



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROTOTIPO DE HELIÓSTATO PARA  
PLANTA TERMOSOLAR DE CONCENTRACIÓN (CSP) A PEQUEÑA ESCALA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

NICOLÁS ALEXANDER PATRICKSON BÓRQUEZ

PROFESOR GUÍA:  
JAVIER LARRONDO PIÑA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANDRÉS BOSCH MITJANS  
JOSÉ CARDEMIL IGLESIAS

Este trabajo ha sido financiado por la empresa Enerbosch S.A.

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
Mecánico  
POR: Nicolás Alexander Patrickson Bórquez  
FECHA: 26/06/2019  
PROFESOR GUÍA: Javier Larrondo Piña

## **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROTOTIPO DE HELIÓSTATO PARA PLANTA TERMOSOLAR DE CONCENTRACIÓN (CSP) A PEQUEÑA ESCALA**

El desarrollo de energías renovables ha sido un punto fuerte de investigación y desarrollo en diversas partes del mundo, ya que se hace necesario buscar fuentes de energía alternativas para disminuir la contaminación y la huella de carbono. Chile en particular es un lugar idóneo para el desarrollo de la energía solar, ya que el norte de nuestro país posee uno de los niveles de radiación más altos del mundo, lo cual sumado a la motivación de la Agenda de Energía del 2014 hace que la tecnología de Concentración Solar de Potencia (CSP) sea ideal para su implementación en nuestro país. Una central CSP de torre central consiste básicamente en un campo de espejos móviles (helióstatos) que reflejan la radiación solar sobre una torre central dentro de la cual circula un fluido caloportador, que absorbe esta energía para luego transformarla en energía eléctrica mediante un sistema turbina-generator.

Sin embargo, el alto costo de inversión en este tipo de plantas, sumado con la complejidad ingenieril que conlleva resulta en un gran obstáculo para su desarrollo: el proyecto CSP de Cerro Dominador en la Región de Atacama se reanudó hace unos meses después de estar 3 años sin avances debido a falta de financiamiento. A raíz de esto es que nace el Proyecto SolarBosch, el cual busca llevar esta tecnología CSP a una pequeña escala, disminuyendo las dificultades de construcción y la inversión inicial necesaria. En su primera etapa prototipo busca acoplar un sistema CSP de alrededor de 10 helióstatos a una planta de galvanizado, calentando aire y entregándolo al proceso correspondiente.

En particular, el objetivo principal de esta memoria de título es el diseño, construcción y análisis de los primeros prototipos de helióstato que formarán esta planta, tomando en consideración los requerimientos necesarios para su funcionamiento y durabilidad. Se puso énfasis en la investigación y análisis de las soluciones que se encuentran actualmente en diversas plantas del mundo, los cuales dieron los lineamientos principales para el desarrollo de un diseño preliminar del helióstato. Se tomaron consideraciones sobre el espejo, la estructura principal y el sistema de movimiento a seleccionar para el primer prototipo.

Finalmente se decidió diseñar un helióstato con un sistema de movimiento basado en rieles, cadenas y piñones con dos grados de libertad. Se realizaron los cálculos necesarios para que la estructura resista ráfagas de viento y sea capaz de moverse con el uso de motores stepper. Este primer prototipo fue construido y validado en las instalaciones del Taller de Molina del DIMEC. Posteriormente, luego de pruebas de funcionamiento y análisis en terreno, se tomaron conclusiones para el diseño y fabricación externalizada de un segundo prototipo mejorado. Sin embargo, los costos en esta etapa de prototipado son muy altos, por lo que se ahondará en un análisis de procesos de manufactura y ensamblaje (metodología DFMA) para estimar y disminuir costos en el campo heliostático, ya que pueden llegar a representar el 40% de la inversión inicial en este tipo de plantas. En particular, se quiere reducir costos a menos de 100USD por metro cuadrado de espejo, costos que se vieron doblados por el segundo prototipo, por lo que se propondrán estrategias de diseño y procesos de manufactura apuntando a la fabricación de helióstatos en grandes cantidades.

## **Dedicatoria**

Es para mí una gran satisfacción estar al fin escribiendo estas palabras, el cierre de una etapa extensa (más de lo que me hubiera gustado) pero muy gratificante y llenadora finalmente por las personas que forman parte de ella más allá del resultado académico.

Es por esto por lo que quiero dedicar este trabajo principalmente a mi familia y pareja, por su amor, paciencia y ayuda a lo largo de todo el proceso. A mis padres Jorge y Mónica por su apoyo y comprensión, estaré eternamente agradecido y espero estar a la altura de lo que ustedes esperan de mí como hijo, persona y como profesional. A mi hermana Paula por el apañe constante, a la Mami Lety por ser la mejor abuela comando y a mi polola Cinthya por traerme la estabilidad y amor en el momento preciso.

A pesar de lo difícil y agotador que fue el camino, me siento contento con lo logrado, me llevo los mejores recuerdos y los mejores amigos de la facultad que ha sido como una casa para mí durante los últimos 10 años.

## **Agradecimientos**

Quiero partir agradeciendo nuevamente a mi familia más cercana (papá, mamá, hermana, polola), ya quedó más que claro que sin su apoyo este camino habría sido (aún más) difícil. Los amo mucho y sé que ustedes también a mí.

A mis amigos del colegio, los de la Escuela de Verano y los de la Sección 7 que son los de más antigüedad y aún acompañan. También a la ZnD y a La Pasta por las horas de ocio vitales para la sobrevivencia universitaria. A la FAE, al Martes Mágico y al Directorio, porque sin su cariño y SaSá esto no se hubiera logrado. Puedo decir que en este grupo es donde he conocido a mis mejores amigos y espero que se mantenga así por mucho tiempo.

También a la facultad, sus espacios (sobre todo a las terrazas) y a los grupos organizados que fueron parte importante de mi formación. Pedalea!Beauchef, el Eolian y a la UPPM donde aprendí mucho de trabajo en equipo y amar lo que haces.

También agradecer a toda la gente que es parte del DIMEC, por los buenos años de asados y paseos. También a todos los funcionarios que involucra el departamento (y a la facultad en general), en especial a los del Taller de Molina por los años de aprendizaje, paciencia y buena onda.

Finalmente quiero agradecer a Enerbosch por darme la oportunidad de desarrollar un tema de memoria innovador y a mis profesores de comisión por la dedicación a lo largo del proceso.

Es para mí un honor formar parte de esta comunidad, estudiando la carrera que siempre quise en la facultad que siempre quise. Por todo esto es que me siento privilegiado y agradecido por el camino recorrido y las personas que este trajo, a las cuales no les deseo más que felicidad en el futuro.

## Tabla de Contenido

1.- Introducción .....	1
2.- Objetivos y Alcances.....	3
3.- Antecedentes y Discusión Bibliográfica .....	4
3.1.- ¿Cómo funciona la tecnología CSP?.....	4
3.2.- Campo Heliostático .....	7
3.3.- Estado del Arte .....	7
3.3.1.- Base y pilar principal.....	7
3.3.2.- Espejo Reflector .....	8
3.3.3.- Sistema de transmisión de movimiento.....	9
3.3.4.- Protecciones contra viento .....	11
3.4.- Prediseño Conceptual Helióstato .....	11
3.4.1.- Estructura principal .....	11
3.4.2.- Sistema de movimiento .....	13
3.4.3.- Requerimientos Helióstato .....	14
3.5.- Estudio del proceso de diseño .....	15
3.5.1.- Análisis DFA.....	18
3.5.2.- Análisis DFM .....	21
4.- Metodología de Trabajo .....	23
5.- Resultados .....	24
5.1.- Prototipo 1.0.....	24
5.1.1.- Cálculos Generales Prototipo 1.0.....	24
5.1.2.- Diseño CAD Prototipo 1.0 .....	25
5.1.3.- Fase de Construcción Prototipo 1.0 .....	28
5.1.4.- Pruebas de funcionamiento Prototipo 1.0 .....	29
5.1.5.- Hallazgos Prototipo 1.0.....	34
5.1.6.- Análisis DFA Prototipo 1.0.....	35
5.1.7.- Recomendaciones de mejora Prototipo 1.0.....	35
5.2.- Prototipo 2.0.....	36
5.2.1.- Cálculos generales Prototipo 2.0.....	36
5.2.2.- Diseño CAD Prototipo 2.0 .....	37
5.2.3.- Fase de construcción Prototipo 2.0 .....	39
5.2.4.- Pruebas de funcionamiento Prototipo 2.0 .....	42
5.2.5.- Hallazgos Prototipo 2.0.....	43
5.2.6.- Análisis DFA Prototipo 2.0.....	44

5.2.7.- Análisis DFM Prototipo 2.0 .....	45
5.2.8.- Recomendaciones de mejora Prototipo 2.0 .....	47
6.- Conclusiones y recomendaciones finales .....	49
7.- Bibliografía .....	52
Anexos .....	54

## **1.- Introducción**

Uno de los principales desafíos del país según la Agenda de Energía (2014) es disponer de energía confiable, sustentable, inclusiva y a precios razonables. En los últimos años, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) han crecido sustancialmente en línea con este desafío. El año 2017 la potencia instalada de todas las centrales ERNC sumaban 4.237[MW] - representando el 18,8% del total del país [1] - principalmente debido al crecimiento en el desarrollo de plantas eólicas y Solares Fotovoltaicas (PV) con 1.305[MW] y 1.781[MW] de potencia instalada respectivamente. Por otro lado, la energía generada durante enero y octubre del mismo año por las centrales ERNC se reduce a un 12,6% del total generado, equivalente a 9.208[GWh] [2]. Esta diferencia entre potencia instalada y energía generada se explica por un bajo factor de planta de estas tecnologías, 25% para las PV y 32% para las eólicas; esto a su vez se debe a que estas fuentes renovables son formas “eventuales” de producir energía y solo pueden generar cuando el recurso primario está disponible, ya sea viento o sol. También tenemos centrales hidroeléctricas de embalse, las cuales cuentan con altos factores de disponibilidad y razonable independencia del recurso primario inmediato (caudal del río) y son consideradas una fuente limpia de energía. No obstante, su desarrollo futuro está acotado por la disponibilidad limitada de sitios idóneos para su realización y la factibilidad técnica y socioambiental de desarrollar embalses en Chile en el futuro.

Dado lo anterior, es claro que el país enfrenta el desafío de desarrollar soluciones tecnológicas innovadoras para la generación de energía limpia, confiable y factible con miras a obtener energía 100% sustentable en el futuro y viabilizando la posibilidad de cerrar todas las centrales de carbón al año 2050 como se lo ha propuesto Chile [3]. Además, el mercado energético chileno proyecta un crecimiento sostenido de la demanda eléctrica para los próximos años [4], pudiendo duplicarse al año 2028. Esto implica que aproximadamente 15.000[MW] de potencia (con alto factor de planta) deberán ser instalados en la siguiente década, abriendo un importante espacio para nuevos actores y tecnologías.

En este contexto, la tecnología CSP de torre con almacenamiento, capaz de generar energía eléctrica limpia y sustentable, con alto factor de planta, fiabilidad y con un impacto socioambiental positivo, parece ser parte clave de la respuesta al desafío energético de Chile. Esta tecnología consiste en un grupo de espejos móviles (helióstatos) que reflejan la radiación solar sobre un punto en lo alto de una torre (llamado receptor volumétrico). Este receptor toma esta energía transfiriéndola a un fluido caloportador que pasa por las tuberías de este receptor. Luego este fluido puede utilizarse para procesos industriales directamente o integrarlo a un ciclo de vapor clásico. Por lo general la magnitud de este tipo de plantas es muy grande, teniendo torres de más de 200 metros de altura y campos de helióstatos que superan los miles de unidades.

Actualmente, este tipo de tecnología está tomando lugar en nuestro país con el proyecto de Cerro Dominador en la Región de Atacama: una torre receptora de más de 200 metros rodeada de más de 10000 helióstatos con espejos del orden de los 100[m<sup>2</sup>], que generarán una potencia de 210[MW], 100 de CSP y 110 de paneles fotovoltaicos. A pesar de que el momento parece ideal para investigar y desarrollar este tipo de tecnología, aún los costos asociados son muy elevados para su masificación. Es por esto, que el proyecto SolarBosch busca reducir la escala de esta tecnología, posicionándola como una fuente de energía altamente atractiva en el contexto actual del mercado eléctrico y evitando la problemática financiera y de construcción asociada a la gran escala de los proyectos actuales que no han logrado consolidarse en nuestro mercado. En su primera etapa, contempla el desarrollo del diseño, construcción y validación de un prototipo de la planta

CSP de 100[kWe], que utilizará aire como fluido calotransportador y estará acoplado de manera directa a un proceso industrial de galvanizado de piezas mecánicas. El éxito de la primera etapa dará continuidad a la segunda etapa del proyecto, cuyo objetivo será - a partir del prototipo - el desarrollo de una planta comercial CSP de torre con almacenamiento, PMGD y en una escala óptima tal que maximice la rentabilidad del proyecto en el mercado chileno correspondiente.

Sin embargo, aunque no lo parezca los helióstatos juegan un papel muy importante en los costos de este tipo de plantas. Dentro de una CSP el campo heliostático puede llegar a representar el 40% de la inversión inicial de la planta, por lo que es muy importante estimar y disminuir costos dentro de este ítem, lo cual puede ser clave para la viabilidad del proyecto. En particular, actualmente los helióstatos comerciales tienen costos que se mueven entre los 100 a 150 dólares americanos por metro cuadrado de espejo.

A partir de esto es que surge la necesidad de diseñar un helióstato que cumpla con los requerimientos de uso y operación de una planta CSP, pero que por otro lado sea barato y fácil de manufacturar e implementar. Por ello, es que el objetivo principal de este trabajo de título está en el diseño y construcción de un prototipo de helióstato que se adecúe a las necesidades y lineamientos del proyecto SolarBosch. Por ello es por lo que además del diseño y construcción de estos helióstatos es que se hace necesario analizar estos diseños desde los procesos de manufactura y la dificultad de ensamblaje, siempre apuntando a la futura fabricación de cientos o miles de unidades. A pesar de que para ese momento aún falta tiempo, es interesante hacer el ejercicio y proponer diseños simples o sugerencias de procesos que podrían llegar a utilizarse para una construcción en serie y en grandes números de piezas, ya que claramente en la primera etapa de prototipos es muy difícil disminuir costos y llegar al objetivo que se quiere de 100 dólares americanos por metro cuadrado de espejo.

Por eso, luego del diseño y construcción de un primer prototipo para validar el sistema de movimiento y el código de seguimiento y funcionamiento de motores inicial, se diseñará un segundo prototipo tomando en cuenta el análisis completo de diseño realizado al primero. La construcción de este se externaliza ya que se requiere mayor precisión y control en la manufactura y ensamblaje de piezas. Paralelamente a las pruebas a ambos prototipos, se hace un análisis siguiendo los lineamientos de la metodología DFMA para determinar los procesos o piezas que tienen un mayor costo en la manufacturación de estos prototipos, lo cual nos ayudará a guiarnos de cara a futuros diseños y tomar decisiones para lograr un producto final a un costo competitivo para el mercado energético. Finalmente se harán recomendaciones de diseño y de procesos para los futuros prototipos a diseñar por la empresa Enerbosch, de cara a la fabricación en grandes números y futuro funcionamiento de una planta básica de 100[kWe] con 300 helióstatos de no más de 7[m<sup>2</sup>].



## **2.- Objetivos y Alcances**

### **Objetivo General:**

Diseño y construcción de 2 prototipos de heliostato con sistema de movimiento en 2 ejes con uso de rieles, cadenas y piñones, y posterior análisis para estimar y disminuir costos asociados a la manufactura y ensamblaje a gran escala.

### **Objetivos Específicos:**

- Diseño y construcción de prototipo para pruebas iniciales, para la validación de sistema de transmisión con rieles, cadena y piñón. Sus medidas principales serán: base de 1 metro de diámetro, altura de 2 metros y marco para espejo de  $1,5[m^2]$ .
- Pruebas y análisis de funcionamiento del Prototipo 1.0; se identifican problemas de construcción y realizan recomendaciones de diseño de cara al Prototipo 2.0, cuya construcción es externalizada. Se agregará caja reductora a la transmisión y se diseñará para un espejo de casi  $7[m^2]$ .
- Se realizará un análisis DFMA (Design for Manufacture and Assembly) al Prototipo 2.0; se analizarán las mejoras de diseño y costos de manufactura y ensamblaje, con lo cual se harán recomendaciones de diseño de piezas para un futuro prototipo de heliostato, que cumpla con un objetivo de costos de 100 dólares americanos por metro cuadrado de espejo.

Los alcances abarcan el diseño mecánico y construcción de los 2 prototipos mencionados, uno durante el primer semestre del 2018 y el otro durante el segundo. Se abarcarán temas de diseño y cálculo de piezas mecánicas para las cargas de viento involucradas como ejes, rodamientos y piñones. Además, el análisis DFMA dará lineamientos de diseño para la fabricación en grandes cantidades del heliostato.

### **3.- Antecedentes y Discusión Bibliográfica**

Como se dijo anteriormente, la Agenda de Energía del 2014 da al país y al Gobierno un importante desafío, la eliminación de las centrales de carbón conlleva la necesidad de agregar 15000[MW] al sistema en los próximos 15 años. La alta radiación presente en nuestro país nos hace un lugar idóneo para el desarrollo de las tecnologías solares, en particular para la tecnología CSP, solo que al ser una tecnología relativamente reciente es de un elevado costo y de alta dificultad tecnológica. Por esto es por lo que el desarrollo y estudio de esta tecnología en nuestro país es positivo para el objetivo de ser un país con energía limpia y sustentable en el futuro.

#### **3.1.- ¿Cómo funciona la tecnología CSP?**

La energía termosolar de concentración (CSP – Concentrated Solar Power) utiliza espejos o lentes para concentrar la radiación solar sobre una pequeña superficie. Luego esta energía es transferida a algún tipo de fluido el cual se utiliza para alimentar un ciclo de vapor clásico (turbina-generador) y generar energía eléctrica. El punto más fuerte de esta tecnología es la capacidad que tiene para almacenar el fluido de trabajo y utilizarlo para generar energía eléctrica en horarios donde no hay radiación solar. Existen diversos tipos de tecnología CSP, las cuales varían según la forma de concentrar y almacenar energía [5]:

- Concentrador Parabólico Compuesto (CPC): Como su nombre lo dice consiste en un reflector parabólico lineal que concentra la radiación en un tubo receptor (por el cual circula el fluido de trabajo) que se encuentra posicionado a lo largo de su foco, trabajando en un solo eje. Es una de las tecnologías CSP más desarrolladas.



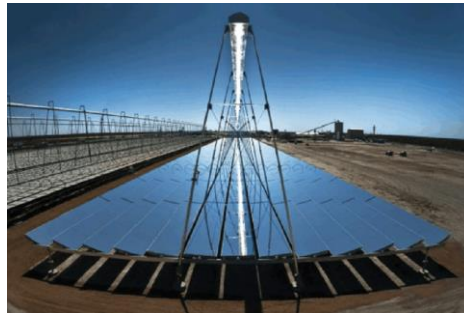
**Figura 1:** Concentrador de cilindro parabólico. Fuente: US Energy Department.

- Disco parabólico o disco Stirling: Es un sistema de motor de disco con un reflector parabólico único a diferencia del anterior, concentrando la radiación en un receptor en el punto focal del reflector, siguiendo al sol en 2 ejes. El nombre proviene del motor Stirling que es utilizado para generar electricidad.



**Figura 2:** Disco Stirling. Fuente: US Energy Department.

- Colectores lineales Fresnel (CLF): Consiste en numerosas placas de espejos planos que concentran la radiación sobre tubos por los cuales circula el líquido de trabajo.



**Figura 3:** Colector lineal Fresnel. Fuente: US Energy Department.

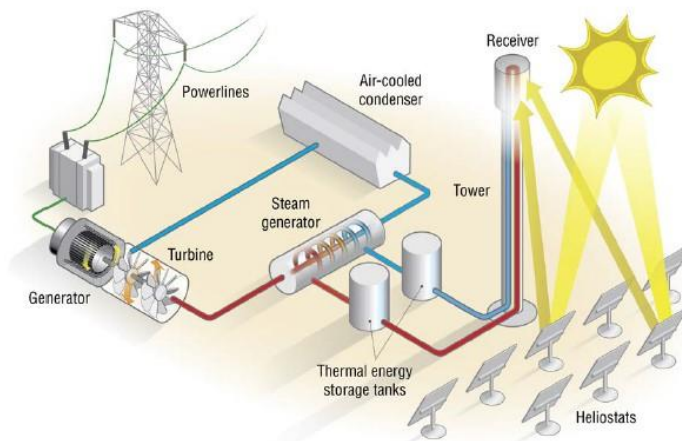
- Torre de receptor central: Un conjunto de reflectores independientes (llamados heliostatos, con movimiento en 2 ejes) concentran la radiación sobre un punto en lo alto de una torre central dentro del cual circula el fluido de trabajo. Aunque es una tecnología menos desarrollada que los sistemas cilíndricos y parabólicos, la torre central ofrece una mayor eficiencia y una mejor capacidad de almacenamiento de energía.



**Figura 4:** Modelo de planta de CSP de torre con sales fundidas. Fuente: SolarReserve

En particular para el proyecto SolarBosch se decidió estudiar e investigar sobre la tecnología CSP, ya que al trabajar a mayor temperatura tiene una eficiencia mucho mayor en su funcionamiento. La primera generación de este tipo de centrales data desde aproximadamente 30 años. Éstas operaban generando vapor saturado (PS10, PS20) sin sistema de almacenamiento

considerable. La segunda generación de estas centrales evolucionó a plantas que utilizan "sales fundidas", una mezcla de nitrato de sodio y nitrato de potasio como fluido calotransportador, permitiendo almacenar directamente el calor en estas sales en estanques aislados térmicamente durante ventanas de tiempo del orden de horas (Gemasolar, Crescent Dunes). La utilización de sales fundidas ofrece alta estabilidad en la operación y se estableció como un estándar en la industria CSP. Esta configuración permite operar a temperaturas de hasta 570[°C], facilitando la integración directa al sistema de almacenamiento térmico y al ciclo de potencia. No obstante, las sales fundidas presentan límites de operación establecidos por condiciones físicas del material. El límite inferior es dado por el punto de solidificación de las sales (290[°C]), mientras que el límite superior se encuentra a los 570[°C], por sobre donde se observan problemas de estabilidad química. La Figura 5 muestra un esquema básico del funcionamiento de este tipo de plantas.



**Figura 5:** Esquema de funcionamiento planta CSP torre central. Fuente: US Energy Department.

Este tipo de CSP de torre, ha crecido sustancialmente en los últimos 10 años y existen plantas comerciales operando en países como España, Marruecos y Estados Unidos. En Chile el proyecto de torre con sales fundidas, Cerro Dominador de la empresa Abengoa, está en etapa de construcción. Sin embargo, el uso de sales fundidas como fluido calotransportador trae consigo complicaciones asociadas a la durabilidad de los tanques de almacenamiento y la necesidad de mantener las sales siempre en estado líquido. Esto último implica altos costos de mantenimiento, lo cual, sumado a los altos costos unitarios de inversión, entre otros factores, ha implicado que los proyectos de CSP de torre se hayan desarrollado a gran escala, por sobre los 50[MW] de potencia. En la década del 90', se propuso la idea de utilizar aire como fluido calotransportador en torres CSP acoplando la torre con ciclos de otros gases a altas temperaturas [6]. El aire presenta propiedades interesantes para ser implementado en este tipo de tecnologías, como lo son la no toxicidad, el bajo costo, su alta disponibilidad, el bajo impacto ambiental y que además es estable a altas temperaturas (800 – 1200[°C]).

Este último punto es una excelente característica para implementar ciclos más eficientes desde un punto de vista termodinámico, haciendo posible alcanzar eficiencias térmicas superiores a un 75% [6]. Adicionalmente, el uso del aire permitiría utilizar un sistema de almacenamiento más económico que los estanques de sales fundidas, como el almacenamiento de calor latente en roca. Esta combinación presenta un fuerte potencial de reducción de costos de inversión y operación, lo que permitiría reducir la escala mínima rentable de este tipo de proyectos.

