sistema de control de vibraciones (Figura 12) retroalimentado por los sensores acelerómetros (17).

Octavo. Determinar los valores de todos los sensores del sistema y reportarlos a la computadora central mediante el circuito de comunicación.

Noveno. Cuando el sistema se dirija hacia el sol, el inversor interconectado
10 detectará que hay potencia de corriente directa, por lo que activará sus operaciones inyectando dicha potencia en la red eléctrica.

Décimo. El método se repite hasta que los parámetros de velocidad de viento o de hora de operación o de registro de alarma se dejen de cumplir, haciendo que el mecanismo se lleve a la posición de protección.

15

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

A continuación se describe brevemente cada una de las figuras de soportan la explicación de la invención:

- 5 **1.** La Figura 1 es una vista isométrica del sistema seguidor solar con los concentradores y las unidades de potencia montadas en él.
- 2.** La Figura 2 es una vista lateral del sistema seguidor solar con los concentradores y las unidades de potencia montadas en él.
- 3.** La Figura 3 es una vista isométrica del mecanismo de giro conteniendo los concentradores y las unidades de potencia.
- 10 **4.** La Figura 4 es una vista isométrica de la estructura de soporte ensamblada, incluyendo los mecanismos de barras para los mecanismos de giro.
- 5.** La Figura 5 es una vista a del mecanismo de barras del mecanismo de giro, con un junta revoluta.
- 6.** La Figura 6 es una vista a detalle de la junta revoluta colocada en la estructura de inclinación.
- 15 **7.** La Figura 7 es una vista a detalle del actuador lineal unido a la estructura de inclinación y al mecanismo de barras que impulsa a los mecanismos de giro.
- 8.** La Figura 8 es una vista a detalle del actuador linear unido a la estructura de inclinación, al mecanismo de giro y al mecanismo de barras.
- 20 **9.** La Figura 9 es una vista isométrica del mecanismo seguidor solar utilizado como techumbre para estacionamiento.
- 10.**La Figura 10 una vista explotada del actuador lineal integrado.
- 11.**La Figura 11 es un diagrama de conexiones eléctricas del sistema de actuador linear integrado, incluyendo sensores de posición, de límite y motor.
- 25 **12.**La Figura 12 es un diagrama de control del sistema de control de vibraciones en estructuras o mecanismos.
- 13.**La Figura 13 es un diagrama de las conexiones de sensores, actuadores y comunicación del controlador lógico programable.
- 30 **14.**La Figura 14 es un diagrama del sistema calentamiento de agua.

REIVINDICACIONES

Habiendo descrito suficientemente nuestra invención, considero como novedad y por tanto de nuestra exclusiva propiedad lo contenido en las siguientes cláusulas:

- 5 1. Un sistema de seguimiento solar para arreglos de módulos de alta concentración caracterizado por contener:
 - a. Una estructura de soporte caracterizada por estar unido a postes anclados al suelo mediante juntas revolutas,
 - 10 b. Postes de soporte caracterizados por contener los medios para estar anclados al suelo,
 - c. Un actuador lineal conectado entre la estructura de soporte y uno de los postes anclados al suelo, caracterizado por proveer el movimiento de elevación a la estructura de soporte,
 - d. Una pluralidad de amortiguadores conectados entre la estructura de
15 soporte y los postes anclados al suelo, caracterizado por contener los medios para ajustar la dureza de amortiguamiento mediante una señal eléctrica,
 - e. Una pluralidad de mecanismos de giro unido a la estructura de soporte mediante dos juntas revolutas, caracterizado por contener un
20 mecanismo de barras con los medios para transferir el movimiento entre mecanismos de giro,
 - f. Una pluralidad de espejos concentradores parabólicos contenidos en los mecanismos de giro,
 - g. Una pluralidad de unidades de potencia caracterizadas por contener
25 los medios para distribuir la radiación solar equitativamente en celdas solares contenidos en ellos mediante un arreglo óptico de Khöler, y por contener los medios para permitir retirar el calor excedente de las celdas solares,

- h. Un mecanismo de enfriamiento, caracterizado por contener los medios para hacer fluir un líquido de transferencia térmica a las celdas solares para retirar el calor excedente,
 - 5 i. Un dispositivo inversor interconectado caracterizado por contener los medios de convertir la potencia eléctrica generada por las unidades de potencia en una corriente tal que pueda ser insertada a la red de corriente alterna, conectado eléctricamente a las celdas solares contenidas en las unidades de potencia,
 - 10 j. Un actuador lineal caracterizado por proveer el movimiento al mecanismo de giro, y estar conectado por un lado a la estructura de soporte y por otro al mecanismo de barras del mecanismo de giro,
 - k. Un dispositivo controlador electrónico, caracterizado por contener los medios para calcular la posición del sol, monitorear el valor de sensores y mandar señales eléctricas para controlar la posición de los actuadores lineales y la dureza de los amortiguadores magnetoreológicos,
 - 15 l. Una dispositivo anemómetro caracterizado por contener los medios para reportar la velocidad y dirección del viento mediante una señal eléctrica al controlador,
 - 20 m. Un dispositivo electrónico de comunicación caracterizado por contener los medios para comunicar al controlador con una computadora remota a través de la red eléctrica,
 - n. Una pluralidad de sensores inclinómetros electrónicos colocados de manera tal que permita conocer la posición de los concentradores en al menos dos ejes y conectados eléctricamente al controlador,
 - 25 o. Y una pluralidad de sensores acelerómetros electrónicos dispuestos en los concentradores y conectados eléctricamente al controlador,
2. Los actuadores eléctricos mencionados en la reivindicación anterior
- 30 caracterizados por contener:
- a. Un motor eléctrico de corriente directa,

- b. Un mecanismo reductor con los medios para convertir la potencia mecánica en una de menor velocidad y mayor torque,
 - c. Un mecanismo con los medios para convertir el movimiento rotativo del eje de salida del mecanismo anterior a un movimiento lineal de un vástago,
 - d. Un sensor eléctrico con los medios para detectar el final de carrera del vástago y mandar una señal digital a un controlador conectado eléctricamente al actuador,
 - e. Un sensor eléctrico con los medios para detectar el inicio de carrera del vástago y mandar una señal digital a un controlador conectado eléctricamente al actuador,
 - f. Un sensor eléctrico con los medios para mandar una señal de pulso eléctrico por cada fracción de medida que avance el vástago del actuador, y con los medios para indicar la dirección del vástago del actuador,
 - g. Los medios para controlar la velocidad de avance y la dirección del vástago del actuador mediante señales eléctricas de un controlador externo,
 - h. Una junta mecánica clevis conectada al final del vástago, con los medios para unirse a un mecanismo externo al actuador,
 - i. Y una junta mecánica clevis, con los medios para variar su posición y conectar al actuador a un mecanismo o estructura externa al actuador.
3. El controlador electrónico de la reivindicación 1, caracterizado por contener los medios para formar un lazo de control retroalimentado con los sensores acelerómetro y utilizando como actuadores a los amortiguadores magnetoreológicos, y conteniendo los medios para contener un algoritmo de control proporcional, integral, diferencial para controlar la vibración en el seguidor solar.
4. El controlador electrónico de la reivindicación 1, caracterizado por contener los medios para formar un lazo de control retroalimentado con el sensor

- anemómetro, y los medios para posicionar a los actuadores eléctricos de manera tal que se coloque al mecanismo de seguidor en una posición tal que el arrastre del viento genere el menor efecto posible, tomando en cuenta la velocidad y dirección del viento detectada por el sensor anemómetro,
- 5
5. El mecanismo enfriador de la reivindicación 1, caracterizado por contener los medios para variar la velocidad de flujo del líquido de transferencia mediante una bomba de velocidad variable, conectada al controlador en un lazo de control electrónico retroalimentado por sensores de temperatura dispuestos en las celdas solares.

10

 6. El mecanismo enfriador de la reivindicación 1, caracterizado por contener los medios para retirar el calor del líquido de transferencia mediante un radiador de conexión forzada,
 7. El mecanismo enfriador de la reivindicación 1, caracterizado por contener los medios para circular el líquido de transferencia a un intercambiador de calor, con los medios para aprovechar el calor en un proceso dispuesto para ello.

15

 8. El controlador de la reivindicación anterior, caracterizado por contener los medios para comunicarse con una computadora remota a través del dispositivo de comunicación que contiene los medios para transferir información a través de la red eléctrica.

20

 9. El sistema de seguimiento solar de la reivindicación 1, caracterizado por colocarse de manera tal que pueda colocarse como techumbre en cajones de estacionamiento.

