

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
VALPARAISO – CHILE



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN  
HELIÓSTATO CON SEGUIMIENTO SOLAR EN  
DOS EJES PARA RE-DIRECCIONAR  
RADIACIÓN INCIDENTE HACIA UN DISCO  
CONCENTRADOR PARABÓLICO”**

ESTEBAN RODRIGO CARVAJAL CARRASCO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA:  
PROFESOR CORREFERENTE:  
PROFESOR CORREFERENTE:

DR. ING. MARIO TOLEDO T.  
DR. ING. RODRIGO BARRAZA V.  
DR. ING. DANILO ESTAY B.

JULIO 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo le agradezco a mi familia por haberme apoyado de forma incondicional durante el desarrollo de este proyecto, y por haber sido un pilar fundamental durante toda mi etapa de educación, siempre velando por mi desarrollo y crecimiento, tanto académico como personal.

Quiero agradecer a Nicolás Ripoll por su ayuda en las fases de diseño y por haber conseguido gran parte de los materiales requeridos para la construcción del helióstato.

A mi amigo y compañero de generación Jonathan San Martín por hacerme ver mis errores en la programación del sistema de control y contribuir al mejor funcionamiento de este.

A Francisco Vargas por darme todas las facilidades al momento de trabajar en el Laboratorio de Energías Renovables de Quilpué, siempre mostrando la mejor disposición y voluntad de trabajo.

A Daniel Galleguillos y el personal académico del Laboratorio de Termofluidos por ayudarme en la construcción del soporte del helióstato.

Finalmente, quiero dar las gracias al personal académico del Taller Metal Mecánico del Laboratorio de Resistencia de Materiales por facilitarme las herramientas que fueron requeridas para la construcción del helióstato.

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo se centra en el desarrollo, implementación y puesta en marcha de un helióstato con sistema de redireccionamiento para radiación solar, que sirva para alimentar procesos que requieran de energía térmica de forma constante. Esta iniciativa nace a partir del proyecto FONDAP “Solar Energy Research Center 2 (SERC2-Chile)”, el cual se encuentra desarrollando un gasificador solar de combustibles sólidos en base carbonosa, que funcione a partir de energía solar concentrada. El papel que juega el helióstato en este sistema consiste en aportar un suministro constante de energía solar, a un disco parabólico, el cual ha de concentrarla sobre un reactor, de manera tal que este pueda efectuar las reacciones químicas necesarias para producir gas de síntesis. Es así como el problema al cual va dirigido esta investigación radica en la alta dependencia de combustibles fósiles que tienen muchos procesos térmicos en la actualidad, para lo cual se propone una nueva alternativa que vaya enfocada en el consumo ecológico de fuentes de energía renovable, como es el sol en este caso.

El diseño del helióstato es abordado desde el modelo geocéntrico de heliotecnía solar, enfocándose en la obtención del vector que rige la trayectoria solar en función del tiempo y la ubicación geográfica. Las variables principales involucradas corresponden a la altitud y al azimut solar, que, en concordancia con la ley de reflexión óptica, permiten determinar la orientación que ha de tener el panel reflector del helióstato. El desarrollo del helióstato comienza con la propuesta de tres diseños distintos, los cuales sugieren diferentes mecanismos de movimiento y estructuras de soporte, y que fueron concebidos en base a una exhaustiva investigación del estado del arte de los helióstatos, siempre tomando en cuenta los parámetros y limitaciones del proyecto de gasificación. Luego de analizar dichas propuestas desde una perspectiva técnica y económica, se optó por un diseño estructural en T construido a partir de tubos de PVC y piezas hechas en impresora 3D con material PETG. Este diseño considera un panel liviano de plumavit recubierto con una película metálica reflectante, el cual es controlado por un sistema de seguimiento diseñado a partir de motores paso a paso de poca potencia y placas de desarrollo programadas en una plataforma de libre acceso llamada Arduino IDE. Se llevó a cabo la construcción de este sistema y se realizó un ensayo, durante el cual el helióstato sí fue capaz de reflejar la radiación incidente sobre un punto fijo de manera constante, cumpliendo satisfactoriamente con sus objetivos de diseño. Con dichos resultados queda comprobado que sí es posible la fabricación de mecanismos de redireccionamiento solar en zonas poco ventosas por un costo menor a 100 [USD/m<sup>2</sup>].

Se espera que este estudio sirva como motivación para innovar en nuevas tecnologías que involucren la energía solar en sus procesos térmicos, y de esa manera encaminar la explotación de los recursos del planeta hacia un futuro más limpio y sustentable.