Actualmente existen dos plantas CSP de torre que utilizan aire como fluido, estas son; la torre solar de Jülich en Alemania de 1,5[MWe] y la planta de Daegu en Corea del Sur de 200[kWe] desarrolladas en sitios con una radiación normal o DNI (por sus siglas en inglés) igual a 902[kW·h/m<sup>2</sup>·año] [7] y 803[kW·h/m<sup>2</sup>·año] respectivamente. La DNI en Santiago, en cambio, es aproximadamente 3 veces mayor con 2.300[kW·h/m<sup>2</sup>·año] mientras en Calama este valor alcanza los 3390[kW·h/m<sup>2</sup>·año] [8] convirtiendo a Chile en uno de los países más idóneos para la experimentación y desarrollo comercial de esta tecnología CSP.

De esta manera, el proyecto SolarBosch sería la primera central CSP de torre con aire de carácter comercial tanto en Chile como en el mundo, cuestión factible gracias a las inmejorables condiciones de radiación presentes en nuestro país y al contexto del mercado energético nacional. Debido a las dificultades técnicas y económicas que conlleva el desarrollo de este tipo de centrales, es que el Proyecto SolarBosch busca reducir la escala de esta tecnología, con unos heliostatos de espejos más pequeños y en menor cantidad (300 a 500 heliostatos), además de una torre que no supere los 30 metros de altura, en comparación a centrales comerciales donde la torre puede superar los 200 metros de altura con un campo heliostático de miles de espejos.

### **3.2.- Campo Heliostático**

Como se dijo anteriormente, el campo heliostático de una central CSP de torre central está conformado por múltiples heliostatos. Estos heliostatos son los elementos encargados de reflejar la radiación incidente en la superficie hacia el receptor, empleando para ello un sistema conformado por espejos montados sobre una estructura, que puede cambiar su posición a medida que la posición relativa del sol varía durante el día, para reflejar con exactitud y precisión los rayos del sol sobre el receptor en lo alto de la torre receptora. Debido a la gran cantidad de heliostatos que se utilizan dentro de este tipo de plantas, el costo del campo heliostático puede representar cerca del 40% de los costos de inversión [9], por lo que es relevante contar con un diseño óptimo desde un punto de vista técnico y económico.

Dependiendo del desarrollador y de la escala del proyecto, se utilizan en la industria diversos tipos de heliostatos; Existen empresas que han optado por reducir el número de heliostatos y aumentar el área de reflexión estos, la cual puede superar los 100[m<sup>2</sup>] por heliostato. Otras empresas y desarrollos científicos han optado por utilizar heliostatos con áreas de reflexión pequeñas, de escalas de 10[m<sup>2</sup>] o menores. Además, estos componentes pueden ser calificados según el tipo de estructura sobre el cual van montados, el tipo de espejo utilizado, el o los mecanismos de seguimiento y la curvatura del área reflectora entre otros aspectos constructivos, lo cual ofrece una amplia gama de opciones para el diseño heliostato. En ningún caso este componente puede ser considerado estándar y debe ser pensado especialmente para cada proyecto.

### **3.3.- Estado del Arte**

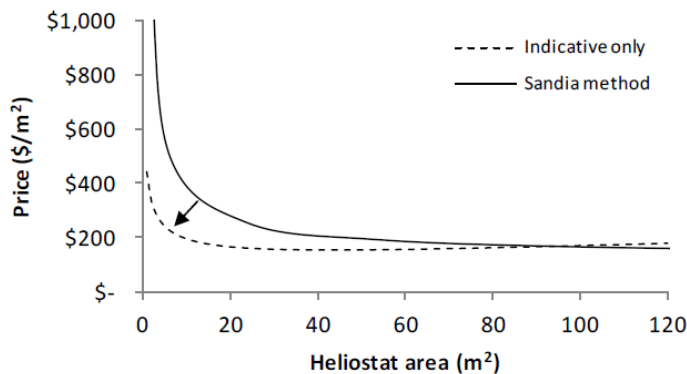
#### **3.3.1.- Base y pilar principal**

Tanto la base como el pilar de un heliostato pueden ser considerados componentes estandarizados, sin embargo, el diseño y elección de estos componentes debe ser cuidadosamente considerado, ya que un problema de diseño implicaría un problema de gran escala, multiplicado por el número de heliostatos del campo pudiendo encarecer notablemente el costo del proyecto. Para el pilar principal se utiliza un perfil acorde al sistema de movimiento escogido (de sección

circular para actuadores hidráulicos y ejes de rotación detrás del espejo y cuadrados para el resto de las aplicaciones). En cuanto a la base sobre la cual se monta el pilar, depende fuertemente del grado de intervención posible en la superficie donde serán instalados los heliostatos: se pueden ocupar bases de hormigón y arena instaladas en el subsuelo, donde se ancla el pilar principal o simplemente diseñar una base con perfiles que logren mantener la estructura en posición sin que se levante, gire o voltee.

### 3.3.2.- Espejo Reflector

Los heliostatos diseñados en los años 80 para los primeros desarrollos CSP de torre fueron optimizados para ser de gran tamaño reduciendo así el número de heliostatos necesario para alcanzar un determinado múltiplo solar. Un estudio realizado el año 2000 por la agencia estadounidense Sandia, compartía esta visión, proponiendo que los heliostatos deberían ser de al menos  $50[m^2]$ , con un óptimo en los  $150[m^2]$ . Esto se midió utilizando un heliostato marca ATS de  $148[m^2]$  como referencia, analizando un dominio de los 53 a los  $214[m^2]$ , midiendo finalmente el costo en dólares por metro cuadrado de espejo. La Figura 6 muestra esta tendencia, con un costo que se eleva drásticamente cuando el heliostato baja de los  $30[m^2]$  (curva continua). Por otro lado, se muestra la tendencia de costos a medida que pasa el tiempo (curva punteada) donde se distingue claramente una tendencia a la baja en los costos del heliostato y de la dimensión mínima para la cual el costo de éste se eleva drásticamente (en torno a  $15[m^2]$ ) [10].



**Figura 6:** Precio de heliostato por metro cuadrado de espejo. Fuente: [10].

Esta disminución tiene su causa en la madurez de la tecnología, sin embargo, existen otros factores relevantes que determinan el costo promedio de un heliostato para un proyecto específico. En particular para el proyecto SolarBosch debe considerarse:

- Volumen de producción: el tamaño reducido de los heliostatos de SolarBosch implica el uso de más heliostatos, lo que implica una reducción de costos por producción en serie de elementos.
- Uso de componentes y procesos maduros comercialmente, más económicos que partes fabricadas especialmente.
- Reducción de costos de logística y transporte debido a componentes más pequeños y livianos.

En la actualidad no existe una única tendencia respecto al tamaño de los heliostatos en el mercado de proyectos CSP de torre. Existen, en cambio, diversas visiones respecto del tamaño óptimo de este componente las cuales varían según empresa u organización. Por esta razón, se

pueden encontrar variados intervalos de tamaño en los heliostatos de los proyectos comerciales actualmente en desarrollo y operación alrededor del mundo: eSolar (1.14-2,2[m<sup>2</sup>]), Brightsource (15,2-19[m<sup>2</sup>]), Pratt&Whitney (62,5[m<sup>2</sup>]), Sener (116[m<sup>2</sup>]) y Abengoa (120-140[m<sup>2</sup>]), esto es también el caso de las plantas CSP de investigación: NREL (6[m<sup>2</sup>]), DLR (8[m<sup>2</sup>]) y CSIRO (4,2[m<sup>2</sup>]).

Por otra parte, el espesor de los espejos utilizados en estos heliostatos es del orden de 3mm (pudiendo variar según fabricante y las dimensiones). La importancia del material electo para el espejo y su espesor radica en que dependiendo en este parámetro se pueden afectar sensiblemente características como la reflectividad base del espejo, peso, durabilidad y propiedades anti-ensuciamiento y anticorrosión del componente. Para esto, los esfuerzos de diseño se centran en la correcta elección de materiales disponibles para este tipo de aplicaciones. Parte de los aspectos más importantes para el diseño de espejos en heliostatos fueron investigados y publicados por la Comisión Europea el 2011 [11], y se listan a continuación:

- Desarrollo de soluciones bajas en plomo, para finalmente llegar a espejo “cero plomo” con una protección anticorrosión muy durable para soportar climas adversos.
- Desarrollo de recubrimientos para disminuir ensuciamiento, la abrasión y la erosión en la superficie del espejo.
- Mejoras para vidrio bajo en hierro, para aumentar reflectividad y reducir pérdidas.
- Desarrollo de testeos mejorados para medir el envejecimiento del vidrio, tomando en cuenta distintas especificaciones para diversas aplicaciones y cargas sobre la estructura.

Los espejos para utilizar en el heliostato del proyecto SolarBosch serán definidos en base a la observación de estos aspectos críticos y considerando tanto la factibilidad y disponibilidad de soluciones y materiales acorde a la escala de este proyecto.

### **3.3.3.- Sistema de transmisión de movimiento**

A diferencia de las innumerables opciones que se pueden encontrar para el caso del tamaño y forma de los heliostatos, el sistema de movimiento de un heliostato es un componente más estandarizado en el mercado. Los sistemas existentes pueden ser calificados en 3 grandes grupos los cuales se diferencian de acuerdo con el tipo de actuadores que utilizan y a los ejes sobre los cuales provocan el movimiento del heliostato:

- Actuadores hidráulicos lineales: El movimiento es realizado por 2 brazos hidráulicos lineales, uno por cada eje del sistema, alargándose y acortándose de acuerdo con la necesidad de movimiento (Figura 7). El sistema gira en ejes de rotación colocados en la estructura de acero que sostiene los espejos. Es el método más sencillo en diseño, pero presenta algunas desventajas como la alta necesidad de mantención del sistema hidráulico y el desafío de realizar un movimiento de seguimiento con variación gradual del ángulo azimutal según la posición del sol (avance no lineal).



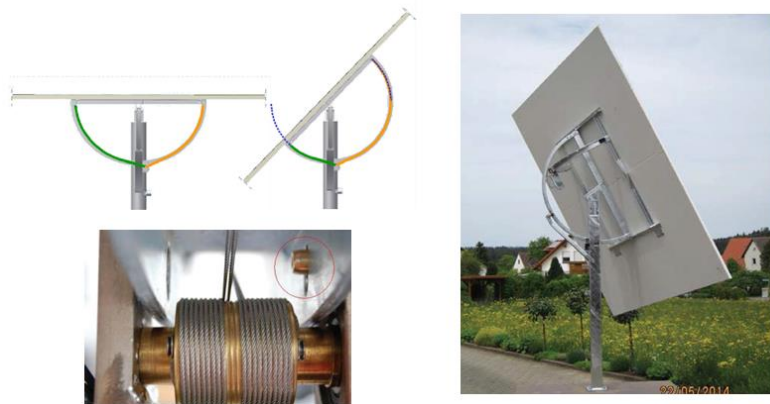
**Figura 7:** Heliostatos en planta experimental de Julich, Alemania. Fuente: Planta Julich.

- Tubo de torque y rotación tras espejo: Este sistema se utiliza principalmente en heliostatos de grandes dimensiones, debido a la gran resistencia mecánica que tiene este tipo de sistema. El movimiento se realiza mediante tubos que giran sobre si mismos a través de su eje principal, con ejes de movimiento con rodamientos en cada tubo (Figura 8). Esto implica un bajo requerimiento en mantención junto con un gran control de movimiento continuo. Sin embargo, es un sistema de alta complejidad en el diseño y, sobre todo, en la construcción y montaje.



**Figura 8:** Heliostatos en planta Torresol, España. Fuente: Torresol Energy.

- Uso de rieles y cables/cadenas: Este sistema es utilizado en heliostatos de baja escala ( $<10[m^2]$ ) y requiere bajos esfuerzos mecánicos para funcionar. Se trata de un sistema simple en diseño y baja complejidad de construcción con bajo costo general. El movimiento lo realiza el enrollado o desenrollado de cables (o cadenas) a través de un riel; un carrete de cable gira gracias a motores eléctricos acoplados al sistema (Figura 9). Este acople puede tener diversos tipos: engranes, piñones, cadenas, sinfín, etc.



**Figura 9:** Heliostatos de Auto-R Project. Fuente: DLR Project.



La elección del sistema de movimiento para el heliostato del proyecto SolarBosch, ponderará los factores de precisión, costo y factibilidad de implementación al heliostato.

### **3.3.4.- Protecciones contra viento**

Uno de los mayores desafíos del campo heliostático es mantener la calibración y posición adecuadas para lograr una reflexión de radiación estable y con alta precisión bajo condiciones atmosféricas cualquiera, siendo en particular el viento un aspecto crítico que afecta fuertemente el posicionamiento. Una campaña de medición de altura y velocidad de viento a la altura del espejo del heliostato es necesaria. Esta información permite modelar correctamente en la etapa de diseño las cargas que deberá soportar la estructura. Con el objetivo de disminuir dichas cargas se pueden implementar 2 soluciones principales:

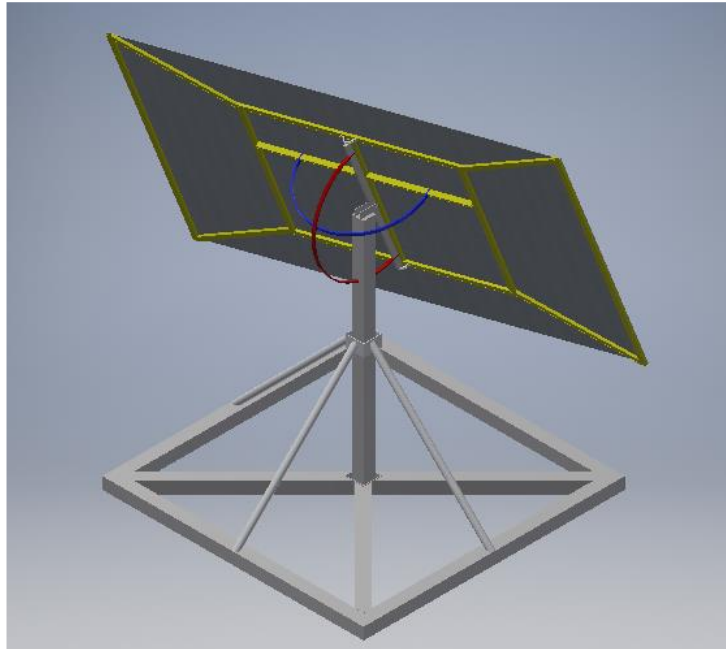
- Protección general de campo heliostático: Se pueden instalar barreras de protección alrededor del campo heliostático [12] [13], la cual permite disminuir cargas en operación y detención. Estas protecciones deben ser de  $\frac{3}{4}$  la altura del heliostato con una porosidad del 40% según se detalla en la literatura.
- Protección en heliostato: Se puede instalar una rejilla de protección en el perímetro del espejo del heliostato, la cual reduce la separación de flujo y los momentos de vuelco en un 40 %. Todo esto puede llegar a permitir una reducción de peso del 30% en el heliostato [14].

Para el proyecto SolarBosch se medirá la velocidad y dirección del viento y se contará con datos reales de perfil de viento antes de establecer la pertinencia del uso de mecanismos de protección de viento y de reducción de cargas.

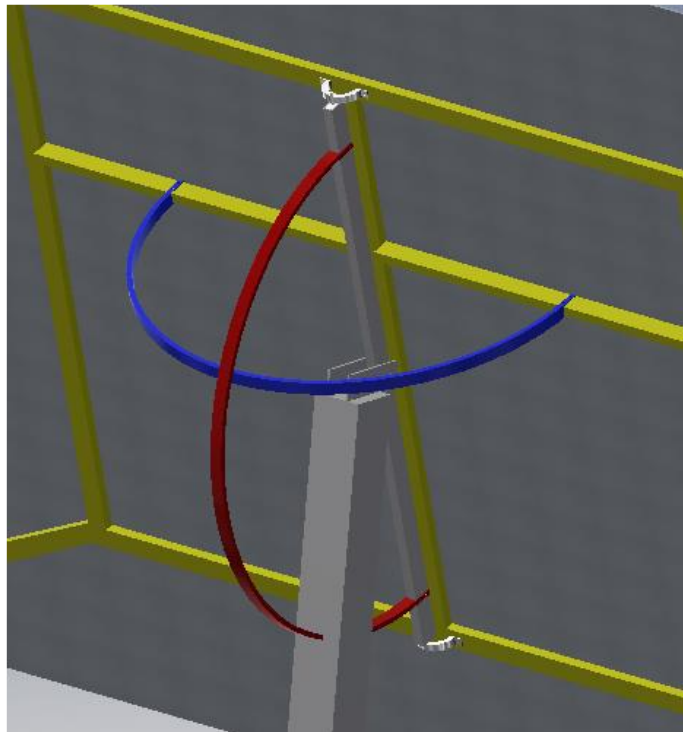
## **3.4.- Prediseño Conceptual Heliostato**

### **3.4.1.- Estructura principal**

A partir de los presentados requerimientos de prediseño, durante la misma Práctica Profesional 3 se desarrolló un diseño inicial del heliostato incluyendo: base, pilar, marco y sistema de movimiento, el cual es utilizado como punto de partida para un diseño óptimo. El mencionado diseño inicial permite analizar y modelar entre otros, las fuerzas involucradas en el movimiento y por consiguiente en el mecanismo de movimiento. Para el desarrollo del mencionado diseño, se utilizó como referencia lo propuesto en [14] y [15], donde se detalla el diseño de un heliostato con rieles y cables de un tamaño similar al cual se desea implementar. El perfil escogido del pilar es cuadrado, con base cuadrada (formada por otros perfiles) y apoyos al centro del pilar. A continuación, se muestran los resultados del diseño inicial junto con el dimensionamiento y estimación inicial de costo de materiales (Figuras 10 y 11, Tabla 1). Este diseño tiene una base de 2[m] de diámetro, con rieles de 1[m] de diámetro, un pilar central de 2[m] de altura y espejo de 9[m<sup>2</sup>].



**Figura 10:** Vista general diseño heliostato simplificado.



**Figura 11:** Detalle sistema de 2 rieles y perfil principal.

Como se puede constatar, el diseño incluye un perfil central que es el que soporta toda la estructura del espejo y su marco. Este perfil rota sobre su centro (descansando en rodamientos en su centro) y está unido al riel principal (en rojo en la Figura 11) que controla lo que desde ahora en adelante llamaremos ángulo o eje de pitch, el cual define el movimiento del espejo hacia arriba y hacia abajo. El perfil central de pivote cuenta con rótulas de rotación en sus extremos para permitir el movimiento en el otro eje, y unido al marco del espejo mueve el riel secundario en azul, el cual

controla lo que llamaremos en ángulo o eje de pitch, el cual define el movimiento del espejo hacia cada uno de sus lados.

En el modelo no se han añadido aún las partes mecánicas y eléctricas asociadas a la transmisión ya que aún no se han definido. Lo que sí se buscó fueron proveedores de espejos, conocer las capacidades industriales de estos, y estudiar las alternativas disponibles hoy en el mercado. En particular se contactaron empresas nacionales dedicadas a la fabricación y comercialización de vidrio y espejos para diversas aplicaciones. De esta investigación, se destaca la existencia y disponibilidad actual de los siguientes dos espejos de la empresa Vidrios Lirquén:

- OptiMirror PLUS, 3mm de espesor, 92% reflectividad, medidas de  $2,5 \times 3,6 [m^2]$ .
- OptiWhite, 4mm de espesor, 94% reflectividad, medidas de  $2,5 \times 3,2 [m^2]$ .

En función de las dimensiones ya disponibles en el mercado, se espera realizar un rediseño del heliostato SolarBosch para adaptarse a estas medidas, conservar su funcionalidad y reducir de esta forma el costo esperado. Además, se solicitó a la empresa proveedora evaluar la fabricación de estos espejos en dos partes, facilitando así el montaje.

**Tabla 1:** Cubicación y costeo prediseño conceptual heliostato SolarBosch. Fuente: Elaboración propia.

ELEMENTO	MEDIDAS [mm]	LARGO TOTAL [mm]	PRECIO x m [CLP]	PRECIO TOTAL [CLP]	PESO x m [kg]	PESO TOTAL [kg]
Perfil Cuadrado	100x100x5	2000	11105	\$ 22.210	14,41	28,82
Perfil Cuadrado	100x100x3	14220	5885	\$ 83.685	8,96	127,41
Perfil Rectang	40x20x2	17065	1136	\$ 19.386	1,68	28,67
Barra Plana	50x5	300	1125	\$ 338	1,96	0,59
Barra Plana	25x10	3200	1171	\$ 3.747	1,96	6,27
Barra redonda	8Ø	80	500	\$ 40	0,40	0,03
Barra redonda	30Ø	500	690	\$ 345	6,22	3,11
Tubo	50,8Ø 2esp	4350	1583	\$ 6.886	2,41	10,48
Plancha	1000x5	3000	19500	\$ 58.500	25,50	76,50
Aluminio	Bloque	200x200x25	-	\$ 44.000		5,00
Cable	6x19 3/4"	7000	5000	\$ 35.000	1,80	12,60
Perneria	Varios			\$ 30.000		2,50
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 304.136</b>	<b>TOTAL</b>	<b>301,99 [kg]</b>

### 3.4.2.- Sistema de movimiento

Luego de estudiar y analizar las distintas opciones de movimiento que se tienen y los requerimientos en motores de acuerdo con los torques necesarios, se decidió utilizar el sistema de rieles y cables para el diseño del heliostato; su bajo costo, baja dificultad de construcción y montaje fueron claves para la determinación. Sin embargo, se consideró una modificación a este sistema: en vez de cable se utilizarán cadenas girando sobre un piñón que reemplazará el rodillo del cable. Este sistema es más confiable, ya que según catálogo un cable de acero genérico de 20mm de diámetro necesita un rodillo con un diámetro 20 veces mayor para no romperse debido a la flexión que sufriría sobre el rodillo. Para mantener un tamaño de rodillo razonable al diseño se debería usar

un cable muy delgado (prácticamente una piola) lo cual es poco confiable para nuestro helióstato en las condiciones a las cuales estará sometido en operación. Finalmente, para el movimiento se optó por un motor stepper acoplado a un sistema “worm gear” (o caja reductora); por un lado, es posible controlar de mejor manera la salida de RPM y torque y por otro lado elimina la necesidad de mantener energizado el motor stepper para su bloqueo, ya que el worm gear es autotrabante debido al roce con que trabaja. Las ventajas y desventajas de este mecanismo respecto de los demás, se detallan a continuación:

- **Ventajas:**

- Sistema de baja complejidad y alta eficiencia, lo que implica un menor consumo energético y reducción de costos en motores (impacto en inversión, instalación y operación).
- Alta precisión de movimiento, lo cual implica un sistema de control menos complejo.
- Bloqueo autotrabante (worm gear).
- Mecanismo ya utilizado y probado en otros heliostatos de baja escala.
- Disminución de RPM y aumento en torque en la salida debido a worm gear.

- **Desventajas:**

- Pérdida de precisión debido a deformación de la cadena (necesidad de tensores).
- Baja resistencia a grandes cargas, por lo que es necesario una determinación precisa del viento y cargas de movimiento.
- Necesidad de plataforma adicional para el montaje de piezas debido al mayor uso de espacio de parte del “worm gear”.

A partir de esta investigación bibliográfica, se comenzó con el prediseño conceptual del helióstato SolarBosch. A continuación, se listan los requerimientos de diseño del helióstato, los cuales son el resultado del trabajo de prediseño y de la iteración sobre los requerimientos iniciales realizada a través del desarrollo del proyecto. Se muestran en particular los requerimientos generales y los requerimientos específicos de cada subsistema del helióstato SolarBosch.

### **3.4.3.- Requerimientos Helióstato**

• **Generales**

- La radiación reflejada por los helióstatos sobre el receptor debe ser máxima. La degradación del helióstato y su reflectividad por corrosión, UV y otros será mínima.
- El helióstato deberá soportar vientos de hasta 50[km/h].
- El anclaje al piso deberá ser simple y sin fundaciones.
- El helióstato será instalable sólo con un camión grúa y el mínimo personal.
- El helióstato requerirá el mínimo ajuste mecánico.
- El helióstato deberá soportar una temperatura máxima de 50[°C].

• **Espejo**

- El espejo reflejará la radiación del sol al receptor.
- El espejo con su marco deberá soportar una temperatura máxima de 50[°C].
- El espejo será de rápida y fácil limpieza.
- El espejo tendrá un formato ancho:alto de 2:4.
- El espejo tendrá un área de 7[m<sup>2</sup>].
- El espejo deberá tener una reflectividad mínima de 90%.
- El espejo deberá tener protección anti-ensuciamiento en su superficie.