25

 10. Un sistema de control de vibraciones en estructuras mecánicas o mecanismos, caracterizado por contener los medios para formar un lazo de control mediante un controlador electrónico retroalimentado por sensores acelerómetros dispuestos en la estructura o mecanismos, y con la capacidad de controlar la dureza de una pluralidad de amortiguadores magnetoreológicos a través de una señal eléctrica.

30

RESUMEN

La invención describe un sistema de seguimiento solar para arreglos de paneles
5 fotovoltaicos, planos o de concentración. El sistema comprende una estructura de
soporte unida mediante juntas revolutas a postes anclados al suelo. Un actuador
lineal provee el movimiento de elevación, y una pluralidad de amortiguadores
magnetoreológicos proveen estabilidad contra las vibraciones, además de tener
capacidad de comportarse como elementos estructurales en ráfagas de viento. Un
10 mecanismo de giro consiste en una estructura que soporta los concentradores y
las unidades de potencia, o los paneles fotovoltaicos, y se encuentra unida a la
estructura mediante juntas revolutas. El mecanismo de giro contiene un
mecanismo de barras que replica el giro en todos los mecanismos de giro, que son
accionados mediante un segundo actuador lineal. Un controlador programable
15 controla el movimiento de los actuadores, mediante sensores de posición incluidos
en los actuadores o en los mecanismos de giro; además, controla la dureza de los
amortiguadores mediante un lazo de control retroalimentado por acelerómetros
electrónicos. El controlador se comunica a una computadora central mediante un
dispositivo que contiene los medios para enviar información a través de la red
20 eléctrica. El sistema contiene además un inversor interconectado a red para
inyectar la electricidad producida a la red eléctrica. Por otro lado, el sistema
contiene los medios para retirar el calor excedente de las celdas solares mediante
un sistema de circulación de un fluido de transferencia.

GENERADOR FOTO-TERMOIÓNICO PARA LA MEDICIÓN DE MATERIALES SEMICONDUCTORES.

5

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCIÓN

La presente invención pertenece al campo de ciencias de materiales, nanotecnología y electrónica, por cuando comprende un dispositivo para la generación de energía eléctrica a través de materiales avanzados.

10

ANTECEDENTES

En el presente trabajo se describe un generador Foto-Termoionico para la medición de materiales semiconductores en aplicaciones de celdas solares. PETE (Photon Enhanced Thermionic Emission, en inglés) es un método de captación de energía solar que utiliza la naturaleza cuántica de los fotones solares en conjunto con energía térmica para generar electricidad a temperaturas compatibles con máquinas térmicas solares. El método consiste en utilizar un cátodo semiconductor separado de un ánodo por una brecha de vacío. Los fotones incidentes excitan los electrones en la banda de conducción del cátodo los cuales son emitidos al vacío y son captados por el ánodo metálico generando una diferencia de potencial, la cual se puede aplicar para realizar un trabajo. La separación física entre el ánodo y el cátodo permite una gran diferencia de temperatura, reduciendo la corriente inversa generada térmicamente la cual limita a las celdas PV a altas temperaturas.

Existen el efecto PETE teóricamente, pero no algún aparato el cual ayude a medir y caracterizar dicho efecto descrito por Jenny Nelson (2003).

En el documento de la patente estadounidense US3467840 menciona un método y sistema es utilizado en posición horizontal, pero al estar ubicado verticalmente pudiera actuar direccionar con más facilidad el haz de luz con el espejo parabólico, y la captación de los electrones con el cátodo es más completa ya que la dispersión fotónica resultante tendría a captarse mejor de una forma vertical y en parte no cuenta con ningún sistema de vacío con el cual se pueda regular la presión y caracterizar en distintos ambientes inertes, tampoco cuenta con algún dispositivo

que ayude a crear una diferencia de potencial dentro y poder captar más fácil los electrones en el cátodo.

El documento de la patente estadounidense US6720704 describe tal cual un dispositivo diodo el cual es posible aprovechar el efecto termoiónico, pero por sus
5 dimensiones es considerado costoso por los métodos en los cuales se produciría en masa, aun sin embargo es de dimensiones demasiado pequeñas las cuales tendrían que al simularse a grandes escalas y aún así solo sería viable para el aprovechamiento en la generación de energía eléctrica solo en forma de luz.

El documento de la patente estadounidense US6407477 describe un sistema el cual
10 es considerado como un avance de los sistemas de micro-electromecánica, ya que contiene un sistema en serie de dispositivos que aprovechan el efecto termoiónico, pero es limitado a ser utilizado con un solo tipo de material sin cambiarlo o sustituirlo cuando se considere prudente al termino de la vida útil del material semiconductor y aún así tampoco cuenta con un dispositivo que genere una diferencia de potencial y
15 genere una mejor captación de energía por el cátodo.

El documento de la patente estadounidense US5994638 describe un método y dispositivo capaz de aprovechar el efecto termoiónico, los métodos que sugieren para la síntesis de sistemas micro-electromecánicos son considerados demasiados
20 costosos, al igual que la producción en masa del dispositivo, también pudiera verse claramente que sería difícil o más aún no consideran el hecho de caracterizar el material que se utiliza para la captación de energía foto-térmica, tampoco cuenta con ningún dispositivo que genere una diferencia de potencial y mejore la captación de electrones.

El documento de la patente estadounidense US5492570 describe un dispositivo el
25 cual aprovecha el efecto térmico y eléctrico, aun sin embargo se cree puede ser costoso la fabricación y poco viable por la utilización de un cerámico, que aunque puede soportar altas temperaturas, por encima de los 1500°C tienden a fundirse y bajar su efectividad y por ser un cerámico tendría que estar altamente dopado para aprovechar lo el máximo efecto eléctrico, pero sin embargo se sabe que el Na que
30 menciona dicho documento con el cual está dopado en algunos casos puede bajar el punto de fusión de algunos materiales como el caso de los vidrios.

El documento de la patente estadounidense US8283553 describe un dispositivo, el cual pueda aprovechar el efecto termoiónico de un sistema de capas semiconductoras en forma de pozos cuánticos con cierta separación entre capas. Sin embargo, pudiera ser mayormente aprovechado el hacer pozos cuánticos en películas delgadas en forma de tándem aprovechando mayormente el efecto ya mencionado.

El documento de la patente estadounidense US20100139771 describe posibles dispositivos de los cuales podrían conformarse con distintos materiales que según las propiedades de diversos materiales ayudarían al aprovechamiento termoiónico.

El documento de la patente estadounidense US7129616 describe un equipo capaz de aprovechar el efecto termoiónico, pero no es considerado viable, ya que se para que funcione es necesario corriente eléctrica para encender el equipo, y la construcción del mismo sería demasiado costosa.

El documento de la patente de la organización mundial de propiedad intelectual WO2014020598 describe un dispositivo el cual es capaz de aprovechar el efecto termoiónico el cual en principio pudiera tener un aprovechamiento hasta el 40%, y aunque pudiera parecer muy bueno, se sabe existe mayor aprovechamiento cuando las estructuras semiconductoras del dispositivo están en forma de tándem. Ahora bien no describe la fuente de luz la cual será aprovechada para producir dicho efecto mencionado, lo mejor sería un concentrador solar, para aumentar el efecto foto-térmico en el sistema.

OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención describe un aparato capaz de generar corriente eléctrica aprovechando el efecto de la luz y la temperatura (Efecto foto-termoiónico) y a la vez caracterizar películas delgadas de distintos materiales semiconductores identificando cual sería más adecuado para la aplicación en celdas solares.

DESCRIPCION DE LA INVENCION

El aparato representado en la Figura 1, consiste en un equipo tubular de cuarzo de 50 cm de largo y 2.5 in de diámetro. En sus extremos cuenta con un par de tapas de

acero industrial grado 316, estas piezas fueron maquinadas con características propiamente asignadas, las 2 ajustan al tubo de cuarzo mediante una rosca y forzando a su vez a que quede sellado el tubo con un par empaques circulares de neopreno, y a sus extremos otro par de teflón.