## ABSTRACT

The following research is centered upon the development, implementation and start-up of a heliostat with a redirecting system for solar radiation, which will be used steadily to power up thermal processes. This initiative is framed within the project FONDAP “Solar Energy Research Center 2 (SERC2-Chile)” which is currently developing a solar gasifier fed by carbon-based fuels that works on concentrated solar power. The role that the heliostat plays on this project is to provide a steady energy supply into a parabolic dish reflector, which will concentrate it and redirect it towards a gasifier reactor, so that it can carry on the appropriate chemical reactions to generate SYNGAS. With that in mind, the problem to which this investigation addresses is the high reliance that current thermal processes have on fossil fuels, for which this study proposes a new alternative focused on the green consumption of renewable energy sources, like the sun in this case.

The heliostat’s design is approached from a geocentric reference system employed by the solar geometry model, focusing on the calculation of the vector that governs the solar path as a function of time and geographic location. The main variables involved are the solar altitude and azimuth, which, in accordance with the optical reflection principle, will determine the direction where the heliostat’s reflector panel will be facing. Its development starts with the proposal of three designs, all of which suggest different motion mechanisms and structural supports, which were conceived based upon the heliostat technology’s state of the art, and by considering the parameters and restrictions of the gasification project. After reviewing all of these from a technical and financial point of view, it was decided to go for a T-type heliostat built from PVC pipes and 3D-printed components made with PETG. This design has a light-weight styrofoam panel covered with reflective film, which is controlled by a tracking system that employs low power stepper motors and microcontroller boards programmed on an open-source electronic prototyping platform called Arduino IDE. The system was constructed, and a test was carried out, during which the heliostat was capable of constantly reflecting incoming solar radiation onto a fixed point, and thus successfully accomplishing its design targets. Those results serve as a proof that it is in fact possible to manufacture solar redirecting mechanisms for light-wind areas, for a cost lower than 100 [USD/m<sup>2</sup>].

It is hoped that the present study serves as a drive to innovate in new technologies so that they can start including solar energy into their thermal processes, and thereby guide our planet’s exploitation of resources towards a much more renewable and sustainable future.

# GLOSARIO

## Abreviaturas

GEI	Gases de efecto invernadero
ERNC	Energías renovables no convencionales
CSP	"Concentrated Solar Power" o energía solar concentrada
SIC	Sistema interconectado central
CNE	Comisión nacional de energía
ACS	Agua caliente sanitaria
FPC	"Flat Plate Collector" o colector solar de placa plana
ETC	"Evacuated Tube Collector" o colector solar de tubo evacuado
FLC	"Fresnel Lens Collector" o colector solar de lente Fresnel
LFR	"Linear Fresnel Reflector" o reflector solar lineal Fresnel
PRD	"Parabolic Dish Reflector" o reflector solar de disco parabólico
HFC	"Heliostat Field Collector" o campo solar de heliostatos
DC	Corriente directa
AC	Corriente alterna
FV	Fotovoltaico
PETG	Plástico de polietilenglicol de tereftalato
SYNGAS	"Synthesis Gas" o gas de síntesis

## Nomenclatura química

CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Fe	Hierro
FeO	Óxido de hierro
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Óxido ferroso férrico
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de aluminio
C	Carbono
Al	Aluminio
H <sub>2</sub>	Hidrógeno
CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
H <sub>2</sub> O	Agua
O <sub>2</sub>	Oxígeno

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  Carbonato de sodio

### Conceptos de heliotecnia

L	Latitud [°]
$\lambda_l$	Longitud local [°]
$\lambda_s$	Longitud estándar [°]
$h_g$	Altitud sobre el nivel del mar [m]
UTC	"Coordinated Universal Time" que define los husos horarios
ET	Ecuación de tiempo [min]
TSA	Tiempo solar aparente [hr]
TLE	Tiempo local estándar [hr]
$\delta$	Declinación solar [°]
h	Hora solar [°]
$\alpha$	Altitud solar [°]
z	Azimut solar [°]
$\phi$	Zenit solar [°]
$\alpha_n$	Altitud solar máxima [°]
$\alpha_{st}$	Bisectriz cenital [°]
$z_{st}$	Bisectriz azimutal [°]
$\alpha_{target}$	Ángulo azimutal entre el helióstato y el objetivo con respecto al norte
$z_{target}$	Ángulo cenital entre el helióstato y el objetivo con respecto al horizonte