- **Mecánica, Estructura y Base**
  - El mecanismo de movimiento permitirá el seguimiento del sol a toda hora.
  - La estructura proveerá soporte para el espejo y para el mecanismo de movimiento.
  - La base tendrá un peso máximo de 300[kg].
  - La base tendrá diámetro mínimo de 1[m].
  - La base tendrá 3 o 4 puntos de anclaje al piso.
- **Pilar y marco**
  - El pilar tendrá una altura máxima de 5[m].
  - El pilar será ajustable respecto a la base.
  - La unión pilar-marco debe permitir el movimiento del espejo en 2 ejes.
  - El marco estará diseñado para un espejo plano.
  - El marco tendrá mínimo 4 puntos de apoyo para el espejo.
  - La unión espejo-marco tendrá mínimo 3 puntos de sujeción.
  - La unión espejo-marco soportará una fuerza de 500[N].
- **Mecanismo de seguimiento**
  - El mecanismo tendrá 2 grados de libertad.
  - El mecanismo tendrá una posición de abatimiento.
  - El mecanismo tendrá una posición de limpieza.
  - El mecanismo deberá permitir una velocidad de movimiento mínima de 0.02[m/s].
  - El mecanismo deberá permitir una precisión de movimiento mínima de 0.01[m].
  - El mecanismo deberá permitir un movimiento de hasta 45° hacia ambos lados en el ángulo azimutal (torre como referencia).
  - El mecanismo deberá permitir un movimiento de hasta 90° hacia arriba en el ángulo polar (horizonte como referencia).

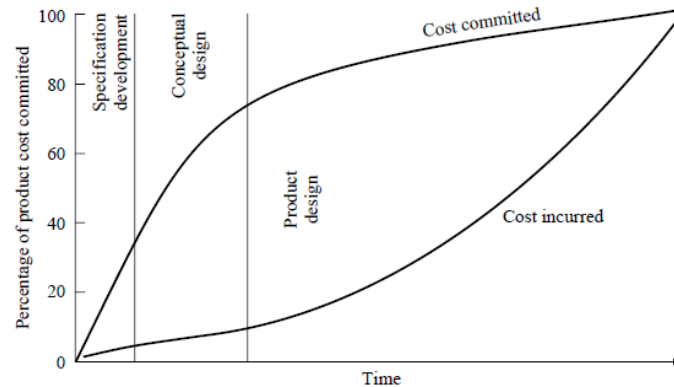
### **3.5.- Estudio del proceso de diseño**

Aunque la humanidad lleva diseñando objetos mecánicos por ya miles de años, este producto a menudo puede ser resultado de un proceso de diseño largo y tedioso. Es por esto por lo que se hace necesario estudiar estos procesos, ya que hay necesidad constante de nuevos productos de alta calidad y competitivos en costo y efectividad en el mercado.

Hay variados factores que determinan el éxito o fracaso de un producto según David G. Ullman [16], los cuales pueden agruparse en 3 grandes grupos: diseño del producto (que incluye las funciones, forma, materiales y procesos de manufactura), producción (incluye el sistema de producción, instalaciones, planeamiento de producción, costos/riesgos y comparten los procesos de manufactura con el primer grupo) y el negocio (incluyendo las predicciones de ventas, el mercado objetivo, la publicidad, precio y capacidad de distribución). Es claro que para nuestro trabajo de diseño se tendrá en importancia el primer grupo de factores, ya que los otros dos son por lo general externalizados o analizados por otros profesionales más capacitados para este tipo de tareas.

Ullman también nos dice que las 3 medidas de la efectividad del proceso de diseño son el costo del producto, la calidad y el tiempo de salida al mercado; la administración y los clientes quieren productos a menores costos, mayor calidad y en el menor tiempo posible. El costo real de diseñar un producto es muy pequeño (5-10% de los costos de manufactura totales), sin embargo, una buena calidad de diseño puede hacer una gran diferencia independiente de la calidad de los procesos de fabricación.

Incluso, es importante optimizar el proceso en las etapas iniciales del diseño, ya que según la Figura 12, el 75% de los costos de manufactura ya están comprometidos al final del diseño concepto. Esto nos dice que las decisiones tomadas posteriormente solo influyen en el 25% de los costos de manufactura del producto, lo cual es muy poco y da bajo margen para la disminución de costos en etapas avanzadas del proyecto.



**Figura 12:** Porcentajes de costos comprometidos e incurridos según la etapa. Fuente: [16].

Ya a mediados del siglo XX los productos y los procesos de manufactura se volvieron tan complejos que ya era necesario tener equipos de trabajo para cada área de desarrollo. Sin embargo, por la falta de experiencia y la poca optimización de procesos y protocolos es que los procesos de diseño iban en una sola dirección, con poca comunicación entre sus partes: es lo que se acabó conociendo como proceso “sobre la muralla”. Cada proceso del diseño ingenieril está separado del otro por una muralla, sin un feedback adecuado y continuando el proceso como mejor le parezca al área actualmente involucrada. Esto puede llevar a la fabricación de productos que no cumplen con lo que el cliente tenía en mente, debido a las dificultades de comunicación y las debilidades de este tipo de proceso de diseño.

Luego con el paso de los años comenzaron a surgir nuevos conceptos en los procesos de diseño, en particular al comienzo de los años '80 se introdujo el concepto de ingeniería simultánea. Se hizo necesario integrar el desarrollo de los procesos de manufactura en simultáneo con la evolución del diseño del producto. Esta filosofía de diseño comenzó a ganar fuerza y ampliar sus alcances, llegando a lo que se llama la Ingeniería Concurrente, lo que en los 90 se convirtió en Diseño de Producto y Procesos Integrados (IPPD por sus siglas en inglés). Sin embargo, según la fundación Prodintec en su Guía Metodológica DFMA [17], es el término de Ingeniería Concurrente el utilizado para referirse a esta evolución de los procesos de diseño, ya que es el término más aceptado en el ámbito profesional, ya que como dice el nombre estas técnicas involucran la concurrencia de actores humanos, herramientas, metodologías y puntos de vista.

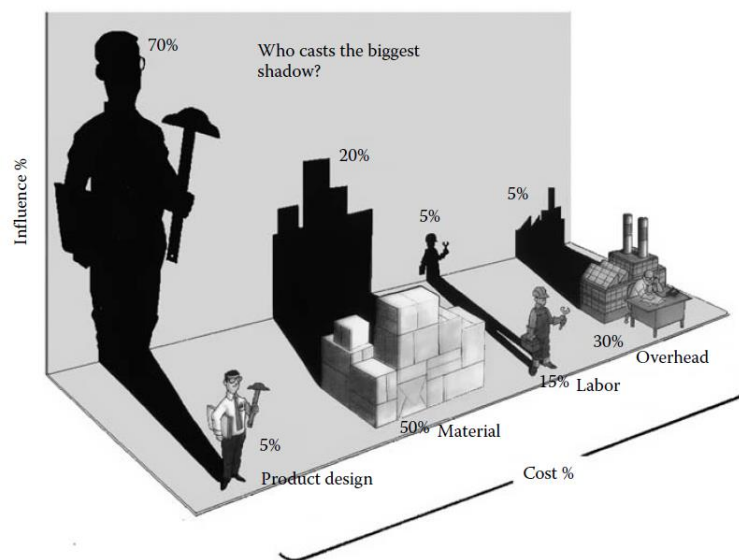
Más específicamente, la Ingeniería Concurrente pretende crear nuevas formas de concebir la ingeniería de dentro del diseño y desarrollo de productos y servicios. Es acá donde concurren 3 perspectivas principales:

- Desde el producto: se considera la gama que se fabrica y se ofrecen los requerimientos en las distintas etapas junto con los costos asociados.
- Desde los RRHH y metodologías: involucra tareas colectivas de asesoramiento y decisión, o en forma individual involucrando impulsión y gestión de proyecto.
- Desde los recursos materiales: involucra nuevas herramientas y tecnologías de información y comunicación con bases de datos, modelos 3D, simulaciones, cálculos, prototipos, etc.

A partir de la Ingeniería Concurrente es que surge un nuevo enfoque llamado el Diseño para la Fabricación y Montaje (DFMA por sus singlas en inglés), la cual es definida como [17] un “conjunto de técnicas y metodologías para la mejora del diseño (o rediseño) de un producto que, respetando sus funciones esenciales, tiene por objetivo mejorar los aspectos de fabricabilidad, montabilidad y costes”. El DFMA proviene inicialmente de 2 metodologías independientes [18]: DFA (diseño para ensamble, apuntando a transiciones a producción a costo mínimo, enfocándose en el número de partes, manejo de piezas y facilidad de ensamblaje) y DFM (diseño para manufactura, apuntando a la elección del material más efectivo para el costo y los procesos a utilizar en la producción). Debido a que ambas metodologías buscan la reducción de material, desechos y costos de mano de obra general es que actualmente se les conoce como una sola metodología unificada, la DFMA. Estas herramientas fueron originalmente introducidas en la industria por el Dr. Boothroyd y el Dr. Dewhurst en el año 1983 con su libro titulado “Product Design for Manufacture and Assembly”. [19] Según los autores, esta metodología se utiliza para tres actividades principales:

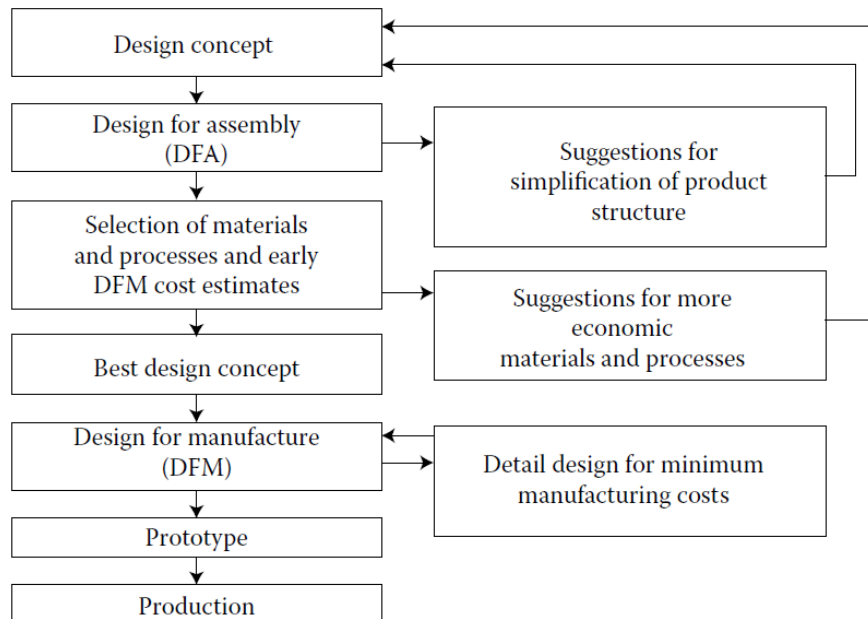
- Como base para la ingeniería concurrente para guiar a los equipos de diseño a simplificar la estructura del producto para lograr la reducción de costos, y cuantificar las mejoras.
- Como herramienta base para estudiar los productos de la competencia y cuantificar dificultades en la manufactura y el ensamblaje.
- Como herramienta para estimar y controlar costos, ayudando a negociar con proveedores.

Esta metodología DFMA busca objetivos específicos como la facilitación de operaciones de fabricación y montaje, disminución de costos de inversión y gestión, optimización del uso de las herramientas y equipos, mejora en la flexibilidad de fabricación. Todo esto puede ser logrado poniendo énfasis en la etapa de diseño del producto, ya que es en esta fase donde las decisiones tomadas tienen un 70% de influencia en costo del producto, su calidad y tiempo de ciclo, cuando los costos incurridos en la etapa de diseño son solo un 5% del total de este producto.



**Figura 13:** Influencia y costos de cada etapa del desarrollo de un producto. Fuente: [19].

Debido a que en esta primera etapa de prototipado es difícil controlar los procesos de manufactura a realizar, es que se decidió analizar los procesos de diseño separadamente para el DFA en un comienzo y el DFM para una etapa más avanzada. En particular el análisis DFA de los diseños de los primeros prototipos servirá para analizar el número de piezas, manejo manual y facilidad o no de ensamblaje. Estos datos nos darán lineamientos para la mejora del diseño, los cuales junto a un posterior análisis DFM (posibles procesos para fabricación de piezas en grandes cantidades o en serie) nos darán las bases para las propuestas de procesos de manufactura y diseño de algunas piezas críticas o que puedan optimizarse notoriamente. La Figura 14 muestra los pasos que se deben seguir al usar el DFMA durante el diseño de un producto. Primero se usa el análisis DFA para llegar a una simplificación de la estructura del producto y luego se utiliza el DFM para estimar costos tanto para el diseño original como el modificado. La diferencia con nuestro caso es que se fabricaron prototipos sin realizar este análisis a los diseños realizados, debido a que debíamos verificar que el principio del sistema de movimiento funcionaba para poder validarlo. Es por esto por lo que finalmente se decidió realizar un análisis DFA más exhaustivo para los prototipos ya fabricados y dejar para una etapa posterior el detalle del análisis DFM.



**Figura 14:** Etapas típicas durante un análisis DFMA. Fuente: [19].

### 3.5.1.- Análisis DFA

A partir del diseño concepto se utiliza el enfoque DFA para optimizar el diseño y el conteo de partes para el ensamblaje. Algunos principios importantes de esta parte de la metodología son:

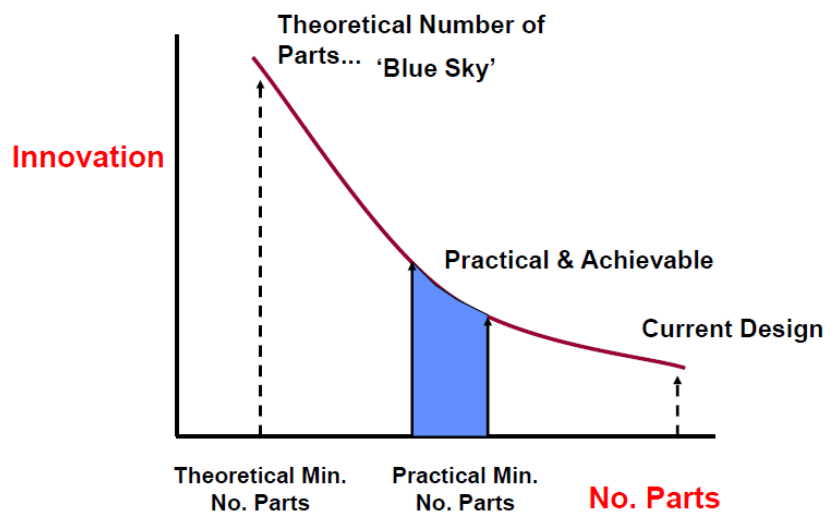
- Minimizar el conteo de partes y piezas.
- Diseñar partes con cualidades de auto alocaamiento o uso de partes estandarizadas.
- Promover el diseño modular y diseño de partes base para alocar otros componentes.
- Minimizar reorientación y diseños para buen manejo, manipulación e inserción.

Boothroyd y Dewhurst nos dan los pasos necesarios para el proceso de análisis DFA que realizaremos a los prototipos.



- Análisis funcional: identificar número de partes e interfases, identificar partes que pueden estandarizarse, determinar conteo de partes teóricas mínimas, eficiencias y factor de complejidad.
- Determinar conteo de partes prácticas mínimas.
- Identificar oportunidades de calidad (a prueba de errores).
- Identificar oportunidades de manejo (manipulación y orientación).
- Identificar oportunidades de inserción (locación y aseguramiento).
- Identificar oportunidades de reducción de operaciones secundarias.

El objetivo de este análisis es que el número de partes del diseño se acerque lo más posible al número teórico mínimo de partes como lo muestra la Figura 15. Sin embargo, llegar a ese número en la realidad es imposible, siendo la zona azul nuestra real zona objetivo que sería nuestro número práctico mínimo de partes.



**Figura 15:** Innovación del diseño respecto al número de partes. Fuente: [18].

A partir de los pasos mencionados es que se elabora la Tabla de la Figura 16, la cual fue desarrollada en un principio por la empresa Cummins Inc. Cada ítem debe llenarse para las partes o piezas del diseño. En particular para nuestro análisis no incluiremos las partes comerciales del helióstato, sino solo las piezas las cuales deben ser sometidas a algún proceso de manufactura. A continuación de la figura se especifica cada uno de los ítems y como debe rellenarse, entregando respuestas de Sí (S) o No (N) para cada una de las piezas analizadas, excepto para el ítem de complejidad DFA (y costo) que se rellena con números.

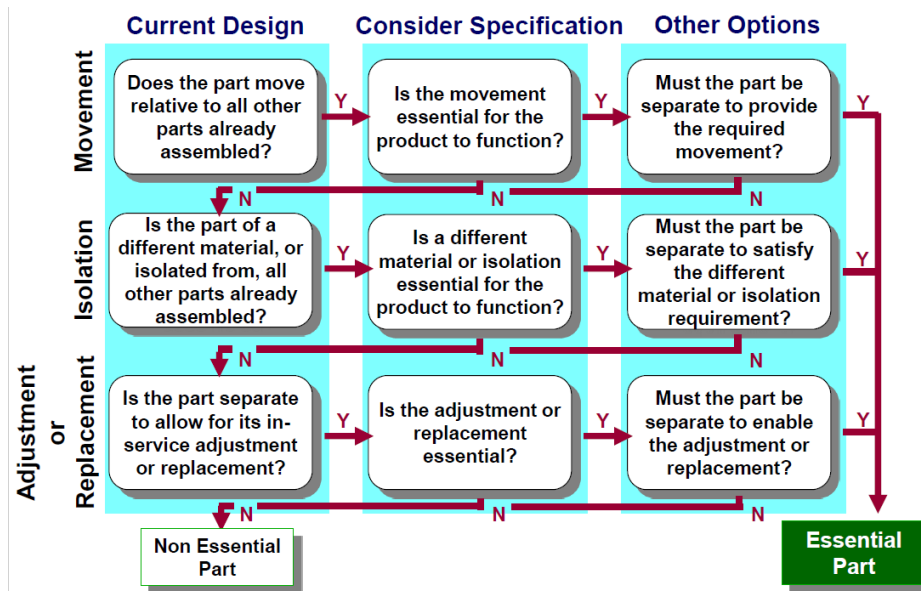
PARTE		COMPLEJIDAD DFA		ANÁLISIS FUNCIONAL / OPORTUNIDAD REDISEÑO			PRUEBA DE ERRORES		MANEJO MANUAL			INSERCIÓN			OPERACIONES SECUNDARIAS							
N° PARTE	NOMBRE PARTE	N° PARTES (Np)	N° INTERF (Ni)	PARTES MÍNIMAS TEÓRICAS	PORTE PUEDE SER ESTANDARIZADA	COSTO	PARTES MÍNIMAS PRÁCTICAS	PORTE ERRÓNEA / OMITIR PARTE	ARMADO ERRÓNEO	ENREDO / ANIDADO / SE PEGA	FLEXIBLE / FRÁGIL / AFILADO / RESBALOSO	ALICATE / PINZA / LUPA	DIFICULTAD DE ALINEAR / ALOCAR	AFIRMADO REQUERIDO	RESISTENCIA A INSERCIÓN	ACCESO O VISIBILIDAD LIMITADA	PIEZA DE TRABAJO REORIENTADA	ATORNILLAR / TALADRAR / GIRAR / REMACHAR / DOBLAR / CRIMPEAR	SOLDADO / PEGADO	PINTADO / LUBRICADO / CALENTADO / APLICACIÓN LÍQUIDA O GASEOSA	TESTEAR / MEDIR / AJUSTAR	
<b>TOTALES</b>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DESIGN FOR ASSEMBLY METRICS		0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
TARGET				>60%																		

**Figura 16:** Tabla base de análisis DFA. Fuente: Elaboración propia.

- Número total de piezas: conteo de las piezas y partes del diseño a analizar.
- Número total de interfases entre piezas: número de interfases de la pieza con las demás.
- Partes mínimas teóricas: se determina si la pieza es esencial para el funcionamiento del producto mediante preguntas que se detallan en la Figura 17.
- Partes mínimas prácticas: se determina si la pieza ayuda al funcionamiento del diseño y si es práctica y funcional para el producto, a diferencia de las teóricas mínimas que busca las piezas estrictamente esenciales para el funcionamiento.

El resto de los ítems se rellenan preguntándose si la pieza o parte tiene potenciales dificultades en errores de armado o manejo, inserción y si son necesarias operaciones secundarias para completarse. El detalle de cada ítem se muestra a continuación.

- Pruebas de errores:
  - o Parte errónea / omitir parte
  - o Armado erróneo
- Manejo manual
  - o Enredo / anidado / se pega
  - o Flexible / frágil / afilado / resbaloso
  - o Alicata / pinza / lupa
- Inserción
  - o Dificultad de alinear / alocar
  - o Afirmado requerido
  - o Resistencia a inserción
  - o Acceso o visibilidad limitada
- Operaciones secundarias
  - o Pieza de trabajo reorientada
  - o Atornillar / taladrar / girar / remachar / doblar / crimpear
  - o Soldado / pegado
  - o Pintado / lubricado / calentado / aplicación líquida o gaseosa
  - o Testear / medir / ajustar



**Figura 17:** Preguntas para análisis funcional de piezas mínimas teóricas. Fuente: [18].

Además de lo anterior, también es útil calcular ciertos factores que nos dan métricas para evaluar cuantitativamente el diseño realizado. Estos se detallan a continuación:

- Eficiencia del diseño: factor que se calcula con la división entre el número de partes mínimas teóricas y el número de partes totales. El objetivo es que este factor de eficiencia llegue a alcanzar el 60%.
- Factor de complejidad DFA: se calcula como la raíz cuadrada de la multiplicación del número de partes y el número de interfaces parte a parte.
- Índice de error: se calcula como la suma de todos los Sí en las columnas de error dividido por el número teórico mínimo de partes.
- Índice de manipulación: se calcula como la suma de todos los Sí en las columnas de manipulación dividido por el número teórico mínimo de partes.
- Índice de error: se calcula como la suma de todos los Sí en las columnas de inserción dividido por el número teórico mínimo de partes.
- Índice de error: se calcula como la suma de todos los Sí en las columnas de operaciones secundarias dividido por el número teórico mínimo de partes.

Luego de tener completa la tabla se procede con el análisis de los resultados y métricas obtenidas, comparando los resultados para el diseño original como para el nuevo diseño, observando las mejoras en cada uno de los ítems. Esto servirá para atacar los puntos débiles del diseño para las siguientes iteraciones.

### 3.5.2.- Análisis DFM

Para la segunda parte del análisis se tomarán los diseños realizados y se determinarán cada uno de los procesos de manufactura involucrados para cada una de las partes y piezas (rellenados en una tabla como la de la Figura 18). Esto nos dará un primer acercamiento acerca de cuáles son los procesos más utilizados en la fabricación de nuestro producto, y conociendo la relación de costos entre estos procesos poder determinar qué es lo que se está llevando la mayoría de los

recursos (que frecuentemente son el uso de tornos y fresas para la manufactura de ejes y las soldaduras, que son lo que utilizan la mayor cantidad de HH).

**Tabla 2:** Procesos de manufactura asociados a cada pieza del diseño. Fuente: Elaboración propia.

PIEZA	MATERIAL	SIERRA	TORNO	FRESA	CORTE LÁSER	PERFORACIÓN	SOLDADURA	OTRO

La tabla será rellena con Sí o No dependiendo si la parte o pieza a analizar es sometida a algún proceso de manufactura del listado. Con esto se determinarán los costos generales de manufactura asociados al diseño lo cual dará los primeros lineamientos de las piezas que se deben modificar, eliminar o reemplazar para lograr disminuir costos. Se conocerá que ítem del proceso de armado y manufactura es el que se lleva la mayor cantidad de costos, lo cual dirá a que piezas o estrategia de diseño apuntar para lograr la disminución de costos.

A partir de esto es que finalmente se podrán realizar recomendaciones de diseño y lineamientos para el futuro diseño de helióstato que involucre procesos de manufactura a gran escala o en grandes cantidades como lo son la fundición o fabricación de piezas dobladas, evaluando sus costos para la fabricación de cientos o miles de heliostatos para la planta final de SolarBosch.