5 Una de las tapas se encuentra enroscada a una base de acero la cual ayuda a sostener el equipo, y cuenta con 4 posibles accesos (2 de $\frac{3}{4}$ in y 2 de $\frac{1}{4}$ in diam.) para algún dispositivo de flujo o de medición del lado frontal. En un par de accesos decidimos colocar 2 electrodos de Cu recubiertos con cerámica por los cuales sirven para la medición de la energía captada y asimilada por el material semiconductor;

10 en los otros accesos el flujo de gases. En uno de los 2 accesos de $\frac{1}{4}$ in se coloca un termopar tipo K. En los electrodos, uno se encuentra con una malla por la cual se direcciona el haz de fotones reflejados con un espejo parabólico y captar rebotados por el material semiconductor, el material semiconductor donde llegan los fotones y el tubo del flujo de gases están fijos en una montura de acero, los electrones se

15 encuentran aislados con cuarzo. El funcionamiento de la malla metálica consiste en captar los electrones con rebotados en forma de radiación térmica. En la parte frontal de los electrodos cuentan con un dispositivo de crear una diferencia de potencial entre el electrodo de que conecta a la muestra del semiconductor y el electrodo que conecta con la malla metálica. Estos mismos electrodos son unidos a un motor y un

20 medidor de corriente para demostrar la eficiencia del material semiconductor La tapa del otro extremo cuenta con un par de roscas una para fijarse al tubo de cuarzo y la otra para el sistema de vacío.

A continuación se describe el método para caracterizar el efecto PETE en materiales semiconductores:

- 25 1) Introducir al reactor la muestra colocándola sobre el electrodo frontal a la malla metálica.
- 2) Encender bombas de vacío (> 1 Torr),
- 3) Se direccionan los rayos solares con el espejo parabólico hacia la muestra semiconductor.
- 30 4) Se regula la temperatura de la muestra hasta 600 °C.

- 5) Se conecta el diferenciador de voltaje.
- 6) Se mide la energía recibida por el cátodo.
- 7) Se mide la potencia en la que se mueve el motor

5

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

A continuación se describe brevemente cada una de las figuras de soportan la explicación de la invención:

1. La Figura 1 diagrama de aparato para generar y medir el efecto foto-
10 termoiónico.

REIVINDICACIONES

Habiendo descrito suficientemente mi invención, considero como una novedad y por lo tanto reclamo como de mi exclusiva propiedad el contenido de las siguientes reivindicaciones:

1.- Un aparato para medir el efecto PETE es caracterizado porque comprende:

a) Una estructura de cuarzo orientada verticalmente.

2.- El sistema interno del aparato es caracterizado porque comprende:

a) Una montura de acero inoxidable la cual ayuda a sujetar todas las piezas encontradas en el interior, desde el tubo de flujo de gases inertes, los electrodos.

b) En uno de los electrodos se encuentra montada la muestra semiconductor, (la muestra semiconductor puede ser removida o intercambiarla por otro material) y en el otro la malla metálica.

3.- El sistema de flujo de vacío es caracterizado porque comprende:

a) Un conjunto de tres mangueras de teflón, las cuales están conectadas a la tapa de salida de gases, y éstas a su vez a tres válvulas de paso intermedias entre la tapa de salida de gases y la bomba de vacío.

b) En el método de síntesis las válvulas nos ayuda a evitar un desperdicio de gases tratando de llegar a la presión deseada para el depósito y regulándola rápidamente evitando tiempos largos en la preparación de una característica importante dentro del proceso.

4.- Por la parte externa es caracterizado porque comprende:

a) Un espejo parabólico el cual direccionará los rayos del sol concentrándolos en la muestra semiconductor.

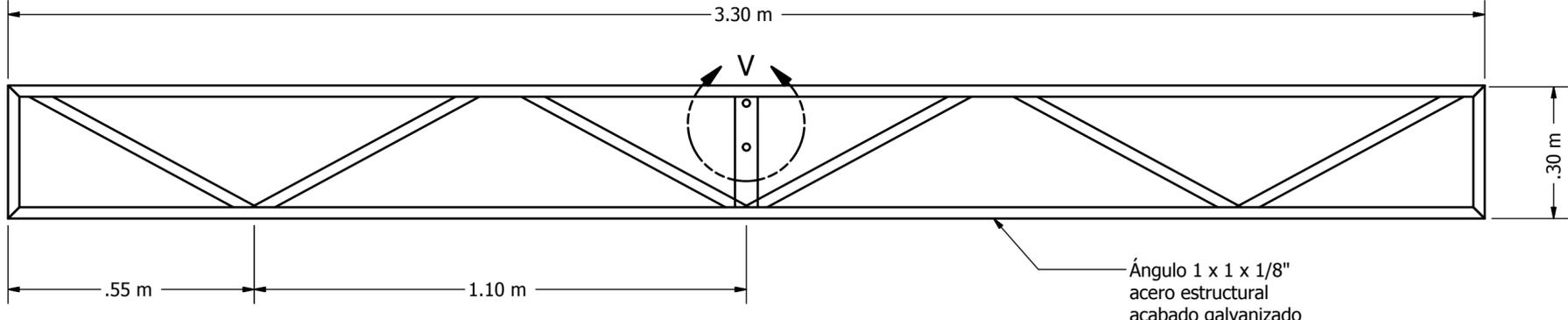
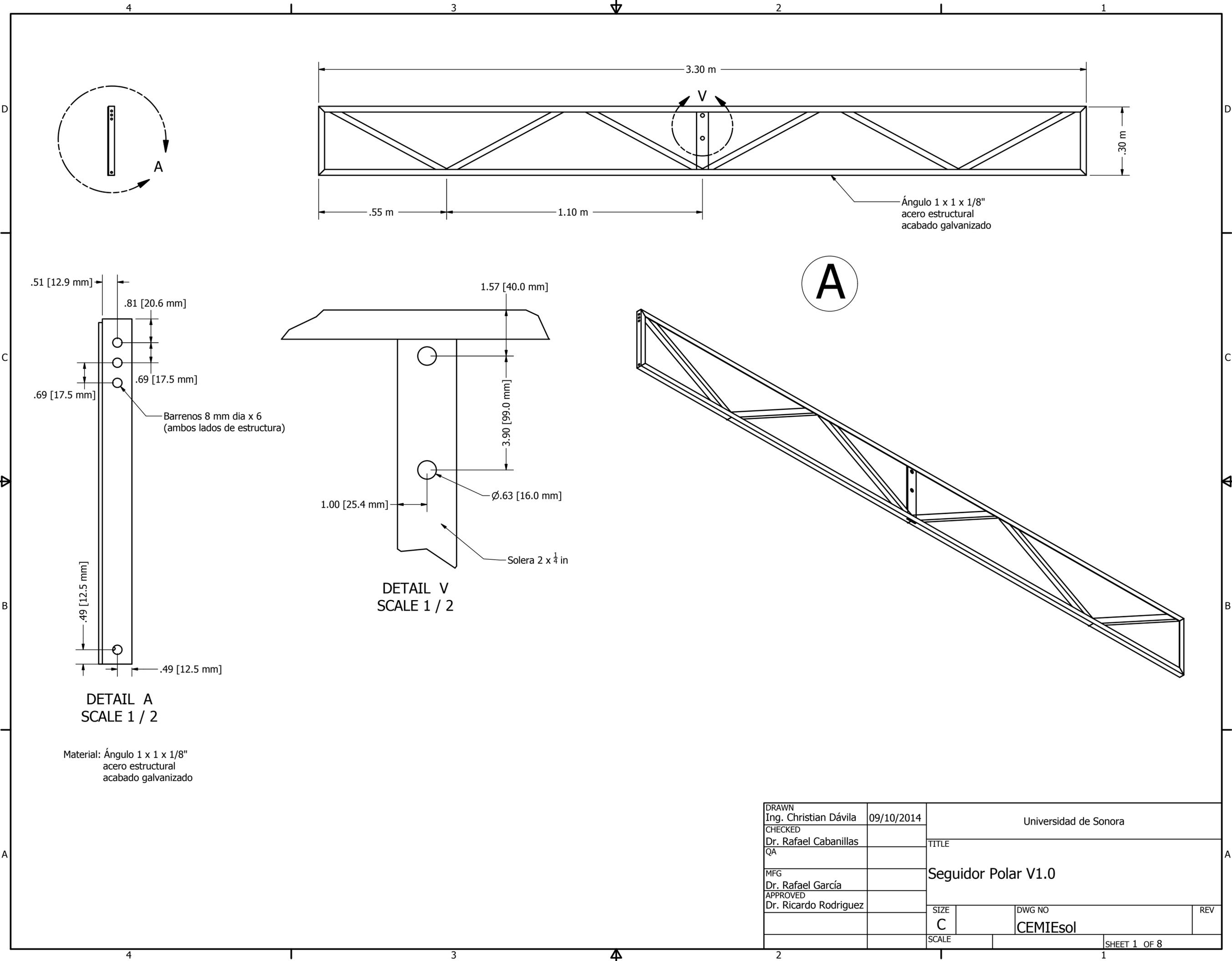
b) Un diferenciador de potencia el cual nos ayude a acelerar los electrones captados por el cátodo.

c) Un medidor de corriente captada.

d) Un motor.