### Parámetros de diseño

$RT_1$	Relación de transmisión entre el motor y el eje cenital
$RT_2$	Relación de transmisión entre el motor y el eje azimutal
$R_{zenit}$	Relación de rotación cenital angular
$R_{azim}$	Relación de rotación azimutal angular

# ÍNDICE TEMÁTICO

AGRADECIMIENTOS .....	i
RESUMEN EJECUTIVO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
GLOSARIO .....	iv
ÍNDICE TEMÁTICO .....	vi
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	ix
ÍNDICE DE FÓRMULAS Y REACCIONES.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xv
OBJETIVOS .....	xvi
1. Objetivos generales y específicos.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	xvii
DESARROLLO .....	1
2. Marco Teórico .....	1
2.1 La radiación .....	1
2.1.1 Radiación directa .....	2
2.1.2 Radiación difusa .....	2
2.1.3 Radiación reflejada.....	2
2.1.4 Radiación global .....	2
2.2 Energía solar .....	3
2.2.1 Energía solar fotovoltaica.....	3
2.2.2 Energía solar térmica .....	3
2.3 Procesos y aplicaciones CSP .....	8
2.3.1 Procesos de baja entalpía.....	9
2.3.2 Procesos de alta entalpía.....	10
2.4 Heliotecnia y geometría solar.....	16
2.4.1 Ubicación Geográfica.....	16

2.4.2	Hora civil: UTC .....	18
2.4.1	Ecuación del Tiempo (ET) .....	18
2.4.2	Tiempo solar medio y aparente .....	19
2.4.3	Ángulos solares .....	19
2.5	Helióstatos .....	22
2.5.1	Estado del arte: Funciones y sus sistemas asociados.....	23
3.	Propuesta de tres configuraciones de helióstatos .....	30
3.1	Diseño N°1 .....	30
3.2	Diseño N°2 .....	32
3.3	Diseño N°3 .....	36
4.	Diseño final .....	39
4.1	Panel reflector.....	39
4.2	Soporte.....	41
4.2.1	Estructura móvil superior .....	41
4.2.2	Pedestal base.....	45
4.3	Sistema motriz .....	48
4.3.1	Sistema motriz cenital .....	48
4.3.2	Sistema motriz azimutal .....	50
4.3.3	Memoria de cálculo .....	52
4.4	Sistema de seguimiento y control.....	57
4.4.1	Principio óptico .....	57
4.4.2	Mecanismo de seguimiento y dispositivos asociados .....	60
4.4.3	Algoritmo de control y seguimiento.....	63
5.	Construcción.....	67
5.1	Armado de piezas por separado.....	67
5.1.1	Pedestal base.....	67
5.1.2	Panel reflector.....	68
5.1.3	Soporte móvil superior .....	71
5.2	Ensamblaje estructural completo.....	78
6.	Implementación y puesta en marcha del ensayo .....	79

CONCLUSIONES .....	87
REFERENCIAS.....	88
ANEXOS .....	90
7. Código Fuente: “Helio Target”.....	90
8. Planos .....	96
8.1 Tapa con soporte motriz cenital .....	97
8.2 Tapa lateral .....	98
8.3 Tapa con soporte motriz azimutal .....	99
8.4 Buje inferior.....	100
8.5 Tapa superior tipo buje.....	101
8.6 Soporte triangular para rueda dentada intermedia.....	102
8.7 Anclaje inferior eje azimutal .....	103

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1: Evolución de la producción energética mundial. ....	xvii
Figura 2: Matriz energética mundial y los combustibles primarios.....	xviii
Figura 3: Atlas global de índices de radiación solar. ....	xix
Figura 4: Registro de radiación directa recibida en Sudamérica. ....	xix
Figura 5: Planta desalinizadora oficina salitrera Las Salinas.....	xx
Figura 6: Distribución espectral solar. ....	1
Figura 7: Tipos de radiación. ....	2
Figura 8: Ramas de la energía solar.....	3
Figura 9: Instalación de colector FPC y sus componentes internos .....	4
Figura 10: Colector ETC y esquema de su funcionamiento .....	5
Figura 11: Colector PTC en instalación de SEGS III, California. ....	6
Figura 12: Colector Fresnel de Puerto Errado y su análisis óptico.....	7
Figura 13: Colector PDR real y esquema de su modo de concentración.....	7
Figura 14: Planta solar Atacama-1 en la segunda región (en construcción).....	8
Figura 15: Mapa de procesos termoquímicos. ....	8
Figura 16: Solar still de cubierta plástica tensionada.....	9
Figura 17: Instalación ACS con sistema pasivo indirecto. ....	10
Figura 18: Layout de central de torre solar.....	11
Figura 19: Latitud y Longitud.....	17
Figura 20: Husos horarios.....	17
Figura 21: Órbitas solares en torno a la tierra vistas en el norte.....	20
Figura 22: Mapa de coordenadas solares.....	22
Figura 23: Ley de reflexión en helióstatos.....	23
Figura 24: Helióstatos tipo T. ....	24
Figura 25: Helióstatos de espejo estampado.....	25
Figura 26: Helióstato con paneles tipo sándwich. ....	25
Figura 27: Funcionamiento de sensor óptico.....	27
Figura 28: Helióstato alimentado por panel FV y comunicado por antena. ....	27
Figura 29: Accionadores rotatorios y lineales activados por motores rotatorios....	28