## **4.- Metodología de Trabajo**

A partir del diseño conceptual desarrollado, el sistema de transmisión seleccionado y los requerimientos de diseño determinados, es que se hace imperativo avanzar hacia una etapa práctica de manera de validar experimentalmente el mecanismo de movimiento y control eléctrico (este control es desarrollado por un alumno memorista de Ing. Eléctrica). Esto nos ayudará a corregir errores, fallas en el diseño y posibles mejoras de éste de cara a la construcción de futuros prototipos. La metodología de trabajo a realizar se puede dividir en 4 etapas:

- i) **Diseño, construcción y análisis Prototipo 1.0:** A partir de las decisiones tomadas y los requerimientos necesarios se procede con el diseño en CAD de un primer prototipo para validar el sistema de movimiento elegido y el sistema de control desarrollado. Esto nos sirve para visualizar problemas y mejoras a tiempo, los cuales podrían no verse en los modelos computacionales sin pruebas empíricas. Para esta etapa no se requerirá una estructura muy compleja ni con un espejo de grandes dimensiones, se requiere una estructura de fácil manufactura y ensamblaje para realizar pruebas lo antes posible. Esta etapa se realiza principalmente con el software CAD Inventor 2018, usando su módulo de análisis de esfuerzo para validar las piezas y la construcción será realizada íntegramente en el Taller de Molina. Debido a que esta estructura será de prueba, no se cubrirán todos los requerimientos de uso exterior ni de esfuerzos por el viento.
- ii) **Rediseño Prototipo 2.0:** A partir de la validación del prototipo y el análisis de funcionamiento mecánico, se procede a un rediseño de la estructura tomando en consideración las conclusiones del primer prototipo. Este diseño será mayormente desarrollado por el Ing. Rodrigo Miranda de Enerbosch y supervisado por el Profesor Co-Guía Andrés Bosch (Jefe de Proyecto SolarBosch). Se trabajará en conjunto recomendando lineamientos para el nuevo diseño, de manera de disminuir las futuras dificultades de manufactura y ensamblaje. La construcción de este prototipo será externalizada y se realizarán pruebas mecánicas y eléctricas en el Taller de Molina.
- iii) **Análisis DFMA Prototipo 2.0:** Luego de tener ambos prototipos funcionales y probados, se procede al análisis de procesos de manufactura y ensamblaje de piezas del helióstato. Esto es muy útil para lograr estimar costos de producción de estos prototipos, lo cual da la base para la disminución de costos de cara a un nuevo diseño de un futuro prototipo. Es acá donde se realizan cambios en el diseño para optimizar tanto la etapa de manufactura como de ensamblaje del futuro prototipo a tamaño real. Esto se realiza utilizando la metodología DFMA, la cual consiste en el análisis y optimización de las partes y piezas del diseño, teniendo como objetivo disminuir la cantidad de partes, costos, trabajo y energía para la construcción del producto. Se disminuye la complejidad reduciendo el número total de partes, desarrollando un diseño modular, además de la utilización de partes estándares y ojalá multifuncionales y de fácil ensamblaje final.
- iv) **Recomendaciones y lineamientos de diseño:** Finalmente, luego del análisis completo de procesos y ensamblaje, se realizarán recomendaciones de diseño siguiendo las indicaciones y conclusiones de análisis DFMA. Estas recomendaciones estarán enfocadas en un escenario futuro de construcción para la planta final de Enerbosch, la cual tendrá alrededor de 300 helióstatos, con el objetivo de tener una planta económicamente competitiva.

## **5.- Resultados**

### **5.1.- Prototipo 1.0**

A partir de los requerimientos iniciales determinados anteriormente se procede con el diseño del primer prototipo de helióstato para su posterior construcción y pruebas en terreno. Debido a que era necesario validar de manera rápida el sistema de movimiento elegido con rieles y cadenas, se relajaron algunos requerimientos de manera de lograr un diseño barato y fácil de construir. Algunos requerimientos particulares del Prototipo 1.0 fueron:

- Movimiento en 2 ejes, utilizando rieles, piñones y cadenas.
- Uso de motor stepper directo al eje motriz.
- Marco para espejo de 1.5[m<sup>2</sup>].
- Base simple para transporte a patio de pruebas.
- Desmontable en caso de ser necesario traslado.
- Base adicional para montaje de transmisión.

#### **5.1.1.- Cálculos Generales Prototipo 1.0**

Para la base de los cálculos de las piezas mecánicas se utilizó la velocidad del viento como dato para iniciar los cálculos. En un comienzo se utilizó al pie de la letra la norma chilena de estructuras [21], la cual sugiere realizar los cálculos utilizando como base una velocidad de viento de casi 120[km/h]. Estos cálculos arrojaron resultados muy excesivos en las dimensiones de ejes y motores, y finalmente se concluyó el sin sentido de realizar cálculos para estas velocidades de viento huracanadas si en esas condiciones ya el espejo estaría quebrado. Finalmente, se tomaron los datos de viento arrojados por el explorador eólico de la zona del Taller de Molina y el terreno en Quilicura donde irá la futura planta, lo cual arrojó que los vientos alcanzan una velocidad máxima de menos de 50[km/h]. De todas maneras, es necesario ser conservadores en este tipo de cálculos ya que estas condiciones pueden tener fuertes peaks que puedan llevar a generar fallas en nuestro producto, por lo que se definió utilizar una velocidad de viento de 80[km/h] para todos los cálculos de piezas mecánicas.

A partir de esto se calculó la fuerza que ejerce el viento sobre la superficie del espejo de 1.5[m<sup>2</sup>] que se utilizará, juntos como otras variables de diseño definidas previamente para proseguir con los cálculos (estas variables se muestran en la Tabla 3).

**Tabla 3:** Parámetros de diseño Prototipo 1.0. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Parámetro</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad de medida</b>
Área espejo	1,5	m <sup>2</sup>
Coefficiente de diseño	1,162	-
Velocidad viento	80 (23)	Km/h (m/s)

Estos parámetros o variables de diseño fueron las que se tomaron para fabricar este primer prototipo de heliostato, de manera que fuera de un tamaño más bien pequeño para su facilidad y rapidez en la fabricación. También se definieron ciertos elementos comerciales que serían utilizados para evitar su fabricación en taller, como lo son el piñón y la cadena de transmisión.

Con todos estos datos conoceremos las cargas a las cuales estará sometida nuestra estructura, junto con las tensiones en cadenas y los torques necesarios en motores para mover el heliostato, con lo cual se calcularán los diámetros mínimos en los ejes de transmisión, y también

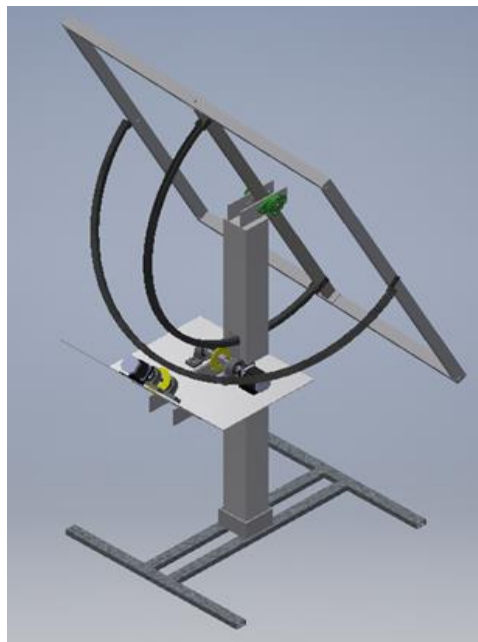
en el eje pivote central. Luego con estas fuerzas calculadas se harán análisis de esfuerzos en CAD para los perfiles de acero críticos como lo son el perfil pivote central y el perfil cuadrado de la base. El resultado de estos cálculos se resume en la Tabla 4. El detalle de los cálculos realizados se adjunta en el Anexo A.

**Tabla 4:** Resultados cálculos de piezas mecánicas Prototipo 1.0. Fuente: Elaboración Propia.

Variable	Magnitud	Unidad de medida
Fuerza del viento	1,085	kN
Diámetro mínimo eje pivote	14	mm
Espesor mínimo planchas rodamiento	2	mm
Tensión en cadena	19,613	N
Torque mínimo motor	1,177	Nm
Diámetro mínimo eje motriz pitch	7	mm
Diámetro mínimo eje motriz roll	5	mm

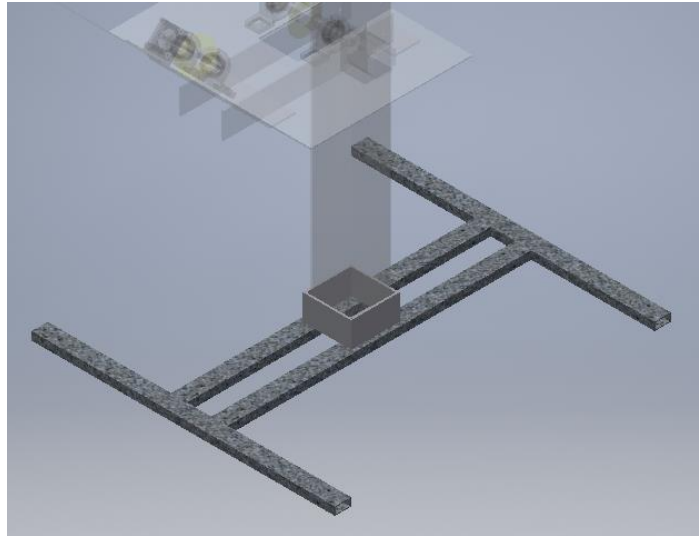
### 5.1.2.- Diseño CAD Prototipo 1.0

Para el diseño en CAD se utilizó el programa Inventor 2018 de Autodesk. Se comenzó utilizando un perfil cuadrado como pilar principal de la estructura. En general el diseño se basó en los heliostatos del Auto-R Project del Instituto DLR de Alemania, debido a las similitudes en las exigencias y el tipo de transmisión del heliostato. La estructura principal será de acero al carbono A-36, los ejes de transmisión de acero SAE 1045 y el marco con perfiles rectangulares de aluminio para la disminución de peso. En la Figura 19 se muestra el CAD de nuestro Prototipo 1.0, donde se pueden distinguir claramente sus partes, con una base de apoyo libre para facilidad de traslado, el perfil cuadrado central que soporta la base de transmisión por donde pasan los rieles y cadenas, y además la estructura superior del perfil de pivote y el marco que sostienen el espejo y los rieles tanto principal y secundario.



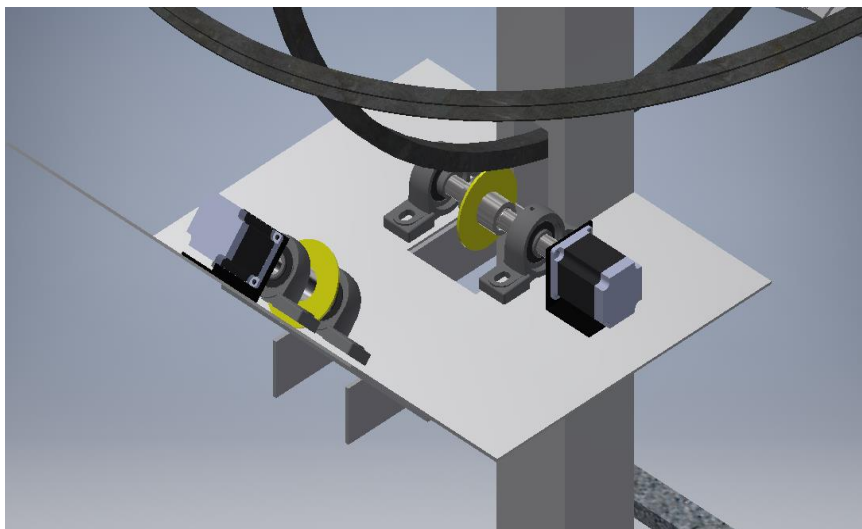
**Figura 19:** Vista general CAD Prototipo 1.0.

En la Figura 20 se muestra la base de apoyo libre, la cual tiene un cajón hecho con pletinas con el fin de que el perfil cuadrado central encaje en este lo que elimina la necesidad de soldadura o pernos para sostenerlo. Esto también ayuda a la facilidad de arme y desarme para el traslado a las pruebas realizadas en exterior.



**Figura 20:** CAD base de apoyo Prototipo 1.0.

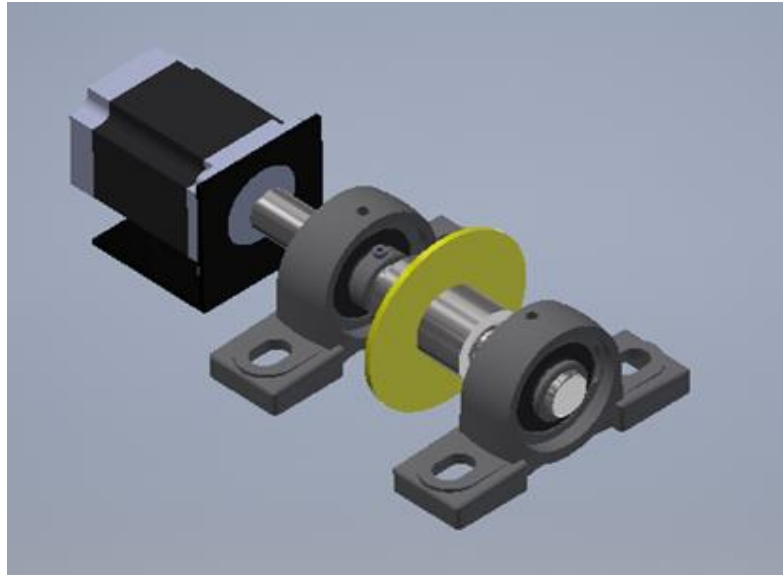
En la Figura 21 se observa el perfil central con la base de apoyo que sostiene lo que es la transmisión del sistema que incluye los motores stepper, los ejes de transmisión, rodamientos, piñones y todo el sistema de control eléctrico del heliostato.



**Figura 21:** CAD base aluminio para sistema de transmisión.

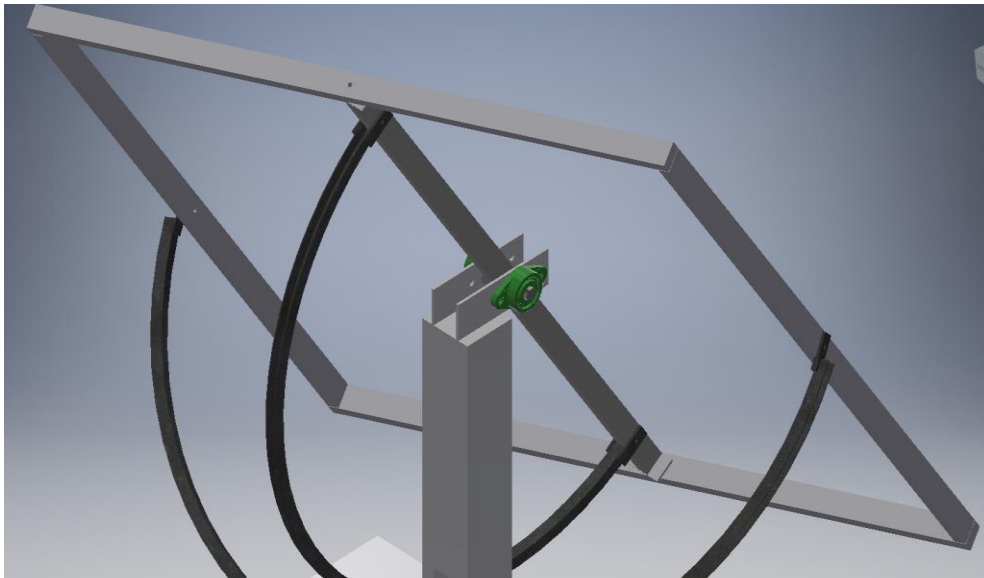
En la Figura 22 se observa con mayor detalle el sistema de transmisión básico de uno de los rieles, involucrando el motor acoplado al eje montado sobre 2 rodamientos (uno en cada extremo) y en la parte central el piñón soldado al eje, el cual se dibujó como un disco en el CAD ya que aún no se sabía que piñón sería el utilizado finalmente.





**Figura 22:** CAD sistema de transmisión Prototipo 1.0.

Para la estructura superior (Figura 23), el perfil de pivote se acopla al perfil cuadrado central mediante un eje pivote apoyado en 2 rodamientos. El riel principal se acopla al perfil pivote un poco antes de sus extremos, y el riel secundario se acopla a los perfiles laterales del marco, el cual se mantiene en su lugar debido a la unión que tiene con ambos extremos del perfil pivote central.



**Figura 23:** CAD estructura superior (pivote-marco) Prototipo 1.0.

Es claro observar que algunas piezas, especialmente los ejes se encuentran sobredimensionados para los cálculos que se realizaron, ya que estos se tuvieron que adaptar a los elementos comerciales que se encontraron, especialmente los piñones. En particular, se compraron piñones de bicicleta de 19 dientes los cuales tienen un diámetro interior de 35[mm], por lo cual hubo que modificar los ejes de transmisión, aumentando su diámetro en la sección central para poder recibir este piñón, mientras que los extremos de los ejes se definieron en 20[mm] para evitar fallas debido a un cambio de sección excesivo. La cubicación de los elementos constructivos y comerciales se adjuntan en el Anexo B.

### 5.1.3.- Fase de Construcción Prototipo 1.0

En las Figuras 24 y 25 se observa concluida la primera etapa de construcción mecánica sin los elementos eléctricos montados aún. Toda la construcción de este prototipo fue realizada en el Taller de Molina del DIMEC. Todos los materiales fueron adquiridos con proveedores cercanos al taller, como lo son Rodamientos Industriales, Pernos Alameda, Acero Perfil y Maquimetal. El doblado de los rieles fue el único proceso de manufactura que fue externalizado (Istria) debido a que solo una cilindradora puede hacer ese trabajo, máquina que el nuestro taller no posee.

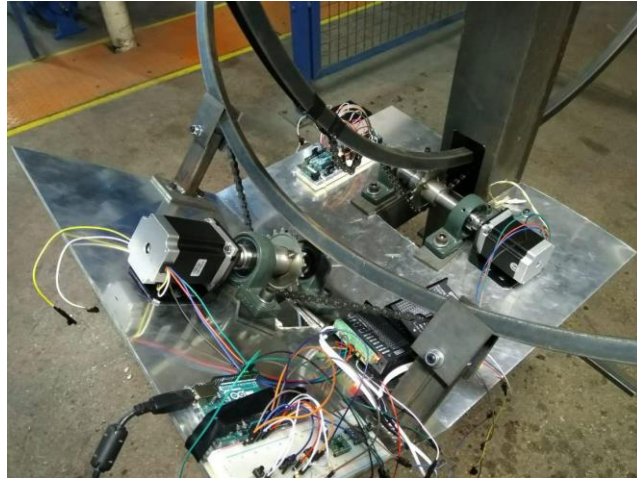
Luego del montaje de los rieles, se observó que era necesario agregar una guía para el riel secundario debido a que la tensión de la cadena no era suficiente para que se mantenga alineado permanentemente con el piñón de la transmisión, esto porque se encuentra alineado en  $45^\circ$  respecto a la horizontal. A pesar de esto se concluyó que el sistema es funcional y se procede a la siguiente etapa de instalación de las piezas eléctricas para comenzar con las pruebas. Dicha etapa se muestra concluida en la Figura 26.



**Figura 24:** Primera etapa de construcción Prototipo 1.0.



**Figura 25:** Sistema de transmisión mecánica Prototipo 1.0.



**Figura 26:** Sistema de transmisión con componentes eléctricos Prototipo 1.0.

Los componentes eléctricos consisten en motores stepper de 1,3[Nm] de torque máximo, conectados a baterías estándar de 12V para la alimentación eléctrica. El control es realizado por un Arduino el cual es conectado a un computador desde el cual se controlan los motores gracias a una interfaz gráfica desarrollada por el memorista eléctrico.

#### **5.1.4.- Pruebas de funcionamiento Prototipo 1.0**

Ya con esta etapa de construcción concluida se comenzó con las pruebas de funcionamiento del heliostato en condiciones de uso al interior del taller, primero solo con el riel principal y luego agregando el riel secundario.

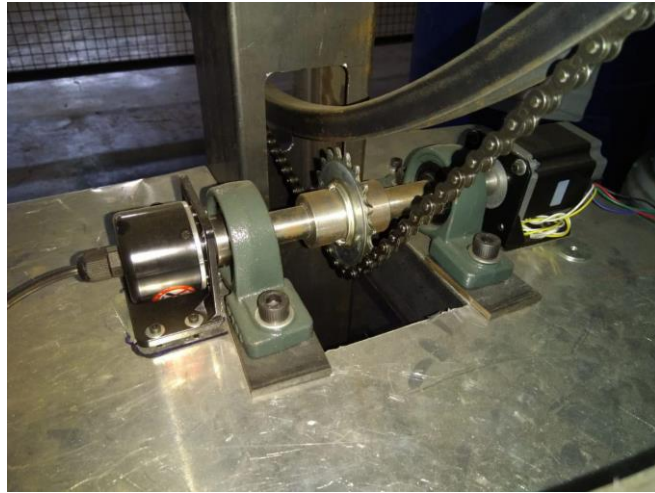


**Figura 27:** Pruebas iniciales con riel principal (ángulo de pitch) Prototipo 1.0.

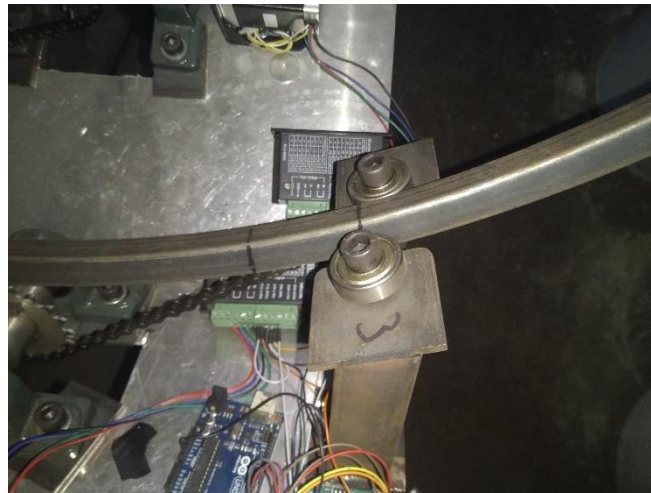


**Figura 28:** Pruebas de funcionamiento con ambos ejes simultáneos Prototipo 1.0.

Estas primeras pruebas fueron muy útiles para la mejora del seguimiento solar del heliostato. Se observó que al estar el riel secundario fijo en una posición respecto al marco se genera una constante deformación de este. Esto genera un desalineamiento del riel secundario respecto al piñón de transmisión, por lo que las guías de acero finalmente traban el libre desplazamiento del riel. Además, se observó pérdida de precisión leve en el movimiento de los ejes, lo cual puede ser debido a la poca tensión de la cadena lo cual puede resultar en algún salto en un diente del piñón. Estos problemas se solucionaron mejorando la guía del riel, agregando unos pequeños rodamientos para un mejor deslizamiento de este, además de la adición de un encoder eléctrico para medir efectivamente el ángulo de giro del eje de transmisión. Estas mejoras se observan en las figuras 29 y 30.



**Figura 29:** Instalación encoder en eje de pitch Prototipo 1.0.



**Figura 30:** Mejora en guías de riel secundario (roll) Prototipo 1.0.

Finalmente, para lograr realizar pruebas en exterior se instalaron pequeños espejos de 40cmx40cm en el marco habilitado. No se pudo instalar un espejo más grande debido a la inexistencia de espejos reflectores especiales de estas medidas en nuestro país. Estas muestras se lograron conseguir con la empresa chilena Vidrios Lirquén, los cuales son los representantes de RioGlass en Chile, empresa especializada en la fabricación de espejos para aplicaciones solares y otras aplicaciones especiales. Estos espejos instalados se observan en la Figura 31.



**Figura 31:** Instalación de espejos para pruebas en exterior Prototipo 1.0.

Ya con estas mejoras se procede a las pruebas mecánico-eléctricas de funcionamiento en un ambiente exterior, en particular el patio del Taller de Molina, donde se habilitó la construcción de una plancha objetivo en altura de manera de lograr reflejar radiación y realizar pruebas de control y apuntamiento.