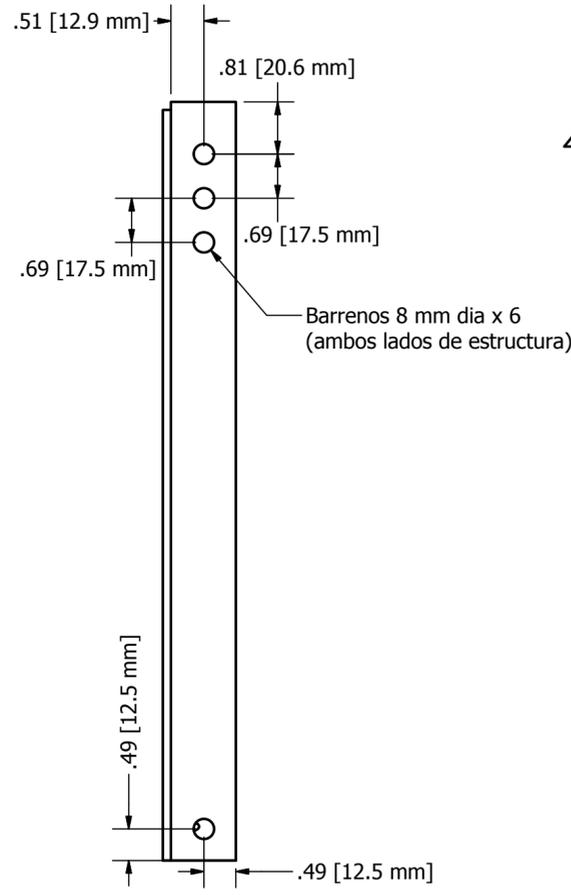
RESUMEN

La presente invención describe un aparato medidor del efecto foto-termoiónico (PETE, por sus siglas en inglés) para ser utilizado en la caracterización eléctrica de materiales semiconductores que puedan ser utilizados para celdas solares. El diferenciador de voltaje ayudara a acelerar los electrones que capta el cátodo y así generar un número mayor de energía en forma de electrones. La construcción del aparato en principio es muy barato para su producción con una manipulación muy sencilla.



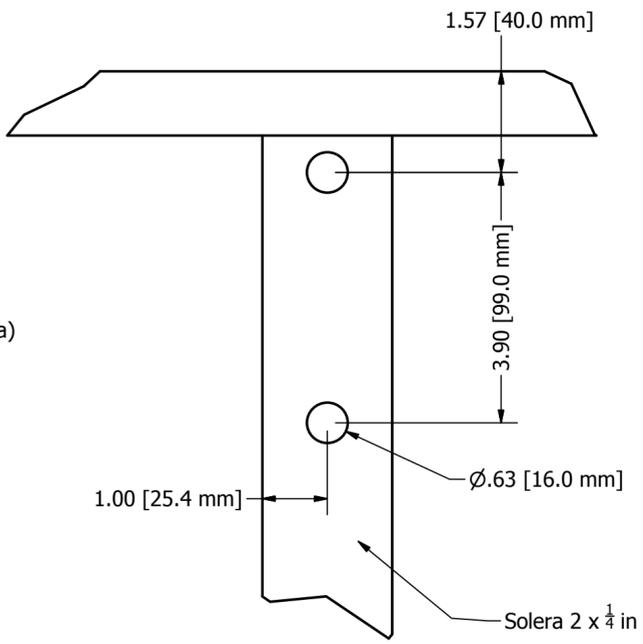
Ángulo 1 x 1 x 1/8"
acero estructural
acabado galvanizado