Figura 30: Flujo de viento sobre helióstato a través de reja porosa.....	29
Figura 31: Configuración esquemático de sistema de gasificación solar. ....	30
Figura 32: Disco parabólico inicial y su diseño de soporte . ....	31
Figura 33: Disco Parabólico A. C. Parsons. ....	32
Figura 34: Modelación del segundo diseño .....	34
Figura 35: Anclaje superior en ensamble inicial.....	35
Figura 36: Soporte y sistema motriz en vista superior e inferior . ....	35
Figura 37: Planta Masdar Solar Hub y su principio óptico Beam Down . ....	37
Figura 38: Esquema de equipos para sistema gasificador. ....	37
Figura 39: Modelación del tercer diseño .....	38
Figura 40: Panel reflectante .....	40
Figura 41: Parte trasera del panel y su estructura de anclaje .....	40
Figura 42: Vista frontal y lateral de la estructura superior móvil. ....	42
Figura 43: Vista en corte de la estructura superior móvil.....	43
Figura 44: Tapa con soporte motriz azimutal, en vista inferior y superior .....	43
Figura 45: Anclaje inferior de eje azimutal .....	44
Figura 46: Montaje de guía de contra-torque en estructura superior móvil.....	44
Figura 47: Modelación de pedestal base.....	46
Figura 48: Estructura superior móvil montada sobre el pedestal.....	46
Figura 49: Helioestato modelado, en vista lateral izquierda y derecha . ....	47
Figura 50: Helioestato modelado, en vista delantera y trasera. ....	47
Figura 51: Motor stepper Nema 17, marca EPSON modelo EM-402. ....	48
Figura 52: Mecanismo de transmisión cenital .....	49
Figura 53: Mecanismo de transmisión azimutal .....	51
Figura 54: Diagrama de cuerpo libre, para cálculo de momento cenital. ....	53
Figura 55: Diagrama de cuerpo libre para cálculo de momento azimutal .....	56
Figura 56: Bisectriz azimutal ( $zst$ ) .....	57
Figura 57: Bisectriz cenital ( $ast$ ), cuando $\alpha < atarget$ .....	58
Figura 58: Bisectriz cenital ( $ast$ ), cuando $\alpha > atarget$ .....	59
Figura 59: Placa Arduino UNO en vista isométrica y superior .....	60
Figura 60: Motorshield L293D en vista isométrica y superior.....	61

Figura 61: RTC DS1307 en vista superior e inferior.....	62
Figura 62: Interruptor End Stop Switch.....	62
Figura 63: Breadboard .....	63
Figura 64: Diagrama de trayectoria solar en Quilpué.....	64
Figura 65: Diagrama de flujo para posicionamiento del panel.....	65
Figura 66: Pedestal base construido.....	68
Figura 67: Unión de planchas de plumavit para el panel.....	68
Figura 68: Rollo de película metálica reflectante. ....	69
Figura 69: Película reflectante (con protector) adherida al plumavit. ....	69
Figura 70: Parte trasera del panel reflector. ....	70
Figura 71: Contrapeso.....	71
Figura 72: Armado de estructura tipo T y rodamientos en eje cenital.....	71
Figura 73: Tapas de soporte cenital y su acople en estructura tipo T.....	72
Figura 74: Ruedas dentadas y mecanismo motriz cenital.....	72
Figura 75: Mecanismo motriz azimutal y su montaje en el soporte en T.....	73
Figura 76: Esquema de conexiones de RTC a Arduino UNO. ....	73
Figura 77: Esquema de conexión del Motorshield con los motores. ....	74
Figura 78: Arduino UNO y Motorsheild montados sobre el soporte. ....	75
Figura 79: RTC y Breadboard montados sobre estructura en T. ....	75
Figura 80: Soportes de anclaje panel-estructura móvil.....	76
Figura 81: Esquema de conexión entre interruptores y Motorshield.....	77
Figura 82: Estructura superior móvil en vista izquierda y derecha .....	77
Figura 83: Helióstato en vista frontal derecha e izquierda. ....	78
Figura 84: Vista trasera del helióstato y detalle de acople con el panel. ....	79
Figura 85: Objetivo a irradiar durante el ensayo. ....	80
Figura 86: Layout esquemático del ensayo.....	81
Figura 87: Adaptador universal con voltaje de salida configurado en 7.5 [V]. ....	81
Figura 88: Vista frontal del objetivo antes del ensayo.....	82
Figura 89: Prueba de reflexión a las 12:30 PM. ....	83
Figura 90: Prueba de reflexión a las 13:00. ....	83
Figura 91: Prueba de reflexión a las 13:30. ....	84