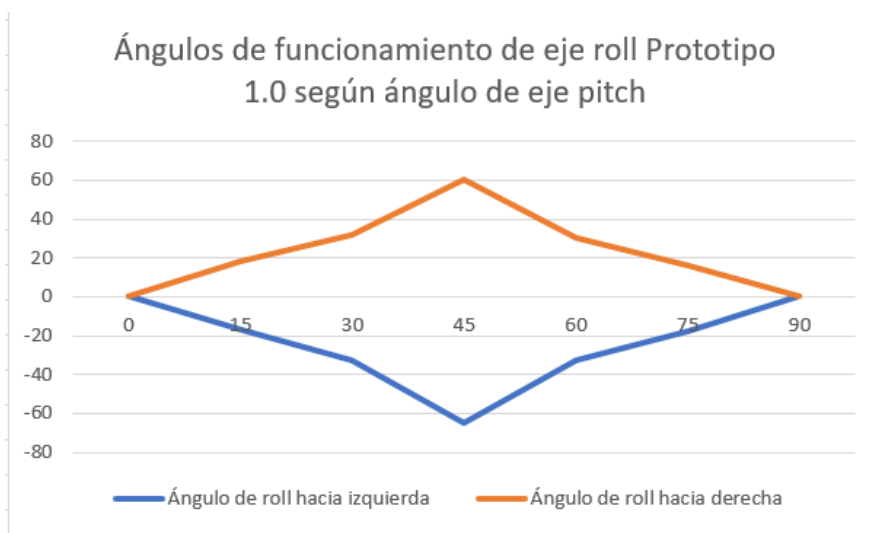
**Figura 32:** Primeras pruebas de funcionamiento en exterior Prototipo 1.0.



**Figura 33:** Plancha objetivo para pruebas de reflexión Prototipo 1.0.

A partir de estas pruebas es que se obtuvieron resultados cuantitativos como la capacidad de movimiento en ángulo por step de los motores (constantes de calibración), errores de medición y curva de funcionamiento en ambos ejes.

En particular, las constantes de calibración para este Prototipo 1.0 son de  $0,08[^\circ/\text{step}]$  para el ángulo de roll y de  $0,06[^\circ/\text{step}]$  para el ángulo de pitch. Mientras que el eje de pitch principal es capaz de recorrer por completo la capacidad del riel (desde los  $0$  a los  $90^\circ$ ), el eje de roll secundario solo era capaz de recorrer una parte dependiendo del ángulo en que se encontrara el eje de pitch. Estos ángulos de funcionamiento se muestran relacionados en la Figura 34, notando que no se hicieron mediciones para las posiciones de abatimiento y limpiado ( $0^\circ$  y  $90^\circ$  del pitch respectivamente).



**Figura 34:** Ángulos de funcionamiento Prototipo 1.0. Fuente: Elaboración propia.

Es interesante acotar que para los ángulos de pitch de  $15^\circ$  y de  $75^\circ$ , al llegar el eje de roll al límite mostrado (alrededor de los  $18^\circ$  para cada lado) era la cadena de este eje el que se desmontaba de su piñón, como se esperaba. Por otro lado, en los ángulos de pitch de  $30^\circ$  y  $60^\circ$  era la cadena de este eje el que se desmonta de su piñón al llegar el eje de roll a los límites mostrados (alrededor de los  $32^\circ$  para cada lado). Esto podría considerarse contrario a la lógica, pero tiene que ver con la deformación del marco y desalineamientos de los rieles en cada uno de los ejes de funcionamiento.

Como conclusiones generales, estas pruebas resultaron bastante importantes ya que a pesar de que no se logró hacer un seguimiento altamente preciso, la repetición constante ayuda a actualizar el código de seguimiento e ir disminuyendo cada vez más los errores asociados. Esto es muy útil para avanzar trabajo de cara a la implementación y funcionamiento de los prototipos siguientes.

### **5.1.5.- Hallazgos Prototipo 1.0**

Los principales hallazgos y problemas encontrados en el Prototipo 1.0 se listan y explican a continuación.

- Interferencia entre piezas: se encontró una interferencia importante entre las placas que sostienen los rodamientos del pivote central con el posible espejo que se instalaría (Figura 23, puntas de placas que sobresalen en rodamiento verde). Finalmente, esto no fue un problema ya que se instalaron pequeños espejos a los lados y no un espejo completo que cubriera por completo el marco.
- Tensión cadena eje pitch variable: se observa una constante variación en la tensión de la cadena del eje principal a medida que el heliostato se mueve hacia arriba o abajo. Esto puede deberse a que el riel no se encuentra perfectamente centrado respecto al eje de giro, por lo cual la cadena tiende a tensionarse hacia un extremo y a soltarse hacia el otro.
- Salto de pasos motor stepper: en algunos momentos se sentía que el motor stepper perdía pasos y no avanzaba los pasos entregados por el código. Esto podía deberse a una sobretensión de la cadena o a que el eje de motor no se encontraba acoplado de buena manera al eje de transmisión. Finalmente, este problema se fue solucionando a medida que avanzaban las pruebas, junto con una constante revisión y apriete de las piezas fundamentales de la transmisión, sobre todo los prisioneros que acoplaban el eje del motor.
- Caída segundo riel: El riel secundario (roll) se instaló a  $45^\circ$  respecto a la horizontal para acoplarse al segundo motor y eje de transmisión. En un comienzo se pensó que la tensión de la cadena sería suficiente para que se mantuviera en su lugar, sin embargo, el peso de este tendía a sacar la cadena del piñón constantemente. Por ello, se agregó una guía para mantener el riel fijo en su posición.
- Deformación marco: Con el giro del heliostato y debido a que el marco no fue reforzado, es que este tiende constantemente a deformarse. Esto provoca un desalineamiento del riel secundario respecto al piñón de la transmisión, lo cual finalmente provocaba que el riel quedara atrapado debido a las guías instaladas, dando ángulos de funcionamiento de solo  $10^\circ$  para cada lado. Esto se solucionó parcialmente mejorando las guías del riel, colocando rodamientos que ayudaran a deslizar el riel de mejor manera. Finalmente se obtuvieron ángulos de funcionamiento de casi  $20^\circ$  para cada lado.



### 5.1.6.- Análisis DFA Prototipo 1.0

Se realizó el análisis DFA al Prototipo 1.0 evaluándolo según la tabla presentada en la sección de antecedentes. Dicha tabla ya completada se muestra en el Anexo C, y sus resultados principales se muestran a continuación:

- Número total de piezas =	50
- Número total de interfases entre piezas =	78
- Partes mínimas teóricas =	15
- Partes mínimas prácticas =	17
- Eficiencia del diseño =	30%
- Complejidad DFA =	62,45

El conteo de piezas e interfases, junto con el análisis de las partes mínimas teóricas y prácticas es muy útil para determinar tanto cuantitativa como cualitativamente la calidad del diseño realizado. En particular este primer prototipo se encuentra lejano de lo que podemos llamar un diseño óptimo, llegando solo a un 30% de eficiencia, la mitad del 60% objetivo que se busca. También es importante calcular el resto de las métricas presentadas en la sección de antecedentes (índices de oportunidades de calidad, manejo, inserción y operaciones secundarias), que nos servirán para comparar los prototipos y evaluar cuantitativamente la mejora en el diseño.

- Índice de pruebas de errores =	0,40
o Parte errónea / omitir parte: 2 Sí	
o Armado erróneo: 4 Sí	
- Índice de manejo manual =	0,47
o Enredo / anidado / se pega: 5 Sí	
o Flexible / frágil / afilado / resbala: 2 Sí	
o Alicata / pinza / lupa: 0 Sí	
- Índice de inserción =	2,13
o Dificultad de alinear / alocar: 10 Sí	
o Afirmado requerido: 9 Sí	
o Resistencia a inserción: 12 Sí	
o Acceso o visibilidad limitada: 1 Sí	
- Índice de operaciones secundarias =	2,53
o Pieza de trabajo reorientada: 4 Sí	
o Atornillar / taladrar / girar / remachar / doblar / crimpear: 13 Sí	
o Soldado / pegado: 15 Sí	
o Pintado / lubricado / calentado / aplicación líquida o gaseosa: 2 Sí	
o Testear / medir / ajustar: 4 Sí	

### 5.1.7.- Recomendaciones de mejora Prototipo 1.0

- La primera recomendación clave para el diseño del segundo prototipo es lograr que el riel secundario sea montado de manera que se mueva solidario al giro del eje pivote central. Esto arreglará el problema de desalineamiento del riel ya que siempre funcionará en el mismo ángulo respecto al marco del espejo. La dificultad que esto trae es que todo el sistema de transmisión también debe ir solidario al movimiento, no pudiendo dejarse fijo sobre una base externa al marco, como se hacía en el Prototipo 1.0.

- Es necesario agregar un tensor de cadena para ambos ejes de transmisión, así se disminuirán los problemas que trae la tensión variable de la cadena en caso de que el riel no quede perfectamente alineado respecto del eje de giro correspondiente.
- Se recomienda disminuir el diámetro de los rieles con la adición de las cajas reductoras a ambos ejes de la transmisión. Esto nos llevará a un diseño más compacto, con piezas más pequeñas y por lo tanto de menor costo.
- Apuntar hacia un diseño modular del heliostato, ojalá en 3 conjuntos independientes: base de apoyo, sistema de transmisión y marco-espejo. Esto ayudará con la facilidad de ensamblaje y reemplazo de piezas en caso de ser necesario frente a la falla de algún componente.

## **5.2.- Prototipo 2.0**

### **5.2.1.- Cálculos generales Prototipo 2.0**

Para la base de los cálculos de las piezas mecánicas se utilizó una velocidad del viento de 80[km/h] como dato para iniciar los cálculos. A partir de esto se calculó la fuerza que ejerce el viento sobre la superficie del espejo de 6,6[m<sup>2</sup>] que se utilizará, junto con el resto de los parámetros de diseño que se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Parámetros de diseño Prototipo 2.0. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Parámetro</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad de medida</b>
Área espejo	6,61	m <sup>2</sup>
Coefficiente de diseño	1,162	-
Velocidad viento	80 (23)	Km/h (m/s)

Con estos datos se calculan las cargas a las cuales estará sometida nuestra estructura, junto con las tensiones en cadenas y los torques necesarios en motores para mover el heliostato. Además, para este prototipo se agregaron los cálculos de pernos de anclaje para su fijación a piso. El resultado de estos cálculos se resume en la Tabla 6. El detalle de los cálculos realizados se adjunta en el Anexo D.

**Tabla 6:** Resultados cálculos de piezas mecánicas Prototipo 2.0. Fuente: Elaboración Propia.

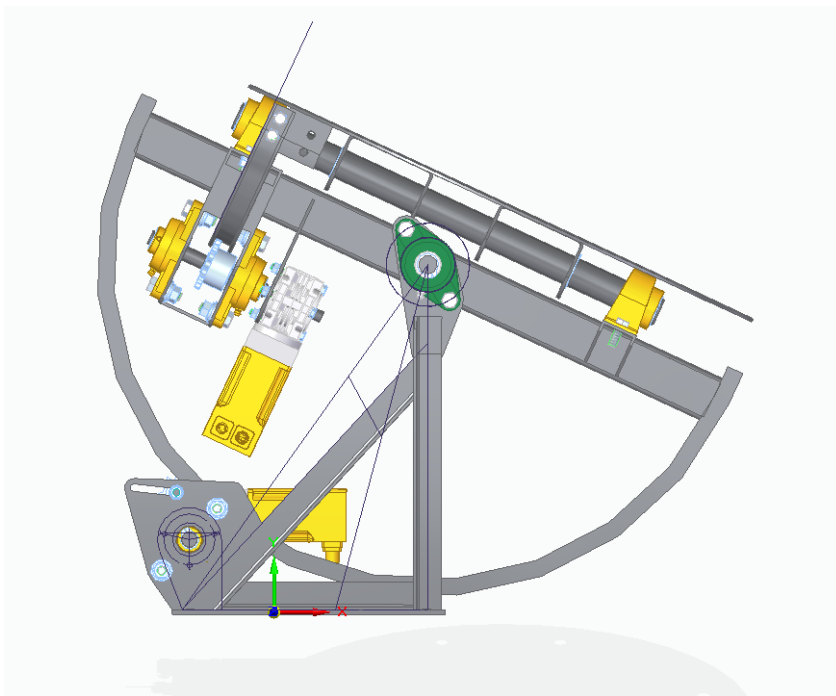
<b>Variable</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidad de medida</b>
Fuerza del viento	4,782	kN
Diámetro mínimo eje pivote pitch	21	mm
Diámetro mínimo eje pivote roll	32	mm
Espesor mínimo planchas rodamiento	3	mm
Tensión en cadena	566,132	N
Torque mínimo motor	0,489 (con caja reductora 1:30)	Nm
Diámetro mínimo eje motriz pitch	16	mm
Diámetro mínimo eje motriz roll	13	mm

### 5.2.2.- Diseño CAD Prototipo 2.0

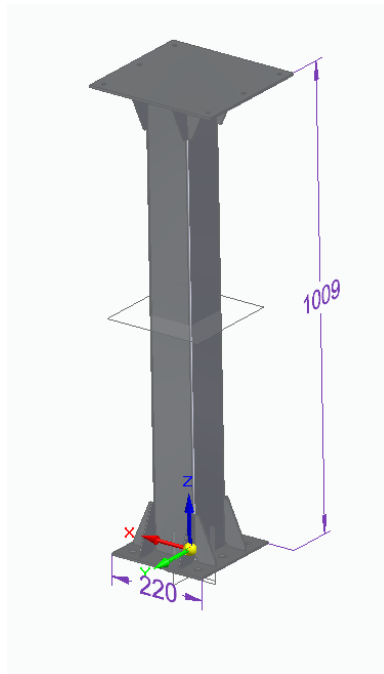
El diseño CAD realizado para este Prototipo 2.0 fue realizado en conjunto con el Ingeniero de Enerbosch Rodrigo Miranda. En particular el aporte personal en esta etapa fue la de feedback y el conocimiento adquirido luego del diseño, construcción y pruebas realizadas al Prototipo 1.0. Los hallazgos encontrados fueron claves para lograr el diseño de este nuevo prototipo, en el cual no se querían repetir los errores hechos en la iteración anterior.

En particular algunas mejoras sustanciales realizadas en este nuevo prototipo fue la adición de un eje pivote para el roll, lo cual le da la libertad al riel secundario de moverse solidario al giro del perfil pivote del pitch manteniendo la libertad de movimiento en ambos ejes. Además, se observa una notoria disminución en las medidas de los rieles gracias a la adición de una caja de reducción en la transmisión.

Además, se logró un diseño modular donde se ve claramente la existencia de un pilar principal que se fija a la base mediante pernos a la base que sostiene todo el sistema de transmisión, el cual también es independiente del marco del espejo. Este marco aún está en diseño y será agregado a un futuro prototipo del heliostato. Los modelos CAD del diseño final de este Prototipo 2.0 se observa en las Figuras 35 y 36.

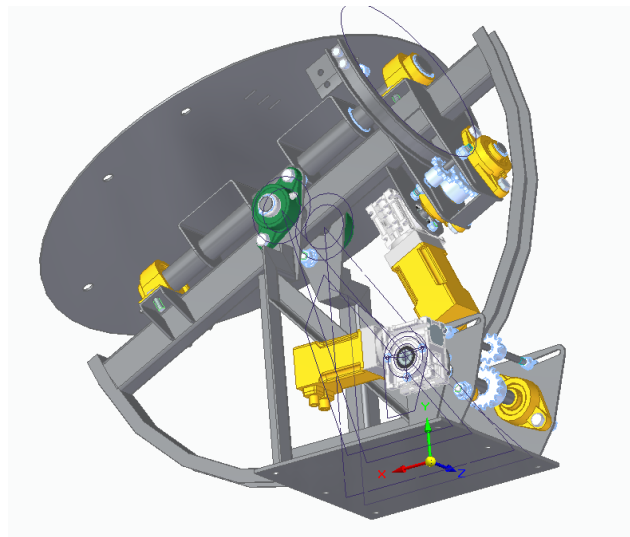


**Figura 35:** Vista lateral CAD módulo de transmisión Prototipo 2.0.



**Figura 36:** Vista general CAD pilar de apoyo base Prototipo 2.0.

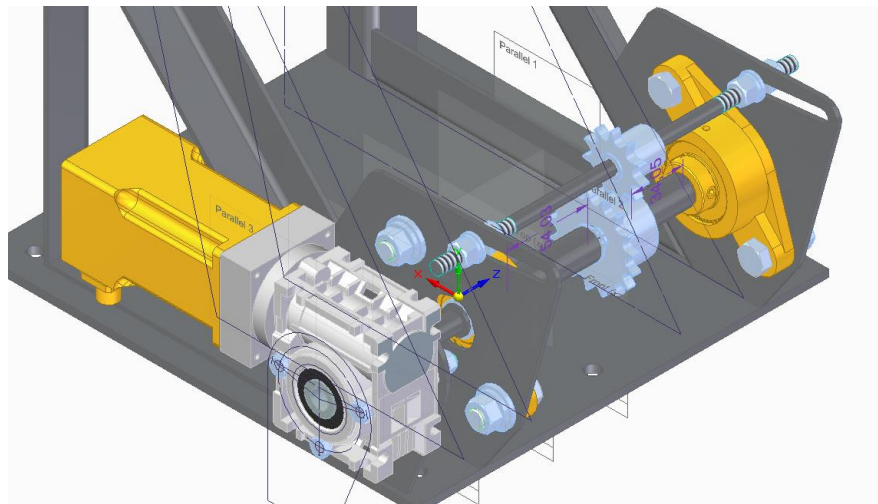
En la Figura 37 se observa más claramente el módulo de transmisión completo, el cual es completamente independiente del perfil base y del marco de aluminio. Esta modularidad es un avance muy importante ya que logra estandarizar algunas piezas y permite un reemplazo de componente mucho más rápido y eficiente, e incluso podría reemplazarse un módulo completo de ser necesario.



**Figura 37:** Vista diagonal CAD módulo de transmisión Prototipo 2.0.

Este nuevo sistema de transmisión (Figura 38) ahora está compuesto por un motor stepper más pequeño que el utilizado en el Prototipo 1.0, pero que gracias a la caja reductora logra entregar el toque necesario para mover toda la estructura. Además, se observa la adición de otro eje con un tensor para evitar pérdidas o excesos de tensión en la cadena. Por lo demás el funcionamiento de esta transmisión es muy similar al del primer prototipo, con un riel y su correspondiente cadena para cada uno de los ejes de movimiento. Lo interesante de observar ahora es el montaje de la transmisión del riel secundario, la cual está acoplada al perfil de pivote central el cual a su vez tiene

montados los rodamientos que sostienen el nuevo eje de giro de roll el cual sostiene la base del marco del espejo. Es un diseño más complejo, pero logra el cometido de movimiento en 2 ejes independientes con un diseño compacto. Los planos constructivos de este prototipo se adjuntan en el Anexo E.



**Figura 38:** Detalle CAD sistema de transmisión Prototipo 2.0.

### 5.2.3.- Fase de construcción Prototipo 2.0

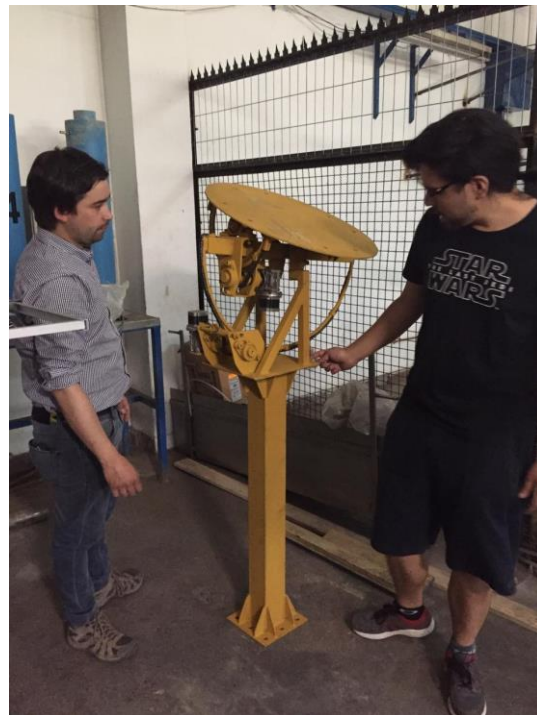
La construcción del Prototipo 2.0 fue externalizada a la maestranza Arizmendi Ltda., empresa que se dedica a la ingeniería y construcción de estructuras metálicas. En las figuras 39 Y 40 se muestran las etapas de construcción y pintado del mecanismo de transmisión.



**Figura 39:** Fase constructiva externalizada Prototipo 2.0.



**Figura 40:** Etapa de aplicación de pintura anticorrosiva Prototipo 2.0.



**Figura 41:** Prototipo 2.0 entregado en el Taller de Molina.

En la Figura 41 se observa el mecanismo ya entregado en el Taller de Molina. Se puede observar que el módulo de transmisión es bastante compacto, lo cual da facilidad de instalación y de transporte hacia cualquier lugar.

Sin embargo, a pesar de que el heliostato tiene un buen aspecto, en el detalle no fue lo esperado. Por ejemplo, los perfiles utilizados para la construcción un fueron los que fueron especificados en los planos de fabricación entregados a la maestranza. Los perfiles laterales son cuadrados en vez de ser perfil tipo L, los rieles no son perfiles acanalados como se solicitó, sino que son perfiles redondos con guías para que no se caiga la cadena. Los ejes fueron hechos a partir de algún material de desecho, ya que fueron hechos en partes e incluso tienen sección hexagonal en algunos tramos, etc. En resumen, la maestranza abarató costos utilizando materiales que tenían almacenados o que iban a ser desechados, lo cual tuvo un impacto directo en la calidad del trabajo. Esto sin contar otros problemas de construcción en chavetas, bujes y soldaduras que serán detallados en la sección de hallazgos. Todo esto dejó bastante disconforme a los miembros del proyecto SolarBosch, aunque de todas maneras el heliostato es funcional y cumple con los requerimientos mínimos solicitados, por lo cual de todas maneras se utilizó para pruebas externas.



**Figura 42:** Fabricación e instalación de marco para espejo de 1[m<sup>2</sup>] para Prototipo 2.0.



**Figura 43:** Espejo OptiWhite ya instalado en Prototipo 2.0.

Para logra realizar pruebas exitosas, se acopló un pequeño marco de acero para la instalación de un espejo de 1[m<sup>2</sup>] que fue solicitado especialmente a Vidrios Lirquén. Este es un espejo de aplicaciones especiales modelo OptiWhite de 3 mm de espesor, con una reflectividad que puede alcanzar el 94%. Este espejo sirvió para realizar pruebas en un nuevo objetivo instalado en el Taller de Molina, ahora de 3x3 metros, doblando las dimensiones que tenía el objetivo anterior. Además, el Prototipo 2.0 fue presentado durante el seminario de Tecnologías Solares que se realizó en la facultad el día 7 de diciembre.

#### 5.2.4.- Pruebas de funcionamiento Prototipo 2.0



**Figura 44:** Primeras pruebas de funcionamiento con nuevo objetivo Prototipo 2.0.





**Figura 45:** Primeras pruebas de funcionamiento con nuevo objetivo Prototipo 2.0.

A pesar de los problemas constructivos que presentó el Prototipo 2.0 las pruebas de funcionamiento fueron muy satisfactorias. Se logró tener una precisión de movimiento de  $0,00246[^\circ/\text{step}]$  para el ángulo de pitch y  $0,00702[^\circ/\text{step}]$  para el ángulo de roll. Esto significa una mejora de 30 veces en la precisión de movimiento para el pitch y de 10 veces para el roll. Además, los ángulos de funcionamiento lograron superar los  $45^\circ$  en el movimiento del eje de roll para cualquier ángulo de pitch (excepto para  $0^\circ$  de pitch donde se encontró una interferencia mecánica con los rodamientos del eje pivote central, pero no es importante ya que es la posición de abatimiento del heliostato).

Teniendo todas las partes y piezas bien ajustadas se logró un funcionamiento continuo e incluso se hizo un seguimiento del sol por bastante tiempo con un error acumulado que, aunque apreciable, daba buenas luces de que el sistema funciona correctamente y de que es solo seguir con las pruebas para ir disminuyendo este error.