A

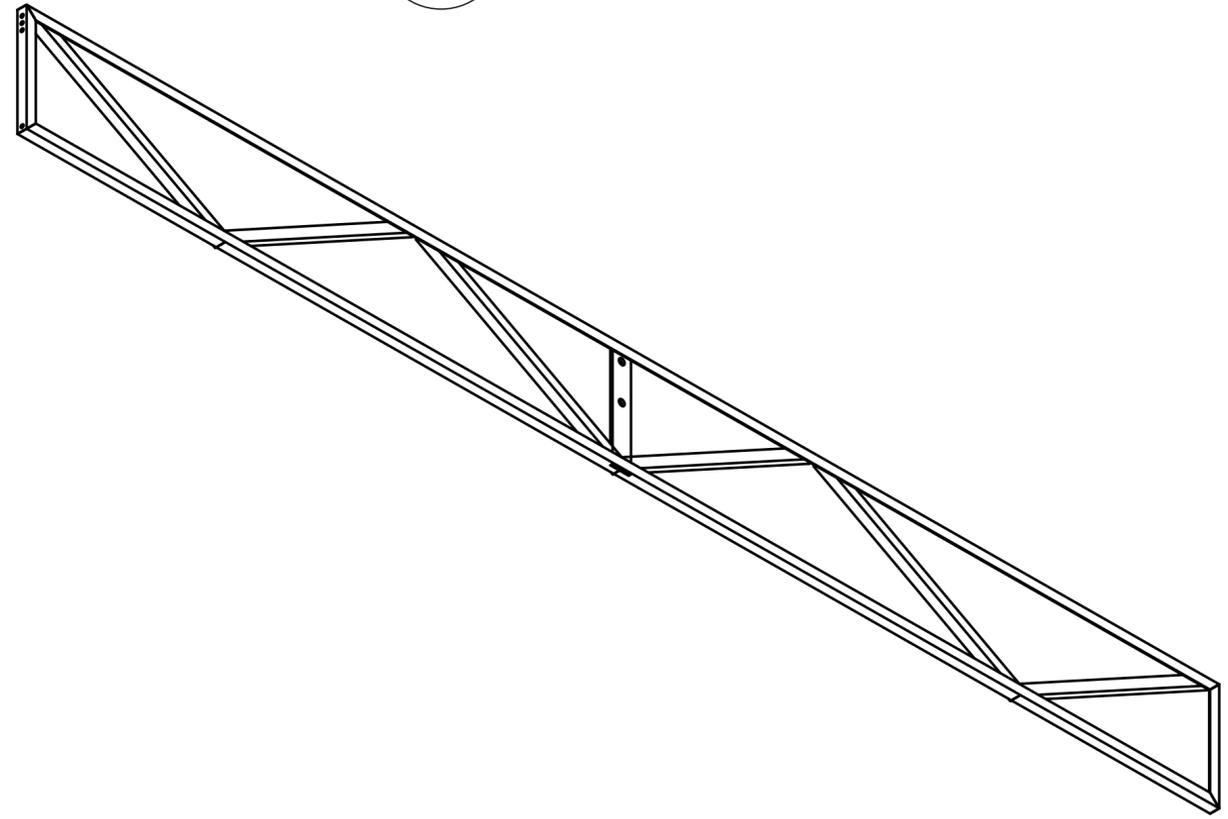


DETAIL A
SCALE 1 / 2

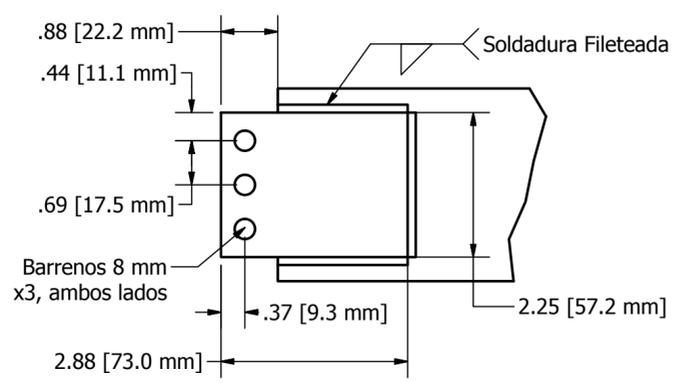
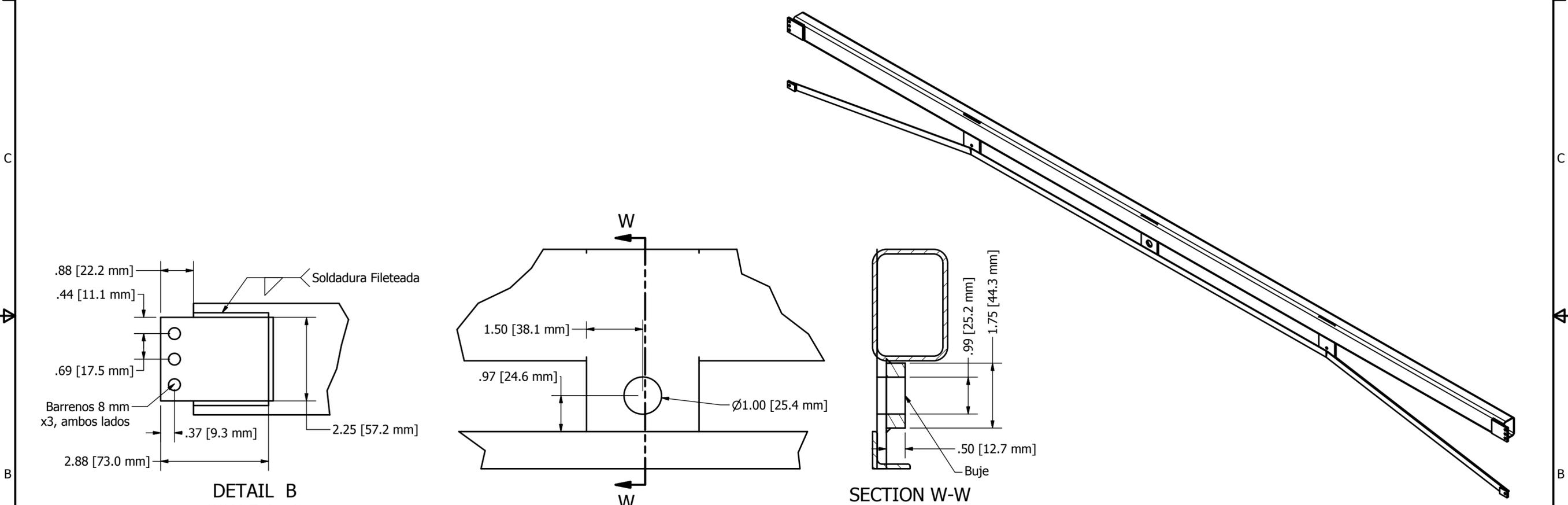
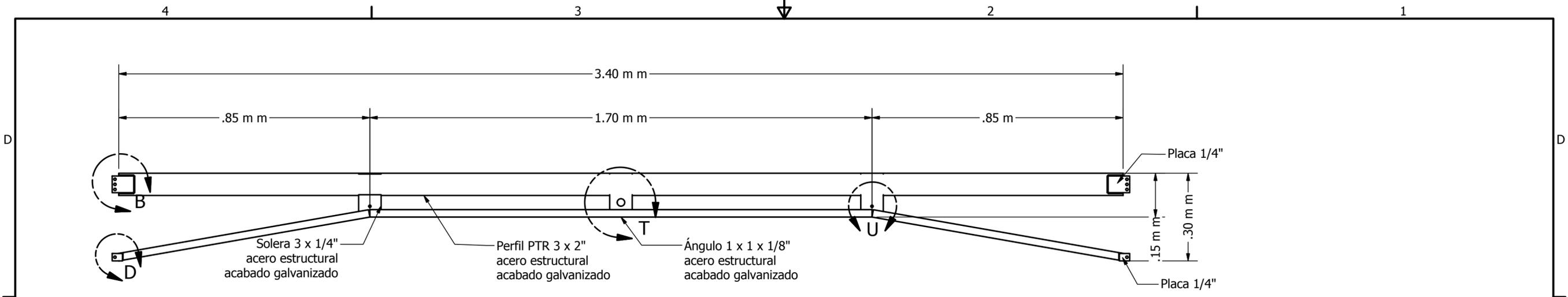
Material: Ángulo 1 x 1 x 1/8"
acero estructural
acabado galvanizado



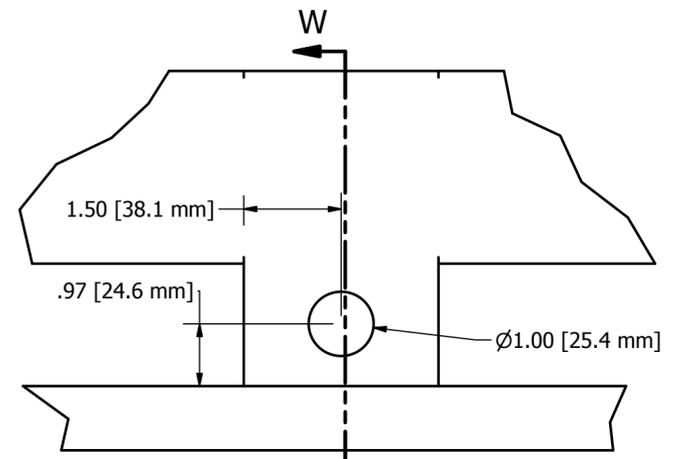
DETAIL V
SCALE 1 / 2



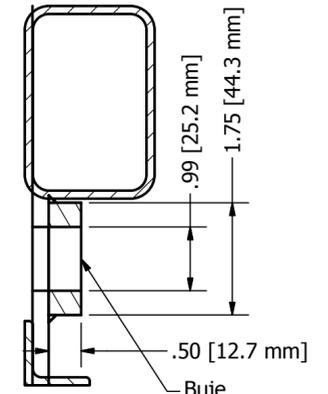
DRAWN Ing. Christian Dávila	09/10/2014	Universidad de Sonora		
CHECKED Dr. Rafael Cabanillas	QA	TITLE		
MFG Dr. Rafael García	APPROVED Dr. Ricardo Rodriguez	Seguidor Polar V1.0		
		SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV
		SCALE	SHEET 1 OF 8	