Figura 92: Prueba de reflexión a las 14:00. ....	84
Figura 93: Prueba de reflexión a las 14:30. ....	85
Figura 94: Prueba de reflexión a las 15:00. ....	85

## ÍNDICE DE FÓRMULAS Y REACCIONES

Fórmula 1: Reacción de carbo-reducción .....	12
Fórmula 2: Reacción de hidrólisis .....	13
Fórmula 3: Reformación de metano con vapor como agente gasificador .....	14
Fórmula 4: Reformación de metano con CO <sub>2</sub> como agente gasificador.....	14
Fórmula 5: Reacción de gasificación.....	16
Fórmula 6: Ecuación de tiempo .....	18
Fórmula 7: Parámetro B.....	18
Fórmula 8: Tiempo solar aparente .....	19
Fórmula 9: Declinación solar.....	20
Fórmula 10: Hora solar .....	20
Fórmula 11: Azimut y Zenit solar.....	21
Fórmula 12: Altitud máxima en hemisferio norte .....	21
Fórmula 13: Altitud máxima en hemisferio sur .....	21
Fórmula 14: Azimut solar .....	22
Fórmula 15: Potencia neta de Diseño N°1.....	31
Fórmula 16:Potencia neta de Diseño N°2.....	33
Fórmula 17:Potencia neta de Diseño N°3.....	38
Fórmula 18: Relación de transmisión del mecanismo cenital .....	49
Fórmula 19: Relación de rotación cenital angular .....	50
Fórmula 20: Relación de transmisión del mecanismo azimutal .....	51
Fórmula 21:Relación de rotación azimutal angular .....	51
Fórmula 22: Par motor del eje cenital.....	52
Fórmula 23: Magnitud del contrapeso para torque cenital .....	54
Fórmula 24:Número de Reynolds sobre panel reflector .....	55
Fórmula 25: Coeficiente de arrastre del viento sobre el panel reflector .....	55
Fórmula 26: Fuerza de arrastre sobre el panel reflector .....	55
Fórmula 27: Momento azimutal mínimo para soportar la carga eólica .....	56
Fórmula 28: Par motor máximo del eje azimutal .....	57
Fórmula 29: Bisectriz azimutal.....	58

Fórmula 30: Bisectriz cenital, cuando $\alpha < \alpha_{target}$ .....	59
Fórmula 31: Bisectriz cenital, cuando $\alpha > \alpha_{target}$ .....	59
Fórmula 32: Diferencia cenital .....	65
Fórmula 33: Diferencia azimutal .....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de colectores concentradores .....	6
Tabla 2: Días N del Año .....	18
Tabla 3: Parámetros para cálculo de torque cenital .....	53
Tabla 4: Propiedades del aire en el LER.....	54
Tabla 5: Parámetros para cálculo de torque azimutal .....	56
Tabla 6: Valores máximos y mínimos del zenit y del azimut en Quilpué .....	64

# OBJETIVOS

## 1. Objetivos generales y específicos

### ➤ Objetivo general

En el marco del proyecto FONDAP “Solar Energy Research Center 2 (SERC2-Chile)”, el presente trabajo propone el diseño, construcción e implementación de un helióstato que permita el redireccionamiento de la radiación incidente hacia un disco concentrador parabólico.