#### **5.2.5.- Hallazgos Prototipo 2.0**

- Chavetas de caja reductora mal fabricadas (chavetero eje y chaveta muy pequeña), lo cual genera juego en ambos ejes de movimiento, mucho más notorio en roll, con un error que podía llegar a ser de casi 1 metro. Esto puede solucionarse removiendo las chavetas actuales y maquinando nuevamente el eje de transmisión para que el chavetero tenga la misma medida que el chavetero del eje de la caja reductora.
- Bujes de eje pivote pitch muy cortos, lo que genera que el perfil central se mueva lateralmente, con posible pérdida de calibración. Esto puede solucionarse fabricando nuevos bujes o agregando una golilla para eliminar el juego presente.
- Problema de tensión variable de cadena pitch, lo cual se debe a que el perfil y el riel guía no están perfectamente centrados respecto al eje de giro, generando problemas de tensión extrema al llegar al final de recorrido (se pierde vida útil cadena y se puede trabar el mecanismo).
- Imposible desmontar motor sin desmontar todo el sistema incluyendo caja reductora, lo cual es engorroso en caso de querer reemplazar solo el motor o desmontar ciertas partes.
- Faltan más guías de cadena pitch, se cae la cadena en ciertos momentos. Esto pudo evitarse utilizando un perfil acanalado para la construcción como fue solicitado desde un principio.
- Falta definir espacio para elementos eléctricos y pulsador fin de carrera, lo cual se solucionó instalando una pequeña caja de elementos eléctricos.
- Soldaduras no rematadas, estructura tiende a deformarse en la zona del pivote del eje de pitch.

### 5.2.6.- Análisis DFA Prototipo 2.0

Se realizó el análisis DFA al Prototipo 2.0 evaluándolo según la tabla presentada en la sección de antecedentes. Dicha tabla ya completada se muestra en el Anexo F, y sus resultados principales se muestran a continuación:

- Número total de piezas = 48
- Número total de interfases entre piezas = 107
- Partes mínimas teóricas = 22
- Partes mínimas prácticas = 27
- Eficiencia del diseño = 46%
- Complejidad DFA = 71,67

El conteo de piezas e interfases, junto con el análisis de las partes mínimas teóricas y prácticas es muy útil para determinar tanto cuantitativa como cualitativamente la calidad del diseño realizado. Aunque se disminuyó ligeramente el número de piezas, la mayor complejidad de este nuevo mecanismo (que incorpora varias mejoras y cualidades que el Prototipo 1.0 no posee) la cantidad de interfases aumentó considerablemente, debido a las mayores relaciones entre componentes para lograr el preciso movimiento que se requiere. A pesar de esto, es importante notar la gran mejora en la eficiencia de diseño lograda, llegando a un 46%, mejorando en un 50% la eficiencia respecto al primer prototipo.

También es importante calcular el resto de las métricas presentadas en la sección de antecedentes (índices de oportunidades de calidad, manejo, inserción y operaciones secundarias), que nos servirán para comparar los prototipos y evaluar cuantitativamente la mejora en el diseño.

- Índice de pruebas de errores = 0,73
  - o Parte errónea / omitir parte: 5 Sí
  - o Armado erróneo: 11 Sí
- Índice de manejo manual = 0,45
  - o Enredo / anidado / se pega: 5 Sí
  - o Flexible / frágil / afilado / resbala: 3 Sí
  - o Alicata / pinza / lupa: 2 Sí
- Índice de inserción = 2,50
  - o Dificultad de alinear / alocar: 13 Sí
  - o Afirmado requerido: 16 Sí
  - o Resistencia a inserción: 14 Sí
  - o Acceso o visibilidad limitada: 12 Sí
- Índice de operaciones secundarias = 2,09
  - o Pieza de trabajo reorientada: 7 Sí
  - o Atornillar / taladrar / girar / remachar / doblar / crimpear: 13 Sí
  - o Soldado / pegado: 18 Sí
  - o Pintado / lubricado / calentado / aplicación líquida o gaseosa: 0 Sí
  - o Testear / medir / ajustar: 8 Sí

Con estos datos podemos comparar cuantitativamente las mejoras hechas al diseño, además del análisis cualitativo que se hizo a las nuevas funciones y propiedades del Prototipo 2.0 en comparación con el 1.0. Los índices de oportunidad nos dicen algunas cosas: el manejo manual de partes y piezas es similar en ambos diseños, pero el mayor número de interfases y el aumento en complejidad hace que la probabilidad de ensamblar u omitir alguna pieza sea mayor en el segundo prototipo, de ahí un mayor índice de prueba de errores.

También se observa que el índice de inserción es mayor debido a la mayor cantidad de piezas que requieren algún afirmado extra para su ensamble, o también un mayor número de piezas con acceso o visibilidad limitada. Por otro lado, se observa una pequeña disminución en el índice de operaciones secundarias, lo cual es un aspecto positivo debido a que este tipo de procesos son los que conllevan la mayor cantidad de costos debido a que requieren más cantidad de HH para su finalización.

### 5.2.7.- Análisis DFM Prototipo 2.0

Luego de realizar los análisis cualitativos y cuantitativos con los datos entregados por la metodología DFA aplicada, se procede a realizar el análisis de procesos de manufactura involucrados en la fabricación del Prototipo 2.0. La fabricación de este prototipo realizada por la Maestría Arizmendi tuvo un costo total de casi CLP1.200.000.-, doblando el costo objetivo que se tiene para el heliostato. Es claro que en esta etapa de prototipado es virtualmente imposible bajar drásticamente los costos, por lo que este análisis será muy útil para las siguientes iteraciones del diseño y definición de procesos de manufactura.

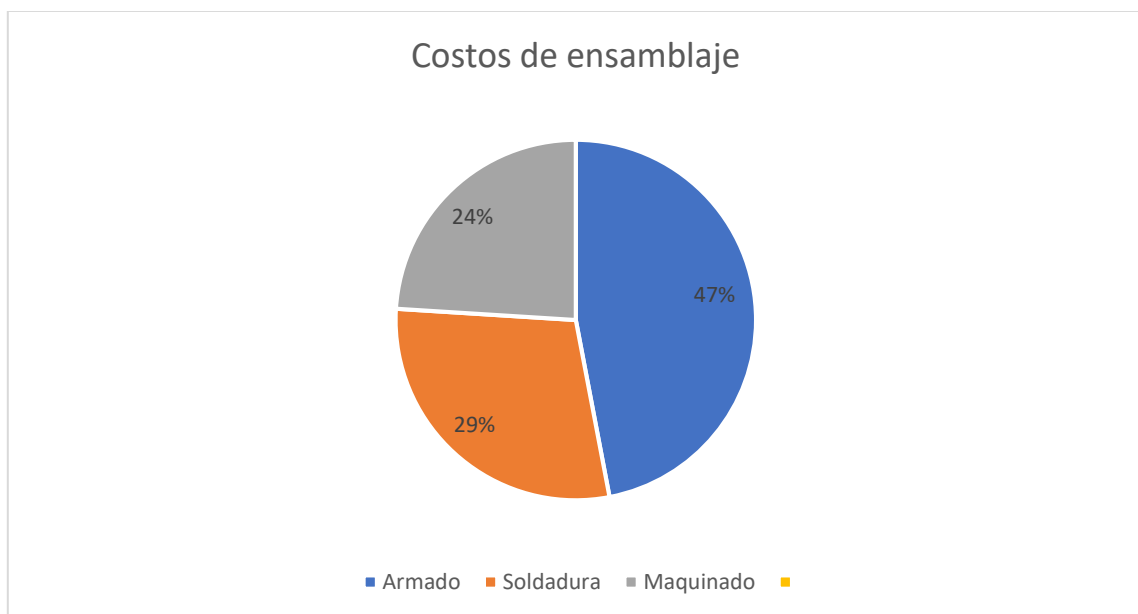
**Tabla 7:** Procesos de manufactura asociados a cada pieza del Prototipo 2.0. Fuente: Elaboración Propia.

PARTE O PIEZA	MATE- RIAL	SIERRA	TORNO	FRESA	CORTE LÁSER	PERFO- RACIÓN	SOLDA DURA	OTRO
Base heliostato					S	S	S	
Placa sop rod eje pitch			S		S	S	S	
Rodamiento eje pitch	C							
Eje torque pitch		S	S					
Eje tensor pitch		S	S					
Piñón torque pitch	C							
Piñón tensor pitch	C							
Placa soporte motor pitch					S	S	S	
Arco pitch		S				S	S	S
Cadena pitch	C							
Agarre cadena	C							
Pasador agarre cadena	C							
Cuadro horizontal		S					S	
Cuadro diagonal		S					S	
Cuadro vertical 1		S					S	
Cuadro vertical 2		S					S	
Cuadro vertical 3		S					S	
Placa soporte rodamiento eje giro		S				S	S	
Rodamiento eje giro	C							
Eje giro pitch		S	S					
Buje ajuste eje giro		S	S			S		
Perfil soporte arco		S				S	S	
Eje giro roll		S	S					
Soporte roll					S	S	S	
Oreja soporte roll					S	S	S	
Rodamiento giro roll	C							
Placa soporte rodamiento giro roll					S	S	S	

Arco roll		S				S	S	S
Cadena roll	C							
Placa arco roll soporte					S	S	S	
Placa sop rod eje roll					S	S	S	
Placa apoyo soporte rod eje roll					S		S	
Rodamiento eje roll	C							
Eje torque roll		S	S					
Eje tensor roll		S	S					
Piñón torque roll	C							
Piñón tensor roll	C							
Placa soporte motor roll					S	S	S	
SUMA TOTAL		16	8	0	10	14	19	2

Se observa que los 3 procesos más utilizados son (en orden de cantidad): proceso de soldadura, proceso de corte en sierra, proceso de perforación. La necesidad de trabajo en torno no involucra una gran cantidad de piezas, pero la fabricación de cada parte es un trabajo de bastante tiempo, precisión y experiencia del encargado de la fabricación, pero estos costos no suelen ser tan elevados. También hay un alto número de soldaduras lo que puede indicar que se llevan gran parte de los costos de fabricación, debido a la gran cantidad de HH que este proceso involucra, además de la necesidad de una persona calificada para hacer este tipo de trabajo. En particular para el Prototipo 2.0 se obtuvieron los costos según ítem de ensamblaje (teniendo las piezas ya cortadas), también mostrados según su porcentaje en la Figura 46:

- Armado: \$160.000.-
- Soldadura: \$100.000.-
- Maquinado: \$80.000.-



**Figura 46:** Costos de ensamblaje Prototipo 2.0.

Estos datos nos muestran la influencia del costo del armado y soldadura en el ensamblaje del heliostato. Disminuir el número de uniones y piezas es fundamental para disminuir los costos. Con esto también es necesario disminuir la cantidad de soldaduras a realizar como proceso secundario y disminuir la cantidad de material a maquinar en torno si es posible, pero estos diámetros son valores ya establecidos por los esfuerzos en los ejes de torque.

Es necesario incluir procesos de manufactura que disminuyan el número de piezas (partes dobladas que eliminen puntos de soldadura, o piezas ensambladas con snap-fit o autoalocantes) o por ejemplo intentar fundir los perfiles de rotación principales junto a los soportes de rodamiento. Finalmente disminuir al mínimo diámetros y medidas de los ejes de transmisión y de pivote. El fin de esto es buscar estrategias de manufactura que apunten a la fabricación de piezas en grandes cantidades para la planta de prueba o la planta final del proyecto SolarBosch, con un objetivo de 300 heliostatos en un principio.

### **5.2.8.- Recomendaciones de mejora Prototipo 2.0**

- Diseño horizontal rodamientos eje de torque pitch, disminuyendo el uso de material (los ejes de torque y tensión podrían bajar un poco en su posición).
- Unificación componentes de cuadro lateral (está separado en 4 partes), de manera de crear 1 sola pieza incluyendo la placa soporte para el rodamiento central.
- Componente de cuadro diagonal podría interferir con el giro del motor de roll.
- Disminuir largo ejes de torque y tensión pitch, de manera que el encuadre quede en el ancho del eje central (disminuye largo de material y número de piezas).
- Disminuir ancho de rieles al mínimo de acuerdo con la cadena que se utilizará.
- Eje de roll-soporte excesivamente grande en largo y diámetro, se podría hacer una oreja central y acercar los rodamientos acortando el eje (verificar interferencia con motor).
- Disminuir tamaño soporte roll, plancha muy grande y cara de fabricar.
- Disminuir tamaño perfil central dentro de lo posible (comparar disminución de ancho vs aumento de espesor y viceversa).
- Eliminar placas de apoyo en la placa de soporte de transmisión de roll, e intentar su fabricación en una sola pieza doblada.
- Intentar independizar arco pitch de perfil central (desmontable), para no tener problemas con el armado posterior si la pieza es primero soldada.
- Mejorar agarre arco roll a soporte roll, pieza podría disminuir dimensiones.

Todas estas recomendaciones buscan la disminución del número de piezas totales y también evitar utilizar en exceso procesos de manufactura costosos como lo son la soldadura (muchas HH y necesidad de personal especializado), disminuyendo los costos de armado y uso de procesos secundarios. El objetivo es diseñar módulos con la menor cantidad de piezas posible: una base

plegada que sostenga el eje de rotación del pitch con la transmisión de dicho eje, y el perfil de rotación de pitch fundido. Aunque los moldes para realizar estos procesos son costosos, debido a la gran cantidad de unidades a la larga será más barato que los costos por hora-hombre si la manufactura es realizada con los procesos tradicionales.

Finalmente hay que comentar que se han fabricado 2 prototipos adicionales a la fecha, con una estructura similar al 2.0 pero con algunas variaciones: el primero utiliza cremallera y piñón en vez de riel y cadena, disminuyendo piezas, pero con un costo de construcción mayor (superó los 1.8 millones de pesos) mientras que el segundo elimina completamente los rieles acoplando motores más grandes directamente a los ejes de transmisión. Este enfoque es la evolución esperada del helióstato, disminuyendo el número de piezas, la complejidad y los costos de fabricación. Los planos del sistema de transmisión de ambas variaciones se muestran en el Anexo G.

## **6.- Conclusiones y recomendaciones finales**

Con el desarrollo de este proyecto ha quedado claro que sin un buen proceso de diseño es muy difícil crear productos que logren tener valor o que destaquen en algún aspecto sobre otro producto competidor. Es importante comprometer recursos desde las etapas iniciales del diseño, ya que este enfoque ayudará a disminuir la totalidad de los costos y además se tendrán análisis cualitativos y cuantitativos de la calidad del diseño y de las mejoras hechas. Incorporando la metodología DFMA se pueden obtener diseños mucho más simples, con un menor número de piezas y disminuyendo tanto costos como tiempos y dificultad de ensamblaje.

También hay que destacar que la fase de prototipado, aunque adelantada en relación con lo que dice la metodología, fue clave para encontrar errores y problemas en el diseño que es difícil apreciar en los modelos computacionales. Al ser una memoria de innovación, hay pocos referentes en el mercado de donde sacar ideas y modelos, por lo que era necesario fabricar prototipos no muy complejos para validar las suposiciones iniciales, como son la elección del sistema de movimiento y los códigos de control y seguimiento.

Por ello la fabricación del Prototipo 1.0 fue clave en el desarrollo temprano del proyecto, cuya construcción comenzó aproximadamente en el mes de abril del 2018 y tuvo una duración de aproximadamente 2 meses. Con este heliostato se hicieron pruebas en el interior del Taller de Molina ya que en las fechas que fue construido la radiación era baja y había constante peligro de lluvias. Se le acopló un láser para simular el apuntamiento, con lo cual se pudo controlar la repetibilidad de movimiento e ir ajustando los códigos de seguimiento.

En un comienzo el funcionamiento del prototipo fue irregular; constantemente se salía la cadena del piñón del eje de roll y el motor stepper tendía a perder pasos si la tensión en la cadena era demasiada (esta variaba por problemas de construcción). Pero poco a poco se fueron añadiendo más elementos, ajustando las piezas y conociendo cada vez más la mecánica del sistema, y finalmente se logró tener un heliostato confiable en su movimiento (con una precisión de centésimas de grado por step del motor) pero no tan robusto, con un marco que se deformaba en exceso con el movimiento del heliostato. Se pretendía reemplazar el marco de perfiles de aluminio por uno más robusto y que fuera capaz de soportar el espejo de 1,5[m<sup>2</sup>], pero debido a la dificultad en esos momentos de conseguir un espejo especial de ese tamaño se decidió utilizar los espejos pequeños en las esquinas, los cuales fueron suficientes para realizar las pruebas en el exterior una vez que llegó el buen tiempo hacia el último trimestre del 2018. Es por esto y que además las piezas fueron calculadas para una velocidad de viento de 80[km/h] es que algunos elementos de este prototipo (ejes, rodamientos y pilar principal) quedaron bastante sobredimensionados, lo cual en sí tampoco es algo malo para un prototipo.

La observación y análisis del primer prototipo no solo ayudó a saber que hacer de cara al diseño del segundo prototipo, sino que lo más importante fue el aprender que cosas no repetir, lo cual da lineamientos de que piezas son las más importantes o críticas de diseñar para esta iteración. Las mejoras más importantes del Prototipo 2.0 fue la modificación del riel secundario de manera que su movimiento fuera solidario al marco, además del montaje de su sistema de transmisión sobre este mismo riel. Este fue el desafío más complejo en esta etapa, ya que arreglando este problema se evitarían los problemas de deformación del marco debido a las fuerzas que el riel genera sobre el marco si no trabaja en concordancia con él. También una mejora importante fue la adición de la caja reductora a la transmisión: esto permitió la disminución de las dimensiones de los rieles y los motores debido a que la caja multiplica el torque entregado por 30 veces. Esta disminución en las dimensiones de la transmisión ayudó también a lograr la modularidad del diseño, donde se

observan claramente 3 partes principales del heliostato: el pilar de base, el conjunto de transmisión y el sistema marco-espejo.

Para complementar, el análisis de las métricas de la metodología DFMA nos da elementos tanto cualitativos como cuantitativos para medir la evolución y mejoras en el diseño. Mientras que el Prototipo 1.0 tiene una complejidad DFA de 62,45, con 50 piezas, 78 interfases entre piezas y una eficiencia de diseño de 30%, el Prototipo 2.0 tiene una complejidad DFA de 71,67, con 48 piezas, 107 interfases entre piezas y una eficiencia de diseño del 46%. La complejidad se vio aumentada debido a las mejoras sustanciales que se hicieron de un prototipo a otro, y aun así no fueron ni siquiera 10 puntos de aumento a pesar de todos los cambios realizados. Aun así, con la adición de todas estas mejoras la cantidad de piezas no comerciales disminuyó en 2, pero lo más importante es la mejora en un 50% de la eficiencia de diseño (del 30 al 46%), lo cual es un indicador importante y muy positivo para ser la primera iteración del producto.

El único punto bajo que se tuvo con respecto al Prototipo 2.0 fue la pobre calidad de la fabricación del prototipo; chaveteros y chavetas mal hechos lo cual genera errores en las mediciones y en el movimiento del heliostato, bujes muy cortos que generaban juego y por ende pérdida de calibración general, soldaduras no rematadas y los materiales utilizados no correspondían a los solicitados y especificados en los planos de fabricación entregados. Se notó la falta de experiencia de la maestranza en la fabricación de mecanismos, ya que su especialización es la fabricación de estructuras. Además, los plazos de entrega no fueron cumplidos, ya que en un principio se había pactado para los primeros días de noviembre y terminó llegando al taller después del 20 del mismo mes.

A pesar de los problemas de construcción el Prototipo 2.0 tiene un funcionamiento aceptable, con una precisión de movimiento 10 veces mayor que el primer prototipo, con un movimiento más fluido gracias a la caja de reducción y un mejor control de tensión de las cadenas gracias al sistema de tensores agregado en esta iteración. Además, es un modelo modular, más compacto y robusto que el primero, e incluso fue pintado con pintura anticorrosiva para aguantar el clima de exterior. Aunque destacamos que este segundo prototipo cumplió su objetivo para el desarrollo de pruebas de funcionamiento mecánico-eléctrico (tanto en interior como en exterior), se puede concluir que para el costo que tuvo (casi 1.2 millones de pesos chilenos) y el tiempo que demoró su construcción podría haber sido un trabajo de mucha mayor calidad y precisión, que es uno de los puntos más importantes del heliostato para la no pérdida de calibración y un seguimiento exacto de la radiación solar.

En adición al análisis de ensamble es importante destacar el análisis de procesos de manufactura que debe realizarse al diseño. En esta primera etapa de prototipado es muy difícil lograr reducir costos y controlar de mayor manera los procesos de manufactura a realizar, ya que al ser un número reducido de piezas estas se fabrican con métodos clásicos como el uso de torno, sierra y soldadura manual. El análisis DFM concluyó que el diseño posee una gran cantidad de perfiles unidos con soldaduras y bastante mecanizado de ejes, lo cual son los procesos más costosos debido a la cantidad de horas hombre y personal especializado que se necesita. Debido a esto es que el diseño futuro debe apuntar a disminuir este tipo de fabricaciones, apuntando a la fabricación de grandes números de piezas con el objetivo de la planta final que tendrá 300 heliostatos. Es por esto es por lo que hay que comenzar a pensar y diseñar un heliostato de menores piezas, involucrando procesos como el doblado de planchas para hacer las bases, fundido de ejes junto a los descansos de rodamientos o uniones autoalocantes. Esto puede disminuir notoriamente los costos y tiempos de manufactura y ensamblaje de los heliostatos, los cuales deben ser estimados para comparar efectivamente con números las mejoras del diseño. La disminución de procesos



secundarios de armado y soldadura (y las horas-hombre involucradas) es clave para la disminución de costos del heliostato y con ello lograr una planta económicamente viable.

Como conclusión hay que destacar que los análisis de la metodología DFMA han sido muy útiles para la mejora de los diseños y adicionar nuevas ideas y enfoques en el proceso creativo. Siempre es positivo crear diseños eficientes, con poco uso de material y de bajo costo para lograr ser un actor competitivo en cualquier tipo de mercado e industria, y en particular para el proyecto SolarBosch los datos indican que aún hay espacio para la mejora de nuestro diseño de heliostato, por lo cual es necesario seguir iterando e involucrando esta metodología no solo en este proyecto, sino que en cualquier otro. Es claro que la energía solar es el futuro de nuestro país, por lo cual ser partícipe de la evolución de este desafiante proyecto es muy motivador de cara a lo que se viene, y espero que otros actores sean capaces de innovar e involucrarse en la creación y fabricación de nuevas tecnologías ERNC en Chile.

## **7.- Bibliografía**

- [1] Reporte Mensual ERNC, CNE, diciembre 2017.
- [2] Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía.  
<http://energiaabierta.cl/visualizaciones/generacion-bruta-ernc/>
- [3] Revista Electricidad.  
[www.revistaei.cl/2018/01/30/gobierno-acuerda-mayores-generadoras-fin-las-plantas-carbon-cronograma-](http://www.revistaei.cl/2018/01/30/gobierno-acuerda-mayores-generadoras-fin-las-plantas-carbon-cronograma-)
- [4] Proyecciones de consumo energético de Chile. Fuente: Análisis del consumo eléctrico en el corto, mediano y largo plazo, MEC, 2014.
- [5] Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), IASS Fact Sheet 2/2016 Concentrated Solar Power, 2016.  
[https://www.researchgate.net/publication/315669289\\_Concentrated\\_Solar\\_Power\\_-\\_Fact\\_Sheet](https://www.researchgate.net/publication/315669289_Concentrated_Solar_Power_-_Fact_Sheet)
- [6] A. L. Ávila-Marín, “Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 891–910, 2011.
- [7] F Gomez-Garcia, J. González-Aguilar, G. Olalde, and M. Romero, “Thermal and hydrodynamic behavior of ceramic volumetric absorbers for central receiver solar power plants: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 648–658, 2016.
- [8] Explorador Solar DGF-UChile.  
<http://ernc.dgf.uchile.cl:48080>
- [9] G. Kolb, S. Jones, M. Donnelly, D. Gorman, R. Thomas, R. Davenport, R. Lumia (SANDIA Report 2007) - *Heliostat cost reduction study*, 2007.
- [10] J. Coventry, J. Pye (SolarPACES 2013) - *Heliostat cost reduction, where to now?*, 2013.
- [11] A. Fernández-García, F. Sutter, L. Martínez-Arcos, L. Valenzuela, C. Sansom - *Advanced mirror concepts for concentrating solar thermal systems*, 2017.
- [12] A. Phfal - *Determination of wind loads on heliostats (SolarPACES 2011)*, 2011.
- [13] JA. Peterka, N. Hosoya, B. Bienkiewicz, JE. Cermak - *Wind load reduction for heliostats*, 1986.
- [14] A. Phfal, M. Randt, C. Holze, S. Unterschütz - *Autonomous light-weight heliostat with rim drives*, 2013.
- [15] A. Phfal, M. Randt, F. Meier, M. Zschke, C.P.W. Geurts, M. Buselmeier - *A holistic approach for low cost heliostat fields (SolarPACES 2014)*, 2015.
- [16] D.G Ullman - *The mechanical design process*, Cuarta Edición (2010).
- [17] Fundación PRODINTEC – Guía Metodológica DFMA.
- [18] D. Stienstra – Presentación: Introduction to design for (cost effective) assembly and manufacturing.