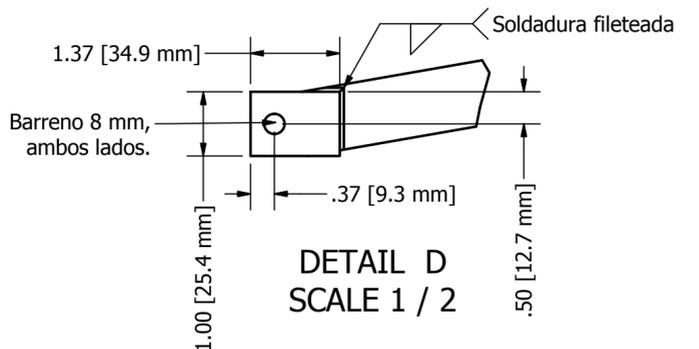
DETAIL B
SCALE 1 / 2



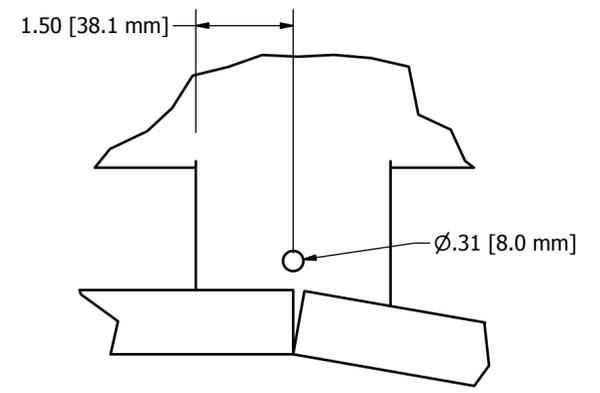
DETAIL T
SCALE 1 / 2



SECTION W-W
SCALE 1 / 2

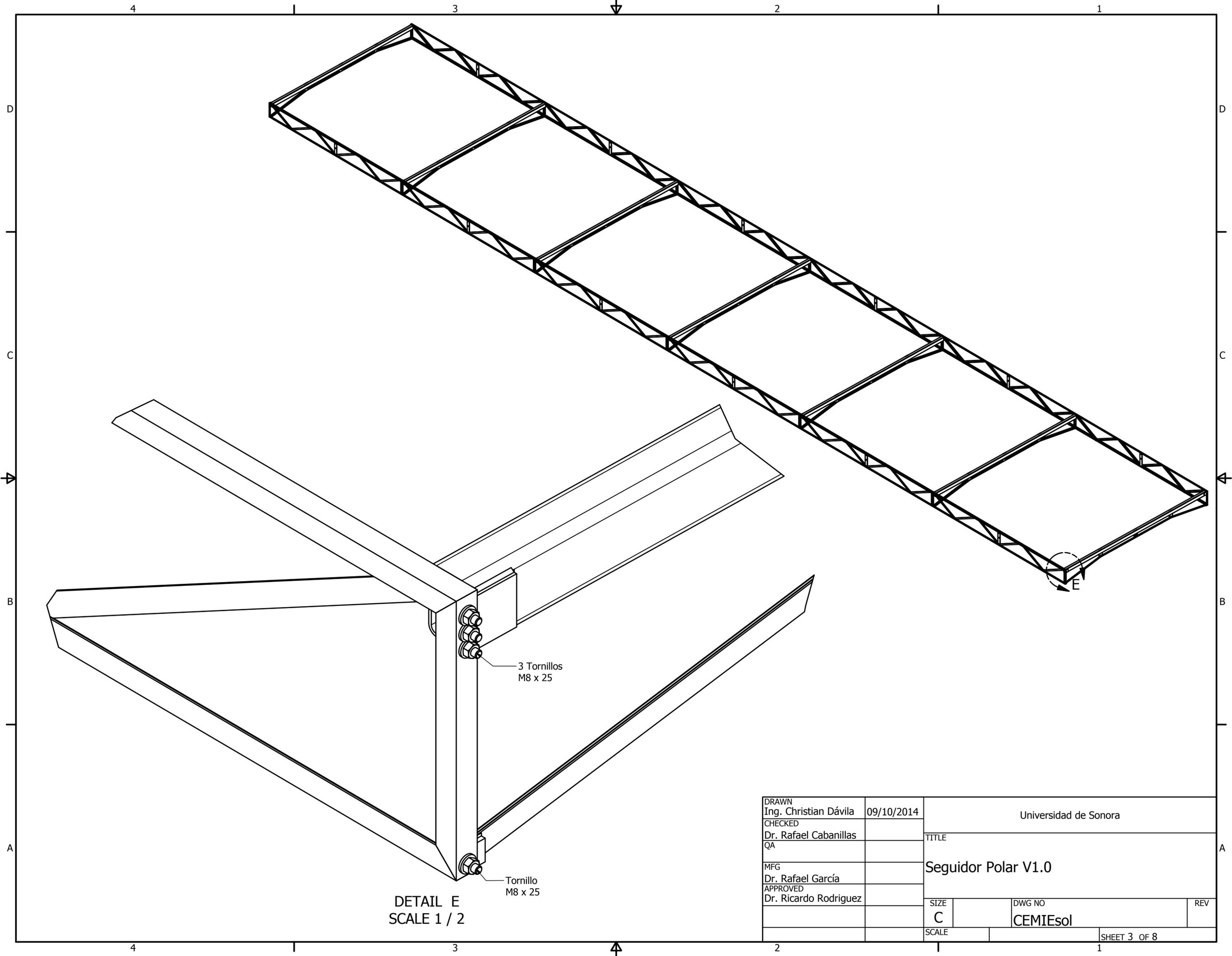


DETAIL D
SCALE 1 / 2



DETAIL U
SCALE 1 / 2

DRAWN Ing. Christian Dávila	09/10/2014	Universidad de Sonora		
CHECKED Dr. Rafael Cabanillas		TITLE		
QA		Seguidor Polar V1.0		
MFG Dr. Rafael García		SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV
APPROVED Dr. Ricardo Rodriguez		SCALE	SHEET 2 OF 8	

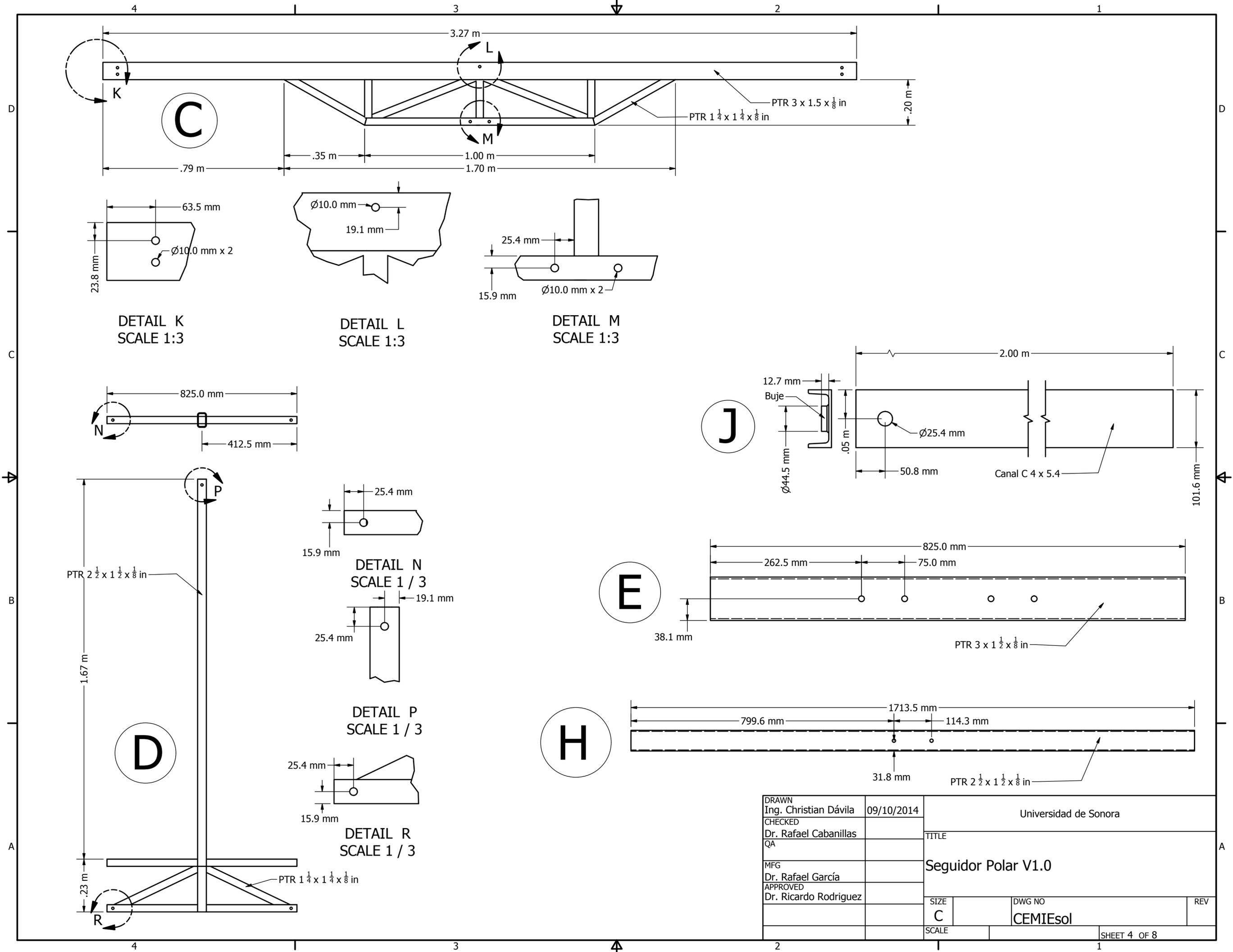


DRAWN Ing. Christian Dávila	09/10/2014	Universidad de Sonora		
CHECKED Dr. Rafael Cabanillas		TITLE		
QA		Seguidor Polar V1.0		
MFG Dr. Rafael García		SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV
APPROVED Dr. Ricardo Rodriguez		SCALE	SHEET 3 OF 8	