### ➤ Objetivos específicos

1. Analizar el estado del arte de las tecnologías existentes en lo que respecta al desarrollo de helióstatos.
2. Proponer alternativas de heliostatos con seguimiento en dos ejes y que permita el redireccionamiento de radiación hacia un disco parabólico (apuntando hacia arriba).
3. Selección fundamentada de un sistema propuesto, teniendo en cuenta los factores técnicos y costos asociados a su manufactura, funcionamiento y puesta en marcha.
4. Diseño mecánico, memorias de cálculo, planos y selección de componentes del sistema seleccionado.
5. Construcción y puesta en marcha.

# INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha estado llevando a cabo un proceso de concientización colectiva en lo que respecta al brusco cambio climático que afecta nuestro planeta tierra. Deshielos, deterioro de los recursos hídricos, olas de calor, sequías e incendios forestales van aumentando año a año como consecuencia del calentamiento global. Este efecto es producido por múltiples factores, siendo el principal de estos el alto índice de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, las cuales provienen en su mayoría de la combustión de combustibles fósiles, fábricas y plantas de fuerza utilizadas para la producción eléctrica. Este fenómeno genera una serie de resultados que inciden de forma directa en numerosos aspectos de nuestro diario vivir, pasando a llevar nuestra salud, dañando nuestras comunidades y hasta modificando nuestra economía. De no frenar esto lo antes posible, el deterioro de nuestro entorno podría alcanzar un punto sin retorno, y es aquí en donde se desencadenarían una serie de importantes cambios que tendrían consecuencias catastróficas en la tierra, tales como:

- Potenciales inundaciones en ciudades costeras, producto del aumento en el nivel del mar generado por la fusión de los glaciares y el hielo marino
- Sequías complicarían el desarrollo de la agricultura y la producción de alimentos
- Extinción de plantas y animales producto del aumento de temperatura
- Aumento de ocurrencia de huracanes y tornados producto de los cambios de temperatura

La comunidad internacional ha tomado conciencia en la importancia de este asunto, lo cual se ha traducido en la firma de acuerdos que buscan disminuir las altas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante el desarrollo de nuevas formas de energía que sean eco-amigables.

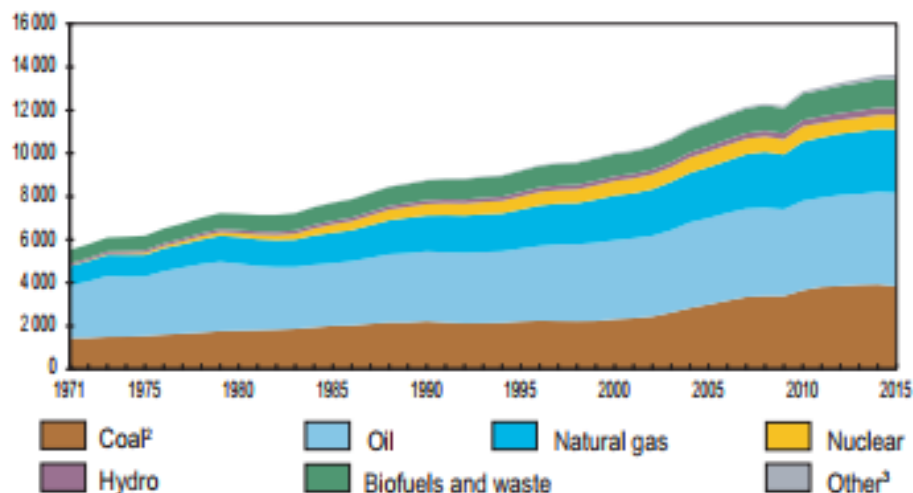


Figura 1: Evolución de la producción energética mundial.

Es en este contexto en que la comunidad científica ha tomado cartas en el asunto, llevando a cabo una serie de investigaciones en el campo de las energías renovables, que buscan reemplazar en la mayor medida posible la fuerte dependencia que tiene la matriz energética mundial con los combustibles fósiles, tales como el carbón, el petróleo y el gas natural.