[19] G. Boothroyd, P. Dewhurst - Product design for manufacture and assembling, Tercera Edición (2011).

[20] Universidad de Chile - *Explorador Eólico*, 2018.  
<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

[21] Norma Chilena Oficial NCh432.Of71  
*Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones*, 1971 (reedición 2010).

[22] Norma Chilena Oficial NCh433.Of1996  
*Diseño sísmico de edificios*, 1996 (reedición 2009).

## Anexos

### ANEXO A- Cálculo de piezas mecánicas Prototipo 1.0

- Cálculo fuerza viento y carga en espejo

$$v = 80 \text{ km/h} = 23 \text{ m/s} \quad | \quad A_e = 1,5 \text{ m}^2 \quad | \quad C_D = 1,162 \quad | \quad C = 1,2 \quad | \quad \rho_a = 1,225 \text{ kg/cm}^3$$

$$\text{Presión viento: } p = 1,22 * v^2 = 61,47 \text{ kgf/m}^2$$

$$\text{Fuerza base: } F_0 = p * A_e = 0,904 \text{ kN}$$

$$\text{Fuerza viento: } F_v = F_0 * C = 1,085 \text{ kN} = 110,646 \text{ kgf}$$

$$\text{Carga aerodinámica: } F_c = \frac{1}{2} A_e C_D \rho_a v^2 = 0,565 \text{ kN} = 57,589 \text{ kgf}$$

- Cálculo eje movimiento pitch y velocidad angular

$$\sigma_a = 1440 \text{ kgf/cm}^2 \quad | \quad E = 2039400 \text{ kgf/cm}^2 \quad | \quad l = 12,5 \text{ cm} \quad | \quad \delta_{ae} = 0,033 \text{ cm}$$

$$\text{Momento eje: } M_e = \frac{F_v * l}{4} = 345,769 \text{ kgf * cm}$$

$$W_e = \frac{M_e}{\sigma_a} = 0,24 \text{ cm}^3 \quad | \quad I_e = \frac{F_v * l^3}{48 * E * \delta_{ae}} = 0,067 \text{ cm}^4$$

Diámetro mínimo según momento e inercia:

$$\phi_e = \sqrt[3]{\frac{32 * W_e}{\pi}} = 13,473 \text{ mm} \quad | \quad \phi_i = \sqrt[3]{\frac{64 * I_e}{\pi}} = 10,805 \text{ mm}$$

Esto implica que el eje de rotación del pitch debe tener un diámetro mínimo de 14mm.

$$\text{Velocidad angular: } w = \frac{0,5 * \pi}{3 \text{ min}} = 0,009 \frac{1}{s} = 0,083 \text{ rpm} \quad | \quad r = 510 \text{ mm}$$

$$\text{Velocidad lineal: } V_h = w * r = 0,004 \text{ m/s}$$

- Cálculo espesor planchas rodamientos

$$d = 20 \text{ mm} \quad | \quad \varphi_a = 1,5 * \sigma_a$$

$$\text{Espesor plancha: } e = \frac{F_v}{2 * d * \varphi_a} = 0,128 \text{ mm}$$

Esto indica que se ocuparán planchas de 2mm de espesor mínimo.

- Cálculo tensión cadena, velocidad angular piñón y torque motor stepper

$$m_h = 10 \text{ kg} \quad | \quad d_1 = 1200 \text{ mm} \quad | \quad d_2 = 1000 \text{ mm} \quad | \quad d_3 = 20 \text{ mm}$$

$$d_0 = 20 \text{ mm} \quad \left| \quad \alpha = \frac{w^2}{\pi} = 0,00002 \frac{1}{s^2} \quad \right| \quad I = 172,88 \text{ kg} * \text{cm}^2$$

$$F_y = m_h * (g + \alpha * d_3) = 0,098 \text{ kN} = 10 \text{ kgf}$$

$$M = (F_y * d_3) + (I * \alpha) = 19,613 \text{ Nm} = 200 \text{ kgf} * \text{cm}$$

$$\text{Tensión cadena: } T_c = \frac{M}{d_2} = 19,613 \text{ N} = 2 \text{ kgf}$$

$$\text{Velocidad angular piñón: } r_s = 60 \text{ mm} \quad | \quad w_s = \frac{w * d_2}{r_s} = 1,389 \text{ rpm}$$

$$\text{Momento motor stepper: } M_s = T_c * r_s = 0,12 \text{ kgf} * \text{m} \quad | \quad i = 1$$

$$\text{Torque mínimo motor: } M_c = \frac{M_s}{i} = 0,12 \text{ kgf} * \text{m} = 1,177 \text{ Nm}$$

- Cálculo eje motriz pitch

$$\Delta T = 2 * T_c = 4 \text{ kgf} \quad | \quad l_p = 20 \text{ cm} \quad | \quad M_s = \frac{\Delta T * l_p}{4}$$

$$W_{sp} = \frac{M_s}{\sigma_a} = 0,014 \text{ cm}^3 \quad | \quad I_p = \frac{\Delta T * l_p^3}{48 * E * \delta_{ae}} = 0,01 \text{ cm}^4$$

Diámetro mínimo según momento e inercia:

$$\phi_{wp} = \sqrt[3]{\frac{32 * W_{sp}}{\pi}} = 5,211 \text{ mm} \quad | \quad \phi_{ip} = \sqrt[3]{\frac{64 * I_p}{\pi}} = 6,702 \text{ mm}$$

- Cálculo eje motriz roll

$$\Delta T = 2 * T_c = 4 \text{ kgf} \quad | \quad l_r = 17 \text{ cm} \quad | \quad M_s = \frac{\Delta T * l_r}{4}$$

$$W_{sp} = \frac{M_s}{\sigma_a} = 0,007 \text{ cm}^3 \quad | \quad I_p = \frac{\Delta T * l_r^3}{48 * E * \delta_{ae}} = 0,001 \text{ cm}^4$$

Diámetro mínimo según momento e inercia:

$$\phi_{wp} = \sqrt[3]{\frac{32 * W_{sp}}{\pi}} = 4,192 \text{ mm} \quad | \quad \phi_{ip} = \sqrt[3]{\frac{64 * I_p}{\pi}} = 4,026 \text{ mm}$$

Para realizar un análisis preliminar del diseño, se toman 2 elementos para realizar una simulación estática: el perfil central que soporta al marco y espejo y el pilar principal cuadrado. Además, se considera la base para un rediseño ya que se estima sobredimensionada para las cargas aplicadas. También se analizaron problemas geométricos presentes en el diseño, sobre todo en los lugares de anclaje de los rieles al marco y en la base de apoyo de la transmisión.

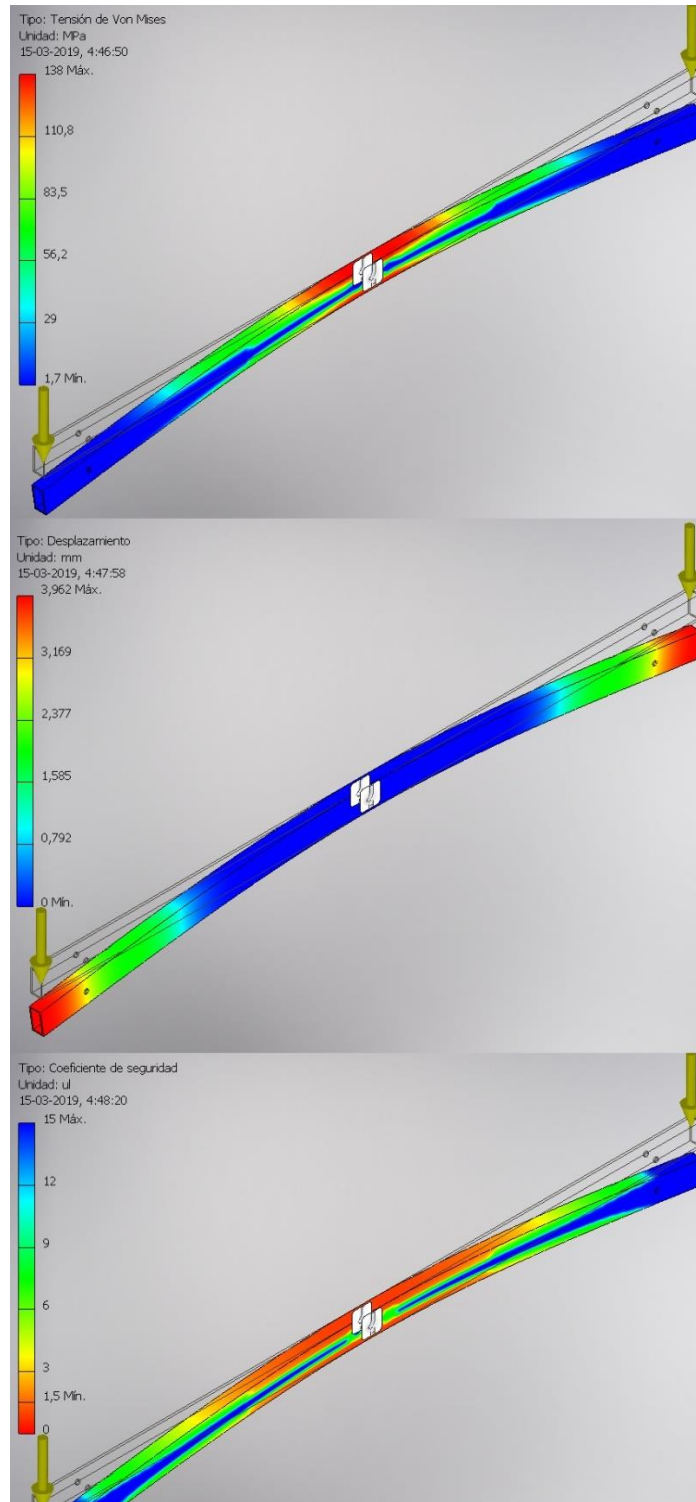


Figura A.1: Análisis de esfuerzo sobre perfil central.

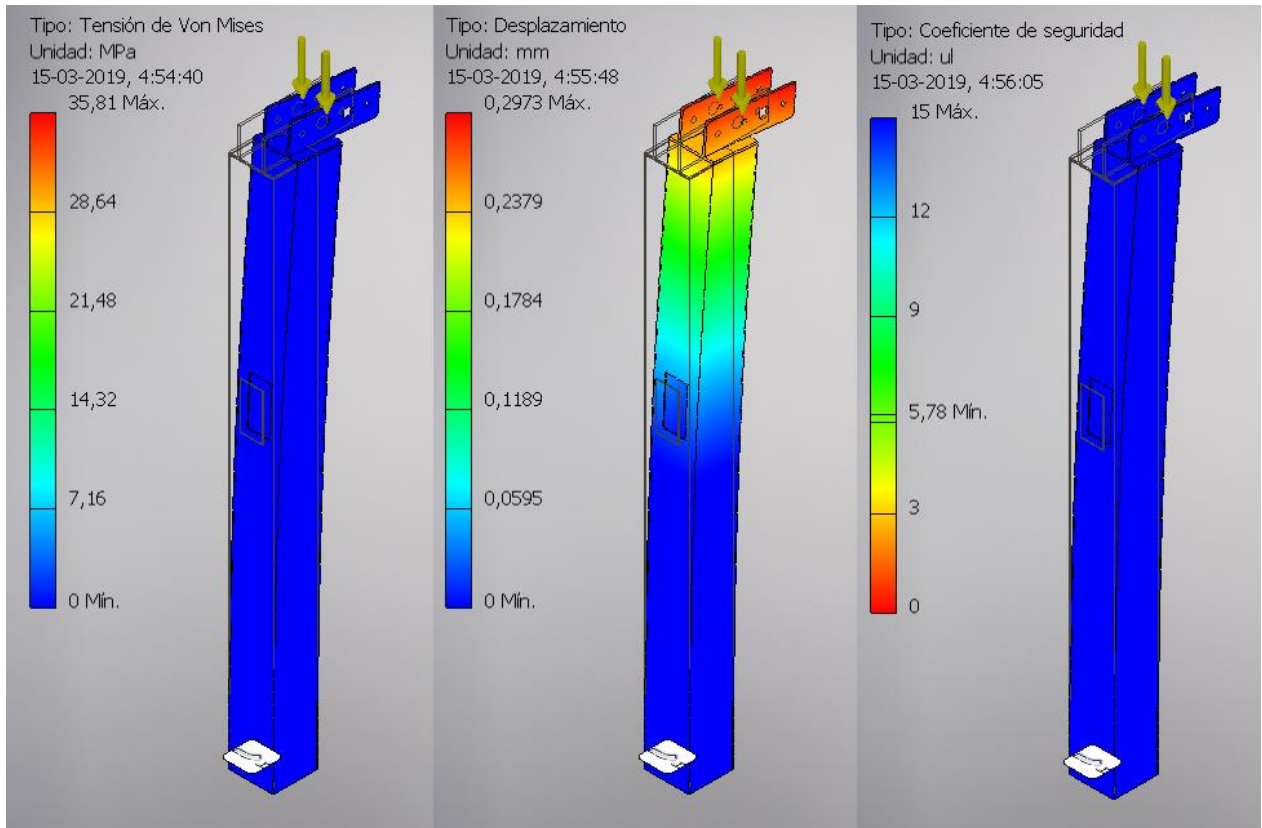


Figura A.2: Análisis de esfuerzo sobre pilar principal.

Se realizaron análisis de tipo estático por el programa Inventor 2018, utilizando las fuerzas de reacción en las zonas correspondientes según las fuerzas de viento calculadas anteriormente ( $F_v$ ). Para el perfil pivote central vemos un esfuerzo máximo de 138[MPa], con un desplazamiento máximo de menos de 4[mm] y un coeficiente de seguridad mínimo de 1,5. Estos valores son aceptables para asegurar el correcto funcionamiento mecánico del sistema. Para el perfil cuadrado central se obtuvo un esfuerzo máximo de menos de 36[MPa], con un desplazamiento máximo de menos de 3 décimas de milímetro y un coeficiente de seguridad mínimo de 5,78. Era esperable el resultado para este perfil ya que esta notoriamente sobredimensionado para el uso que se le dará. Se eligió esta medida porque el riel de pitch debía tener el suficiente espacio para pasar por él y además la superficie para alojar la base de aluminio con el sistema de transmisión y además sostener de buena manera todo el conjunto del marco y espejos.

**ANEXO B – Cubicación elementos constructivos y comerciales Prototipo 1.0**

**Tabla B.1:** Cubicación elementos constructivos Prototipo 1.0. Fuente: Elaboración Propia.

Nº	PARTE	QTY	MATERIAL	TIPO	MEDIDAS MATERIA L	LARGO [mm]	DIAMETR O [mm]
1	BASE APOYO						
1.1	PERFIL 1	2	Acero - ASTM A36	Perfil	40x20x2	750	-
1.2	PERFIL 2	2	Acero - ASTM A36	Perfil	40x20x2	700	-
1.3	PLETINA B	4	Acero - ASTM A36	Pletina	63x5	150	-
2	COLUMNA CENTRAL						
2.1	PERFIL CUAD	1	Acero - ASTM A36	Perfil	100x100x2	1300	-
2.2	PLETINA 1	2	Acero - ASTM A36	Pletina	63x5	200	-
2.3	PLETINA 2	2	Acero - ASTM A36	Pletina	63x5	200	-
3	PERFIL GIRO						
3.1	PERFIL RECT	1	Acero - ASTM A36	Perfil	40x20x2	1200	-
3.2	EJE GIRO	1	Acero - SAE1045	Barra	-	120	20
3.3	BUJE BRONCE	2	Bronce - SAE640	Barra	-	30	20/30
3.4	PLETINA EXT	2	Acero - ASTM A36	Pletina	63x5	100	-
4	MARCO						
4.1	PERFIL MARCO	4	Aluminio	Perfil	20x20x2	1220	-
4.2	PERFIL ESPEJO	4	Aluminio	Perfil	20x20x2	500	-
5	TRANSMISIO N						
5.1	RIEL 1	1	Acero - ASTM A36	Perfil	20x20x2	1600	-
5.2	RIEL 2	1	Acero - ASTM A36	Perfil	20x20x2	1900	-
5.3	EJE 1	1	Acero - SAE1045	Barra	-	170	20/38
5.4	EJE 2	1	Acero - SAE1045	Barra	-	230	20/38
5.5	PLETINA ROD	8	Acero - ASTM A36	Pletina	63x5	50	-
6	BASE ALUMINIO	1	Aluminio	Plancha	800X500X3	-	-
7	BASE ACERO						
7.1	PLETINA 1	2	Acero - ASTM A36	Pletina	63x5	400	-
7.2	PLETINA 2	2	Acero - ASTM A36	Pletina	63x5	500	-



**Tabla B.2:** Cubicación elementos comerciales Prototipo 1.0. Fuente: Elaboración Propia.

N°	PARTE	QTY	DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN	MEDIDAS [mm]
1	RODAMIENTO	4	UCF 206	Rod. Eje pitch	20
2	PIÑÓN	2	-	Genérico 19 dientes de bicicleta	-
3	CADENA	2	-	Genérica de bicicleta	2000
4	RODAMIENTO	4	UCFL 202	Rod. Eje pivote	20
5	ESPEJO	1	-	OptiWhite	1[m <sup>2</sup> ]
6	PERNOS c/ gol y tuerca	8	Parker M10	-	50
7	PERNOS c/ gol y tuerca	4	Parker M10	-	25
8	PERNOS c/ gol y tuerca	6	Parker M6	-	30
9	PERNOS c/ gol y tuerca	2	Parker M8	-	60

## **ANEXO C**

Planilla de Análisis DFA Prototipo 1.0

PARTE		COMPLEJIDAD DFA		ANÁLISIS FUNCIONAL / OPORTUNIDAD REDISEÑO				PRUEBA DE ERRORES		MANEJO MANUAL			INSERCIÓN				OPERACIONES SECUNDARIAS					
N° PARTE	NOMBRE PARTE	N° PARTES (Np)	N° INTERF (Ni)	PARTES MINIMAS TEORICAS	PARTE PUEDE SER ESTANDARIZADA	COSTO	PARTES MINIMAS PRACTICAS	PARTE ERRONEA / OMITIR PARTE	ARMADO ERRONEO	ENREDO / ANIDADO / SE PEGA	FLEXIBLE / FRAGIL / AFLADO / RESBALOSO	ALICATE / PINZA / LUPA	DIFICULTAD DE ALINEAR / ALOCAR	AFIRMADO REQUERIDO	RESISTENCIA A INSERCIÓN	ACCESO O VISIBILIDAD LIMITADA	PIEZA DE TRABAJO REORIENTADA	ATORNILLAR / TALADRAR / GIRAR / REMACHAR / DOBLAR / CRIMPEAR	SOLDADO / PEGADO	PINTADO / LUBRICADO / CALENTADO / APLICACIÓN LIQUIDA O GASEOSA	TESTEAR / MEDIR / AJUSTAR	
1	BASE APOYO																					
1.1	PERFIL 1	2	2	S	N	B	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N
1.2	PERFIL 2	2	5	N	N	B	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N
1.3	PLETINA B	4	4	N	N	B	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N	N	N	S	N	N	N
2	COLUMNA CENTRAL																					
2.1	PERFIL CUAD	1	6	S	N	B	S	N	N	S	N	N	N	S	S	N	S	S	S	N	N	N
2.2	PLETINA 1	2	3	N	N	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N
2.3	PLETINA 2	2	1	N	N	B	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N
3	PERFIL GIRO																					
3.1	PERFIL RECT	1	6	S	N	B	S	N	N	N	N	N	N	N	S	N	S	S	N	N	N	N
3.2	EJE GIRO	1	5	S	N	M	S	N	N	S	N	N	S	N	S	N	N	N	N	N	N	S
3.3	BUJE BRONCE	2	2	N	N	M	N	N	N	S	N	N	S	S	S	S	N	S	N	S	S	S
3.4	PLETINA EXT	2	2	N	N	B	N	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	N	N	N
4	MARCO																					
4.1	PERFIL MARCO	4	2	S	N	B	S	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N	S	N	N	S	S
4.2	PERFIL ESPEJO	4	3	S	N	B	S	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N
4.3	ESPEJO	2	1	S	S	A	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
5	TRANSMISION																					
5.1	RIEL 1	1	2	S	S	B	S	N	S	N	N	N	S	S	S	N	S	S	S	N	N	N
5.2	RIEL 2	1	2	S	S	B	S	N	S	N	N	N	S	S	S	N	S	S	S	N	N	N
5.3	CADENA	2	2	S	S	B	S	N	N	N	S	N	N	S	S	N	N	N	N	S	S	S
5.4	EJE 1	1	4	S	N	M	S	N	S	S	N	N	S	N	N	N	N	S	S	N	N	N
5.5	EJE 2	1	4	S	N	M	S	N	S	S	N	N	S	N	N	N	N	S	S	N	N	N
5.6	PIÑON 1	1	2	S	S	B	S	N	N	N	N	N	S	N	S	N	N	N	S	N	N	N
5.7	PIÑON 2	1	2	S	S	B	S	N	N	N	N	N	S	N	S	N	N	N	S	N	N	N
5.12	PLETINA ROD	8	2	N	S	B	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N
6	BASE ALUMINIO	1	10	S	N	M	S	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N	S	N	N	N	N
7	BASE ACERO																					
7.1	PLETINA 1	2	2	N	N	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N	N
7.2	PLETINA 2	2	4	N	N	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N	N
<b>TOTALES</b>		50	78	15	7	17	2	4	5	2	0	10	9	12	1	4	13	15	2	4		
DESIGN FOR ASSEMBLY METR		62,45		30%			1,13	0,40		0,47				2,13				2,53				

## ANEXO D - Cálculo de piezas mecánicas Prototipo 2.0

- Cálculo fuerza viento y carga en espejo

$$v = 80 \text{ km/h} = 23 \text{ m/s} \quad | \quad A_e = 6,61 \text{ m}^2 \quad | \quad C_D = 1,162 \quad | \quad C = 1,2 \quad | \quad \rho_a = 1,225 \text{ kg/cm}^3$$

$$\text{Presión viento: } p = 1,22 * v^2 = 61,47 \text{ kgf/m}^2$$

$$\text{Fuerza base: } F_0 = p * A_e = 3,985 \text{ kN}$$

$$\text{Fuerza viento: } F_v = F_0 * C = 4,782 \text{ kN} = 487,580 \text{ kgf}$$

$$\text{Carga aerodinámica: } F_c = \frac{1}{2} A_e C_D \rho_a v^2 = 2,489 \text{ kN} = 253,775 \text{ kgf}$$

- Cálculo eje movimiento pitch y velocidad angular

$$\sigma_a = 1440 \text{ kgf/cm}^2 \quad | \quad E = 2039400 \text{ kgf/cm}^2 \quad | \quad l = 10 \text{ cm} \quad | \quad \delta_{ae} = 0,033 \text{ cm}$$

$$\text{Momento eje: } M_e = \frac{F_v * l}{4} = 1218,950 \text{ kgf * cm}$$

$$W_e = \frac{M_e}{\sigma_a} = 0,846 \text{ cm}^3 \quad | \quad I_e = \frac{F_v * l^3}{48 * E * \delta_{ae}} = 0,151 \text{ cm}^4$$

Diámetro mínimo según momento e inercia:

$$\phi_e = \sqrt[3]{\frac{32 * W_e}{\pi}} = 20,506 \text{ mm} \quad | \quad \phi_i = \sqrt[3]{\frac{64 * I_e}{\pi}} = 13,242 \text{ mm}$$

Esto implica que el eje de rotación del pitch debe tener un diámetro mínimo de 21mm.

$$\text{Velocidad angular: } w = \frac{0,5 * \pi}{3 \text{ min}} = 0,009 \frac{1}{s} = 0,083 \text{ rpm} \quad | \quad r = 320 \text{ mm}$$

$$\text{Velocidad lineal: } V_h = w * r = 0,003 \text{ m/s}$$

- Cálculo eje movimiento roll y velocidad angular

$$\sigma_a = 1440 \text{ kgf/cm}^2 \quad | \quad E = 2039400 \text{ kgf/cm}^2 \quad | \quad l_r = 44 \text{ cm} \quad | \quad \delta_{ar} = \frac{l_r}{300} = 0,147 \text{ cm}$$

$$\text{Momento eje: } M_r = \frac{F_v * l_r}{6} = 3575,587 \text{ kgf * cm}$$

$$W_{rr} = \frac{M_r}{\sigma_a} = 2,483 \text{ cm}^3 \quad | \quad I_{rr} = \frac{23 * F_v * l_r^3}{648 * E * \delta_{ar}} = 4,929 \text{ cm}^4$$

Diámetro mínimo según momento e inercia:

$$\phi_{wr} = \sqrt[3]{\frac{32 * W_{rr}}{\pi}} = 29,354 \text{ mm} \quad | \quad \phi_{ir} = \sqrt[3]{\frac{64 * I_{rr}}{\pi}} = 31,655 \text{ mm}$$

Esto implica que el eje de rotación del pitch debe tener un diámetro mínimo de 14mm.

$$\text{Velocidad angular: } w = \frac{0,5 * \pi}{3min} = 0,009 \frac{1}{s} = 0,083 \text{ rpm} \quad | \quad r = 160 \text{ mm}$$

$$\text{Velocidad lineal: } V_h = w * r = 0,0013 \text{ m/s}$$

- Cálculo espesor planchas rodamientos

$$d_{m\acute{a}x} = 30 \text{ mm} \quad | \quad \phi_a = 1,5 * \sigma_a$$

$$\text{Espesor plancha: } e = \frac{F_v}{2 * d_{m\acute{a}x} * \phi_a} = 0,376 \text{ mm}$$

Esto indica que se ocuparán planchas de 3mm de espesor mínimo.