DETAIL E
SCALE 1 / 2

3 Tornillos
M8 x 25

Tornillo
M8 x 25



DETAIL K
SCALE 1:3

DETAIL L
SCALE 1:3

DETAIL M
SCALE 1:3

DETAIL N
SCALE 1 / 3

DETAIL P
SCALE 1 / 3

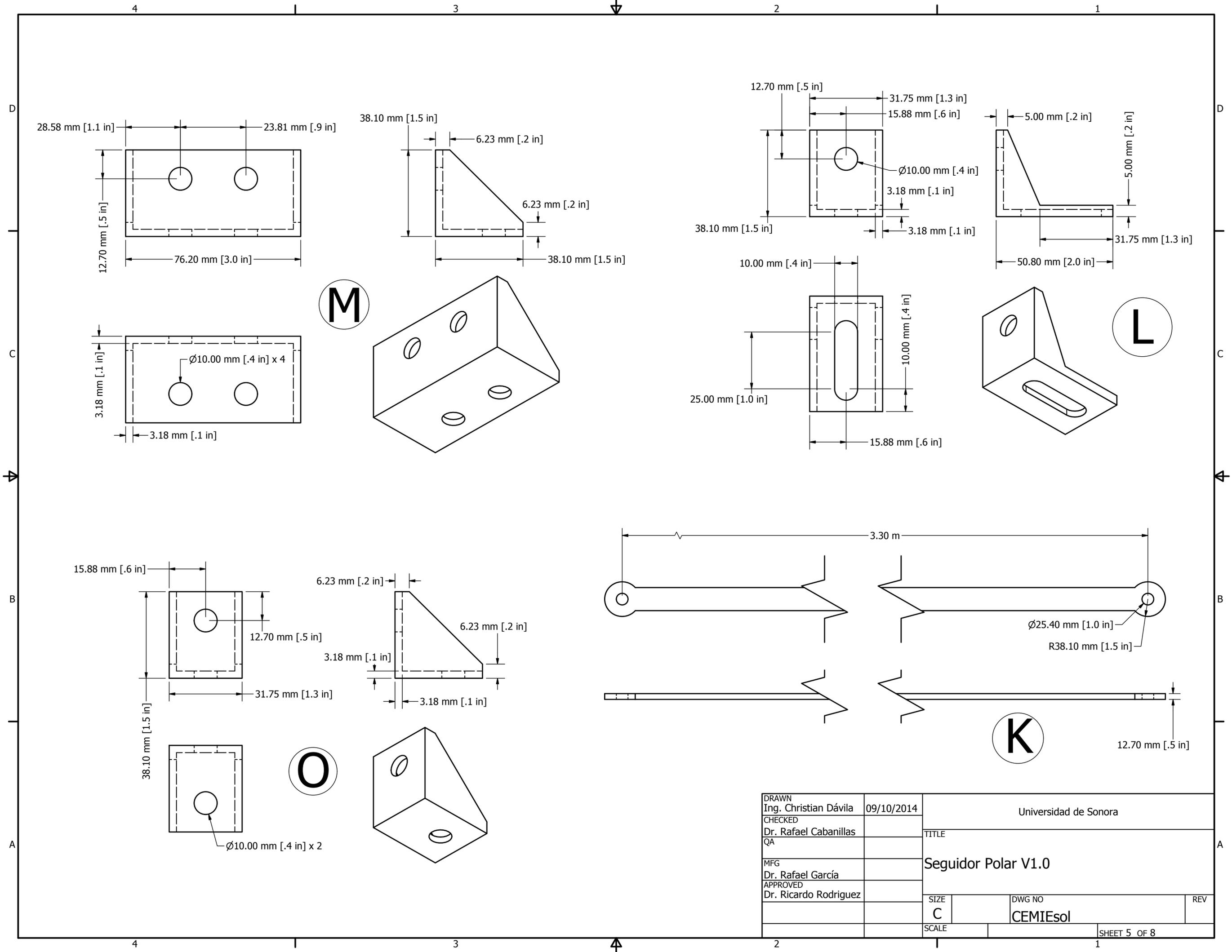
DETAIL R
SCALE 1 / 3

E

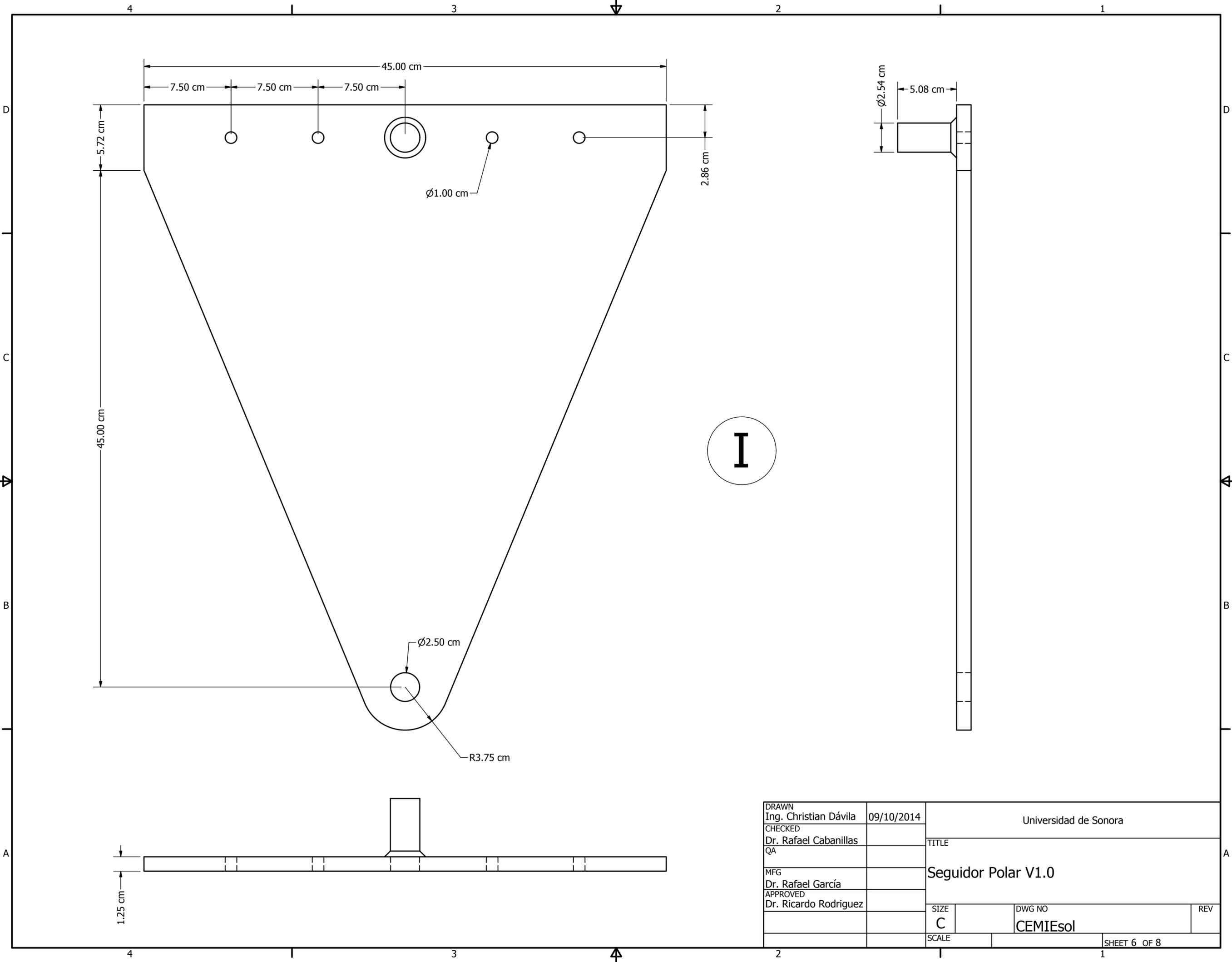
H

J

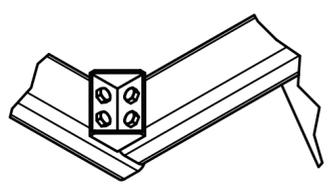
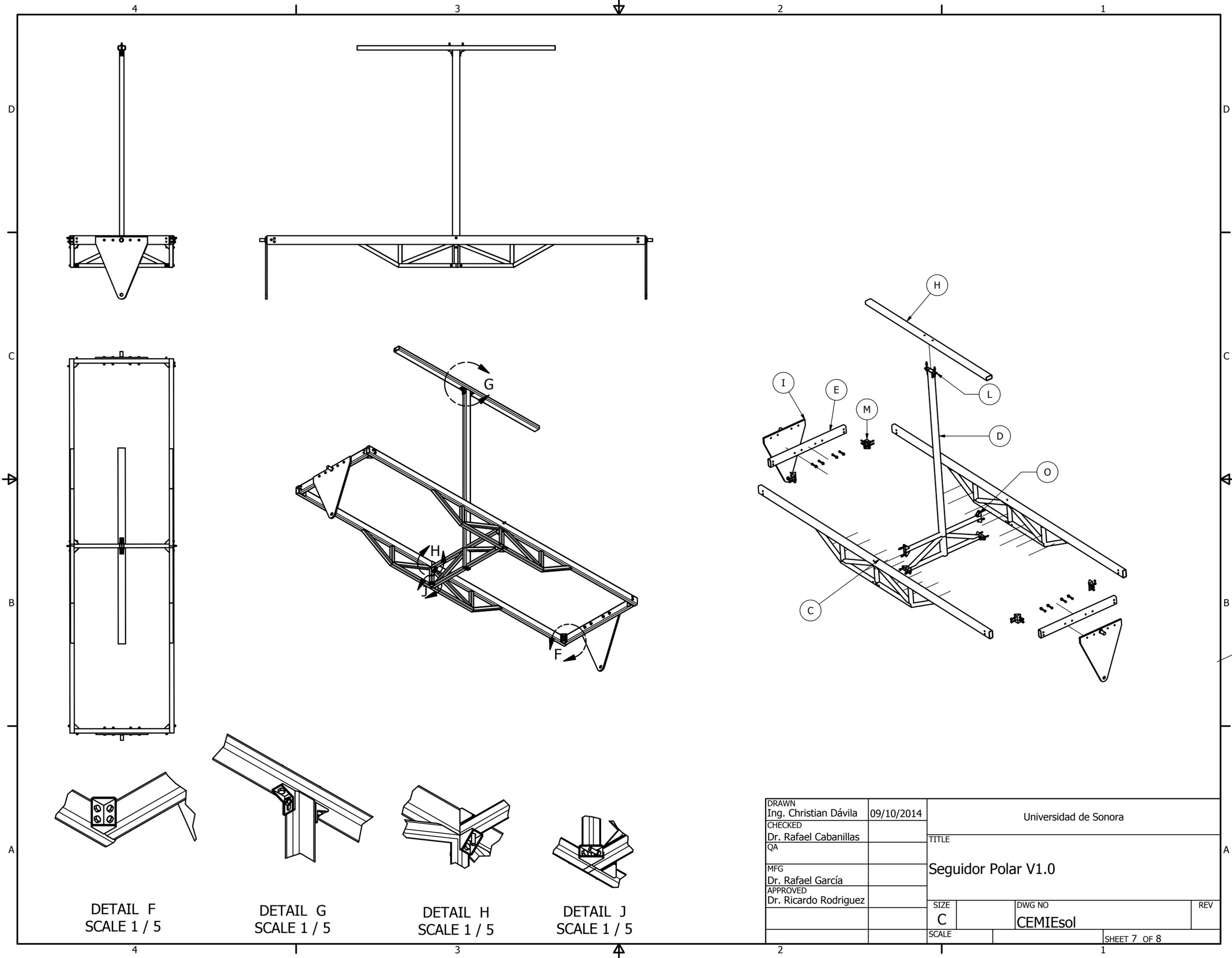
DRAWN Ing. Christian Dávila	09/10/2014	Universidad de Sonora		
CHECKED Dr. Rafael Cabanillas		TITLE		
QA		Seguidor Polar V1.0		
MFG Dr. Rafael García		SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV
APPROVED Dr. Ricardo Rodriguez		SCALE	SHEET 4 OF 8	