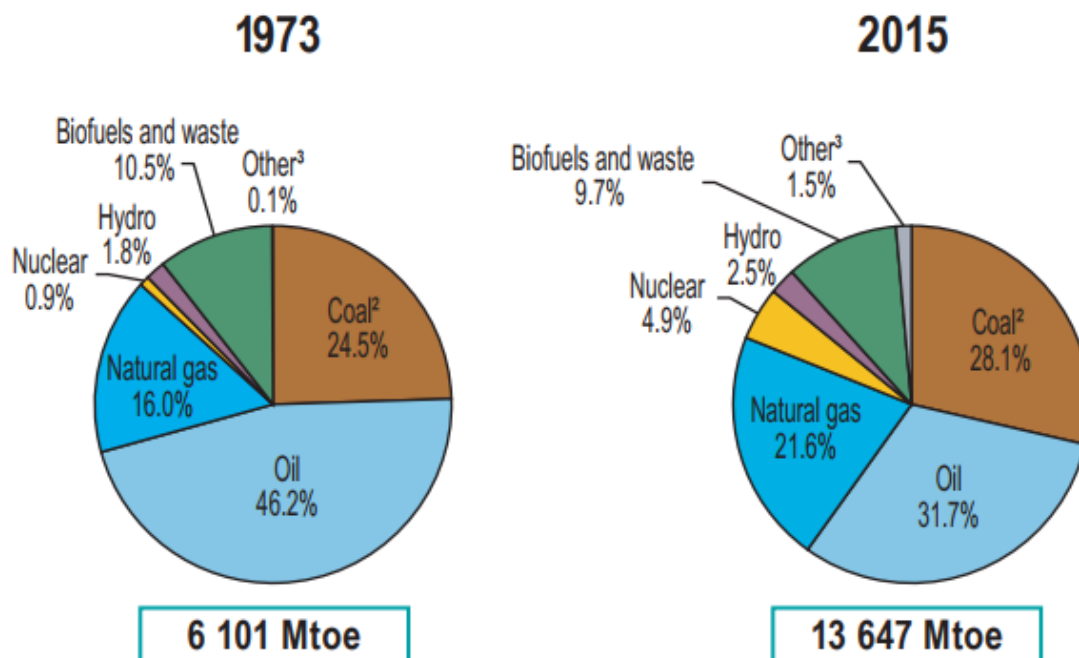


Figura 2: Matriz energética mundial y los combustibles primarios.

Si bien, lo que se desea eventualmente es transformar la matriz energética a una que sea 100% alimentada por energías renovables, esto puede tomar muchas décadas y la urgencia por disminuir la contaminación es demasiado alta como para esperar a que esto ocurra, por lo que, nos guste o no, deberemos seguir dependiendo de los combustibles fósiles durante un buen tiempo más. En esta situación, nace la iniciativa por desarrollar de forma paralela, métodos de utilización para combustibles fósiles que sean más eficientes y menos contaminante que las prácticas convencionales. Es de esta manera que se podría eventualmente hacer la transición gradual de una matriz energética fosilizada a una renovable.

Y es justamente aquí dónde radica la motivación de este trabajo: en el mejoramiento y la optimización del uso de fuentes combustibles convencionales. Y específicamente, en el marco del proyecto FONDAP, es el desarrollo de un gasificador solar de combustibles sólidos, con el cual se pretende aprovechar de mejor manera los combustibles de base carbonosa (como el carbón mismo, por ejemplo) para obtener gas de síntesis con mayor densidad energética, mayor eficiencia, y así posibilitar procesos de combustión más limpios y con mejor aprovechamiento energético.

Uno de los aspectos que hacen tan interesante este proyecto, es que estará alimentado por energía solar. Esta es un área en la cual Chile tiene un gran potencial de desarrollo, puesto que nuestro país cuenta con los índices de radiación más altos del mundo, los que se pueden encontrar específicamente en el Desierto de Atacama.

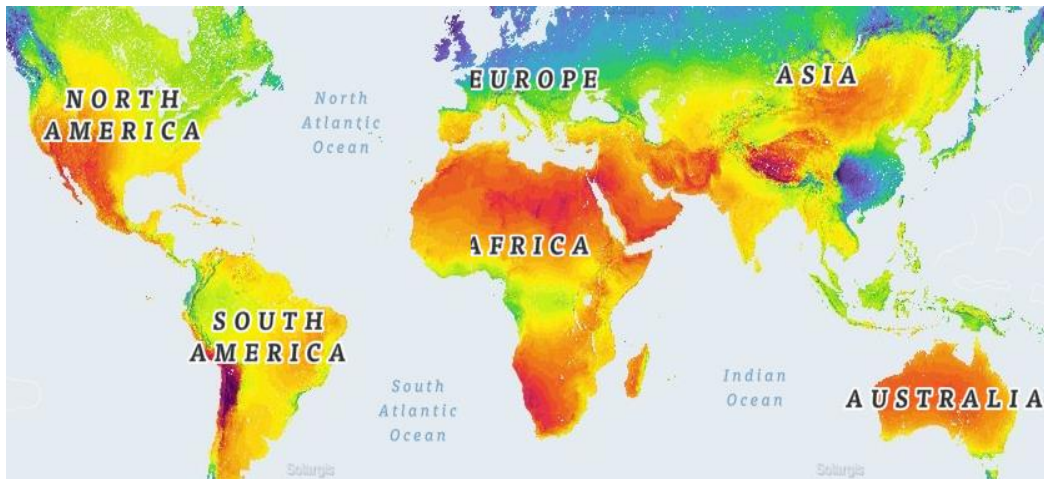


Figura 3: Atlas global de índices de radiación solar.