- Cálculo tensión cadena, velocidad angular piñón y torque motor stepper

$$m_h = 83,97 \text{ kg} \quad | \quad d_1 = 805 \text{ mm} \quad | \quad d_2 = 320 \text{ mm} \quad | \quad d_3 = 22 \text{ mm}$$

$$d_0 = 21,16 \text{ mm} \quad \left| \quad \alpha = \frac{w^2}{\pi} = 0,00002 \frac{1}{s^2} \quad \right| \quad I = 172,88 \text{ kg} * \text{cm}^2$$

$$F_y = m_h * (g + \alpha * d_3) = 0,823 \text{ kN} = 83,97 \text{ kgf}$$

$$M = (F_y * d_3) + (I * \alpha) = 181,162 \text{ Nm} = 1847,341 \text{ kgf} * \text{cm}$$

$$\text{Tensión cadena: } T_c = \frac{M}{d_2} = 566,132 \text{ N} = 57,729 \text{ kgf}$$

$$\text{Velocidad angular piñón: } r_s = 29,915 \text{ mm} \quad | \quad w_s = \frac{w * d_2}{r_s} = 1,029 \text{ rpm}$$

$$\text{Momento motor stepper: } M_s = T_c * r_s = 1,496 \text{ kgf} * \text{m} \quad | \quad i = 30$$

$$\text{Torque mínimo motor: } M_c = \frac{M_s}{i} = 4,987 \text{ kgf} * \text{cm} = 0,489 \text{ Nm}$$

- Cálculo eje motriz pitch

$$\Delta T = 2 * T_c = 115,459 \text{ kgf} \quad | \quad l_p = 18,4 \text{ cm} \quad | \quad M_s = \frac{\Delta T * l_p}{4}$$

$$W_{sp} = \frac{M_s}{\sigma_a} = 0,369 \text{ cm}^3 \quad | \quad I_p = \frac{\Delta T * l_p^3}{48 * E * \delta_{ae}} = 0,223 \text{ cm}^4$$

Diámetro mínimo según momento e inercia:

$$\phi_{wp} = \sqrt[3]{\frac{32 * W_{sp}}{\pi}} = 15,546 \text{ mm} \quad | \quad \phi_{ip} = \sqrt[3]{\frac{64 * I_p}{\pi}} = 14,594 \text{ mm}$$

- Cálculo eje motriz roll

$$\Delta T = 2 * T_c = 115,459 \text{ kgf} \quad | \quad l_r = 10 \text{ cm} \quad | \quad M_s = \frac{\Delta T * l_r}{4}$$

$$W_{sp} = \frac{M_s}{\sigma_a} = 0,2 \text{ cm}^3 \quad | \quad I_p = \frac{\Delta T * l_r^3}{48 * E * \delta_{ae}} = 0,036 \text{ cm}^4$$

Diámetro mínimo según momento e inercia:

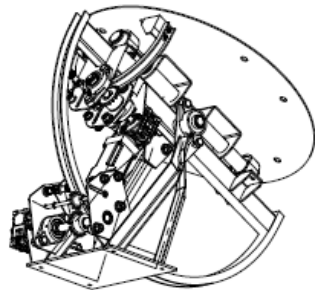
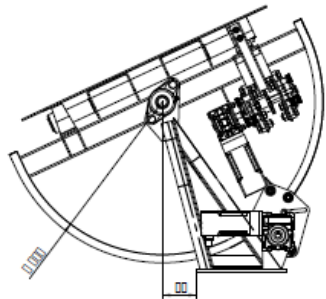
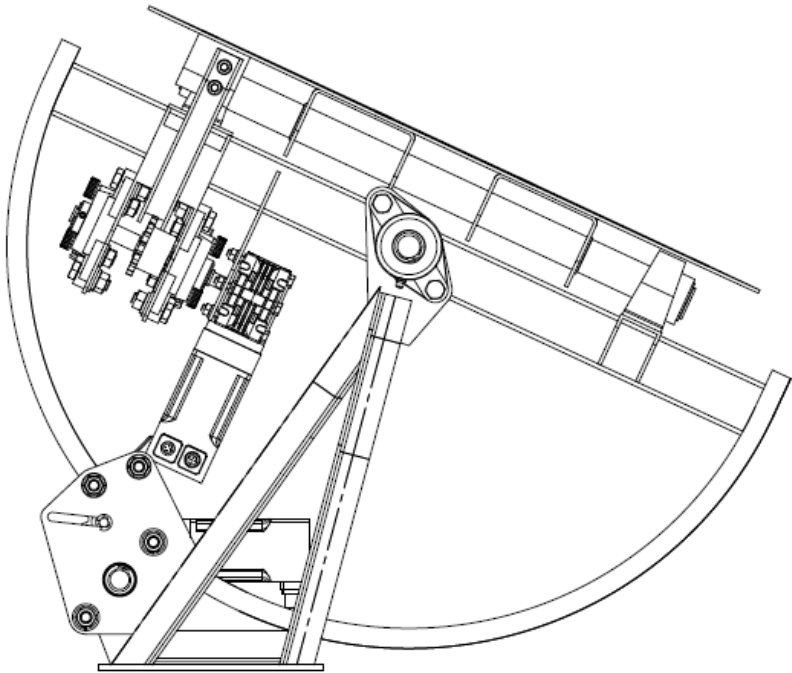
$$\phi_{wp} = \sqrt[3]{\frac{32 * W_{sp}}{\pi}} = 12,686 \text{ mm} \quad | \quad \phi_{ip} = \sqrt[3]{\frac{64 * I_p}{\pi}} = 9,237 \text{ mm}$$

Acá se mostraron los cálculos más generales de los elementos más importantes. Hay otros cálculos más específicos de ciertos aspectos del heliostato que no se mostrarán en esta memoria debido a los acuerdos de confidencialidad existentes.

## **ANEXO E**

Planos de construcción Prototipo 2.0

00000000000000000000		0000	000000000000
0000	00000000000000000000	0000	000000000000



0000	0000	000000000000
00000000	00000000000000000000	000000000000
0000000000	00000000000000000000	000000000000
000000000000	00000000000000000000	000000000000
00000000000000000000	00000000000000000000	000000000000
00000000000000000000	00000000000000000000	000000000000

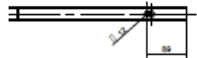
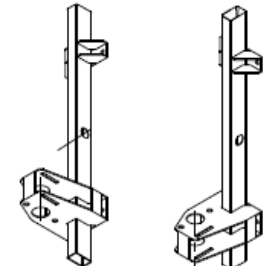
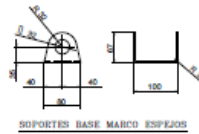
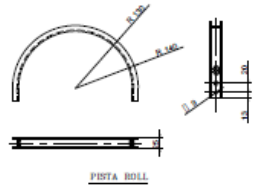
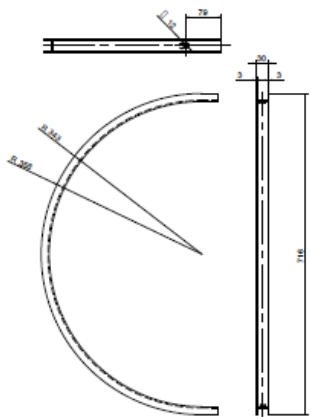






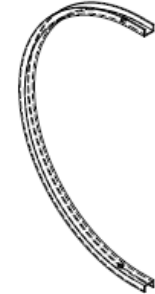
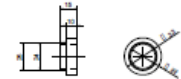
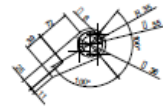
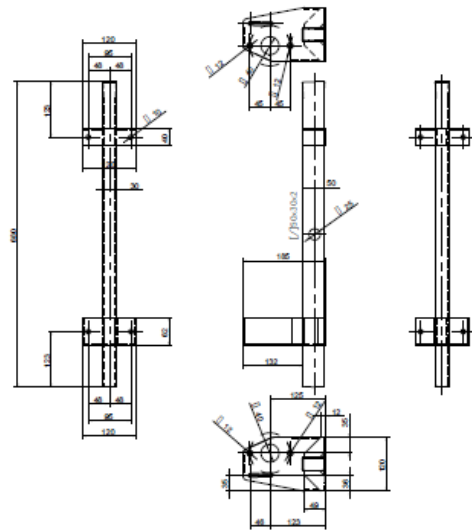
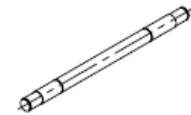
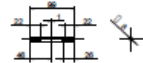
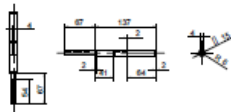


000000000000	0000	00000000	0000	00000000
--------------	------	----------	------	----------



ISOMETRICA SOPORTE SISTEMAS MOTRICES

ISOMETRICA SOPORTES BASE ESPEJOS



ISOMETRICA EJE MOTRIZ ROLL



ISOMETRICA EJE TENSOR ROLL

ISOMETRICA PISTA PITCH



SPROCKET MOTRIZ ROLL



SPROCKET TENSOR

0000	0000	0000000000
000000	Solarbank-60/25/13	
00000000		
00000000		
		www
	FILE NAME: MEF_V05-REV-A.dwg	
	000000	SHEET 4 OF



## **ANEXO F**

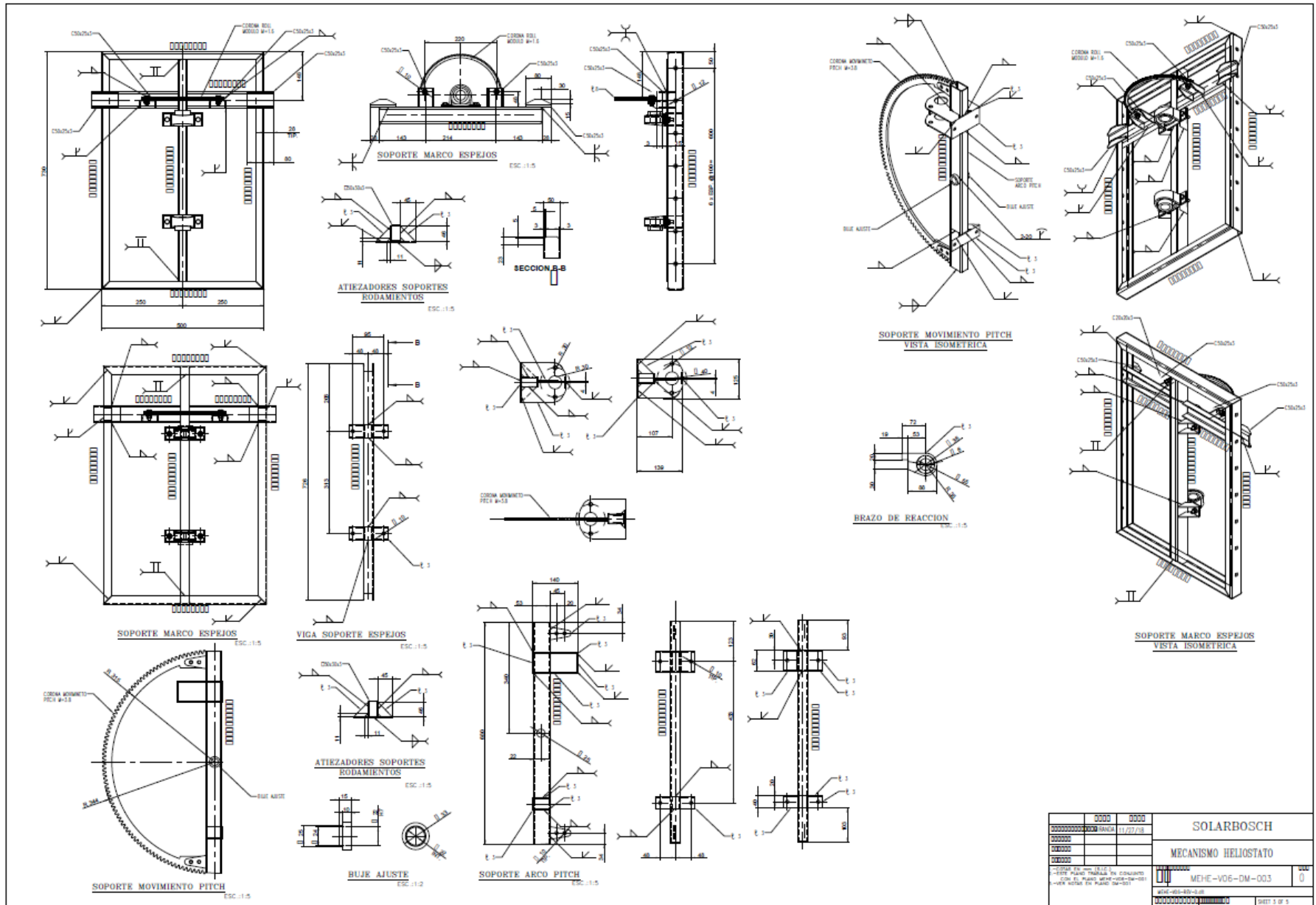
### **Planilla de Análisis DFA Prototipo 2.0**

PARTE		COMPLEJIDAD DFA		ANÁLISIS FUNCIONAL / OPORTUNIDAD REDISEÑO			PRUEBA DE ERRORES		MANEJO MANUAL			INSERCIÓN				OPERACIONES SECUNDARIAS					
N° PARTE	NOMBRE PARTE	N° PARTES (Np)	N° INTERF (Ni)	PARTES MINIMAS TEORICAS	PARTE PUEDE SER ESTANDARIZADA	COSTO	PARTES MINIMAS PRACTICAS	PARTE ERRONEA / OMITIR PARTE	ARMADO ERRONEO	ENREDO / ANIDADO / SE PEGA	FLEXIBLE / FRAGIL / AFLADO / RESBALOSO	ALICATE / PINZA / LUPA	DIFICULTAD DE ALINEAR / ALOCAR	AFIRMADO REQUERIDO	RESISTENCIA A INSERCIÓN	ACCESO O VISIBILIDAD LIMITADA	PIEZA DE TRABAJO REORIENTADA	ATORNILLAR / TALADRAR / GIRAR / REMACHAR / DOBLAR / CRIMPEAR	SOLDADO / PEGADO	PINTADO / LUBRICADO / CALENTADO / APLICACIÓN LIQUIDA O GASEOSA	TESTEAR / MEDIR / AJUSTAR
1	base heliostato	1	8	S	S	M	S	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N
2	placa sop rod eje pitch	2	4	N	N	L	S	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N	S	S	N	N
4	eje torque pitch	1	3	S	S	M	S	N	S	S	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
5	eje tensor pitch	1	3	S	S	M	S	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	S
6	piñon torque pitch	1	2	S	S	M	S	N	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
7	piñon tensor pitch	1	2	S	S	M	S	N	S	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	S
8	placa soporte motor pitch	1	2	S	N	L	S	N	S	N	N	N	S	S	N	N	S	S	S	N	N
9	arco pitch	1	4	S	S	H	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	S	N	N
10	cadena pitch	1	4	S	S	L	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S
11	agarre cadena	4	2	N	S	L	S	S	N	N	S	S	N	N	S	N	N	N	N	N	S
13	cuadro horizontal	2	3	N	N	L	N	S	S	N	N	N	N	N	N	N	S	N	S	N	N
14	cuadro diagonal	2	4	N	N	L	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N
15	cuadro vertical 1	2	4	N	N	L	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N
16	cuadro vertical 2	2	2	N	N	L	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N
17	cuadro vertical 3	2	2	N	N	L	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N
18	placa soporte rodamiento eje giro	2	2	N	N	L	S	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S	S	N	N
20	eje giro pitch	1	4	S	S	M	S	N	N	N	N	N	S	S	S	S	N	N	N	N	N
21	buje ajuste eje giro	2	2	S	S	L	S	S	N	S	N	S	S	N	S	S	N	N	N	N	S
22	perfil soporte arco	1	6	S	N	H	S	N	N	S	N	N	N	N	S	N	S	S	S	N	N
23	eje giro roll	1	4	S	S	H	S	N	N	S	N	N	S	S	S	S	N	N	N	N	N
24	soporte roll	1	4	S	N	H	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	N	N
25	oreja soporte roll	2	2	N	N	M	S	N	N	N	N	N	S	N	S	S	N	S	S	N	N
27	placa soporte rodamiento giro roll	1	2	S	N	M	S	N	N	N	N	N	N	S	N	N	N	S	S	N	N
28	arco roll	1	4	S	S	H	S	N	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	N	N	N
29	cadena roll	1	4	S	S	L	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S
30	placa arco roll soporte	2	2	N	N	L	S	N	N	N	N	N	N	S	N	N	S	S	S	N	N
31	placa sop rod eje roll	1	9	S	N	M	S	N	N	N	N	N	S	S	N	S	N	S	S	N	N
32	placa apoyo soporte rod eje roll	3	1	N	N	L	N	S	S	N	N	N	N	N	N	S	S	N	S	N	N
34	eje torque roll	1	3	S	S	M	S	N	S	S	N	N	S	S	S	S	N	N	N	N	N
35	eje tensor roll	1	3	S	S	M	S	N	N	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	S
36	piñon torque roll	1	2	S	S	M	S	N	S	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N
37	piñon tensor roll	1	2	S	S	M	S	N	S	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	S
38	placa soporte motor roll	1	2	S	N	L	S	N	S	N	N	N	S	S	N	S	S	S	S	N	N
	<b>TOTALES</b>	48	107	22	17	27	5	11	5	3	2	13	16	14	12	7	13	18	0	8	
	DESIGN FOR ASSEMBLY METRICS	71,67		46%		1,23		0,73			0,45			2,50				2,09			

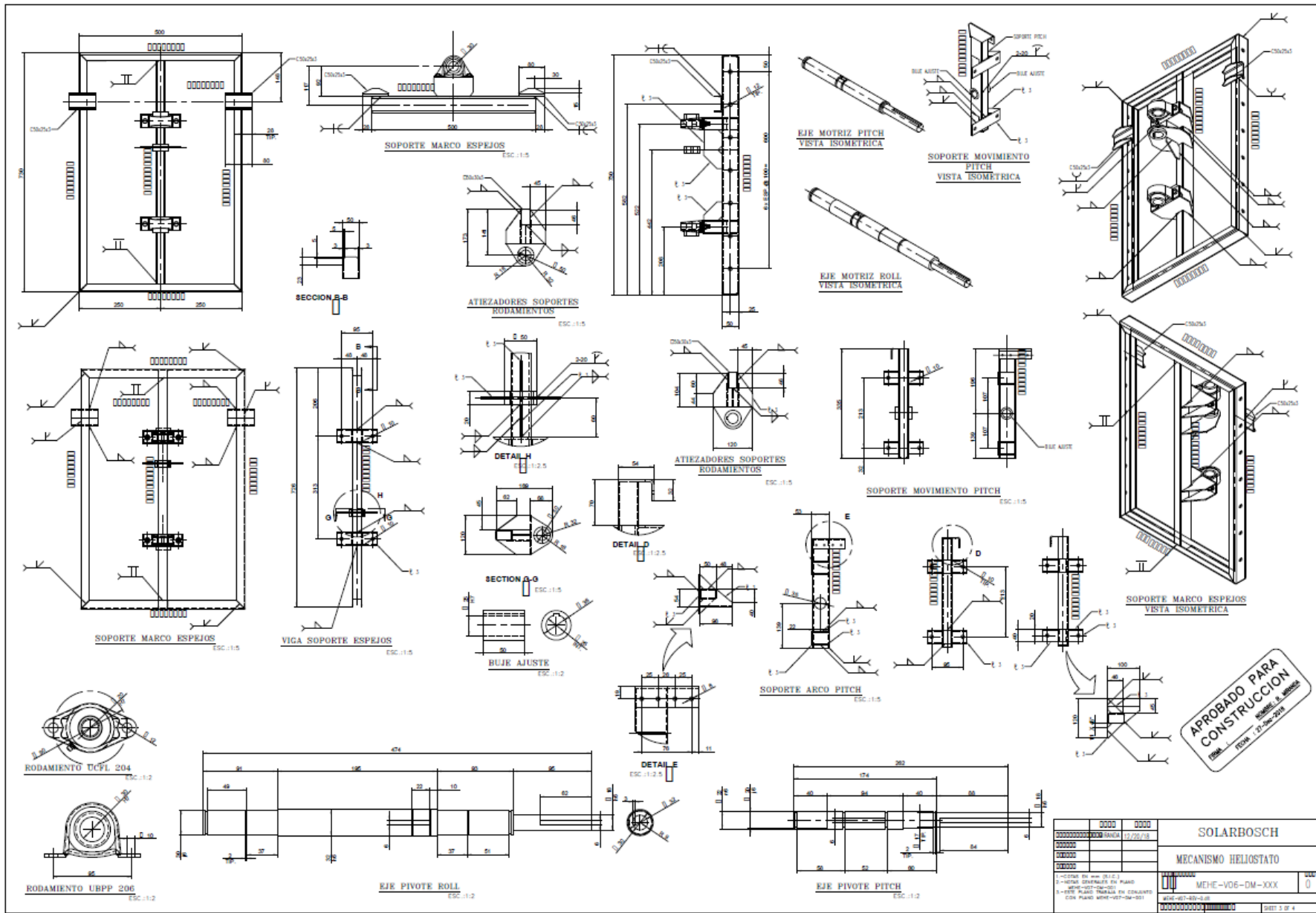
## **ANEXO G**

Planos de construcción sistema de transmisión Prototipo 3.0 y 4.0





0000	0000	<b>SOLARBOSCH</b>	
00000000000000000000	0000	11/27/19	
000000	000000	<b>MECANISMO HELIOSTATO</b>	
00000000000000000000	00000000000000000000	MEHE-V06-DM-003	
<small>         -TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS          -TODAS LAS MEDIDAS EN GRADOS          -CON EL PUNTO 0000-000-000          -VER TABLA DE MATERIALES EN ANEXO       </small>		<small>         0000-000-000-000          00000000000000000000       </small>	
		<small>         SHEET 3 OF 3       </small>	



**APROBADO PARA CONSTRUCCION**  
 Ing. J. D. ...  
 12/07/18

0000		0000		SOLARBOSCH	
00000000000000000000		00000000000000000000		12/07/18	
MECANISMO HELIOSTATO					
1-CODIGO EN WWW.SOLARBOSCH.COM				0	
2-NUMERO CONTRAFOLE EN PLANO				0	
3-REVISIONES REALIZADAS EN CONSULTA				0	
CON PLANO MONT-007-04-001				0	
MONT-007-04-001				0	
00000000000000000000				0	
CONT. 3 DE 4					