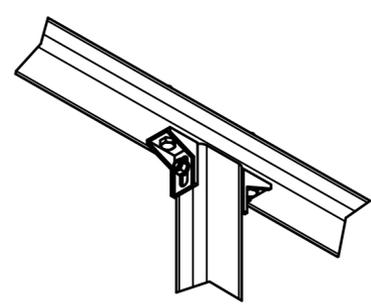
DRAWN Ing. Christian Dávila	09/10/2014	Universidad de Sonora		
CHECKED Dr. Rafael Cabanillas		TITLE		
QA		Seguidor Polar V1.0		
MFG Dr. Rafael García		SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV
APPROVED Dr. Ricardo Rodriguez		SCALE	SHEET 5 OF 8	



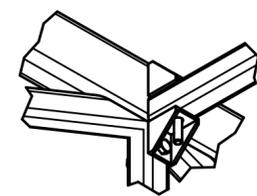
DRAWN Ing. Christian Dávila	09/10/2014	Universidad de Sonora		
CHECKED Dr. Rafael Cabanillas		TITLE		
QA		Seguidor Polar V1.0		
MFG Dr. Rafael García		SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV
APPROVED Dr. Ricardo Rodriguez		SCALE	SHEET 6 OF 8	



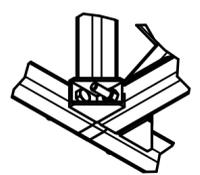
DETAIL F
SCALE 1 / 5



DETAIL G
SCALE 1 / 5

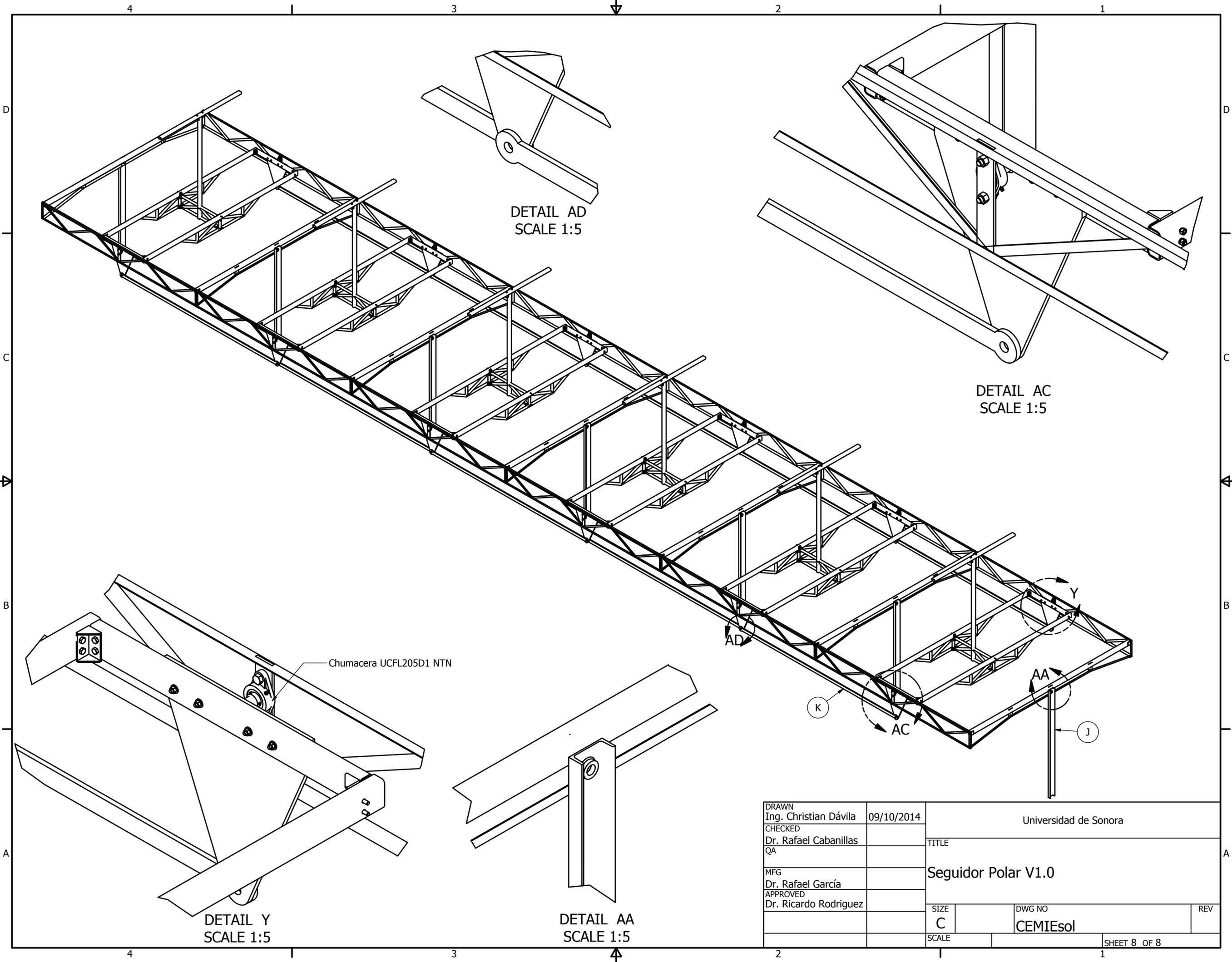


DETAIL H
SCALE 1 / 5



DETAIL J
SCALE 1 / 5

DRAWN Ing. Christian Dávila	09/10/2014	Universidad de Sonora		
CHECKED Dr. Rafael Cabanillas		TITLE		
QA		Seguidor Polar V1.0		
MFG Dr. Rafael García		SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV
APPROVED Dr. Ricardo Rodriguez		SCALE	SHEET 7 OF 8	



DETAIL AD
SCALE 1:5

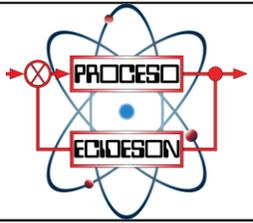
DETAIL AC
SCALE 1:5

Chumacera UCFL205D1 NTN

DETAIL Y
SCALE 1:5

DETAIL AA
SCALE 1:5

DRAWN Ing. Christian Dávila CHECKED Dr. Rafael Cabanillas QA	09/10/2014	Universidad de Sonora		
MFG Dr. Rafael García APPROVED Dr. Ricardo Rodríguez		TITLE Seguidor Polar V1.0		
	SIZE C	DWG NO CEMIEsol	REV	
	SCALE	SHEET 8 OF 8		



ELECTRO-CONTROL INDUSTRIAL DE SONORA, S.A. DE C.V.

TITULO:

Diagrama de conexiones seguidor solar, PLC siemens S7 1200

ACOTACION
S/ACOT.

ESCALA
S/ESC.

HOJA NUM.