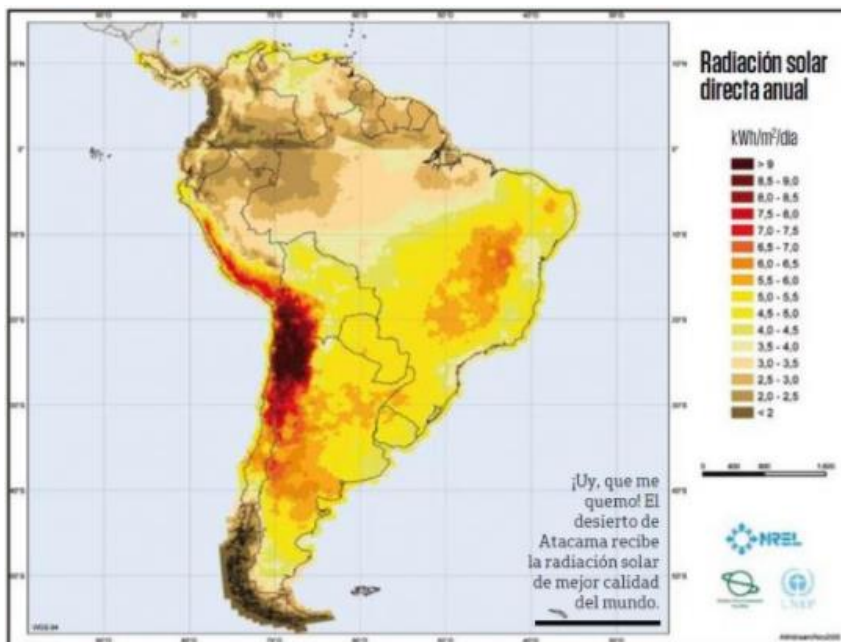
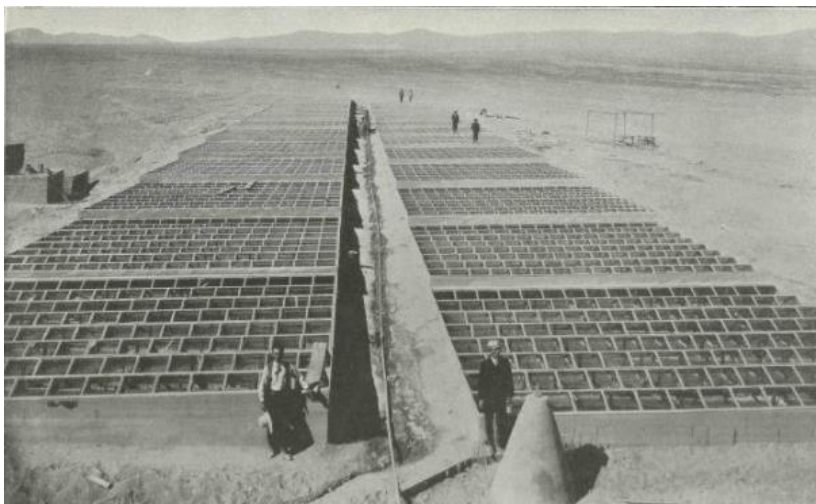


Figura 4: Registro de radiación directa recibida en Sudamérica.

De hecho, uno de los hitos históricos más importantes de la energía solar, tomo lugar en este desierto, en donde el año 1872 se construyó una de las primeras plantas desaladoras solares del mundo. Esta fue construida en la oficina salitrera Las Salinas por ingenieros británicos, y era capaz de producir hasta 5000 galones diarios de agua potable, la cual se obtenía a partir de agua existente en acuíferos subterráneos de la zona.



*Figura 5: Planta desalinizadora oficina salitrera Las Salinas.*

Si bien en esa época ya se tenía una leve noción del potencial energético solar de nuestro país, hoy en día las expectativas son mucho mayores. Las energías renovables no convencionales (ERNC) están cada vez más presentes en la matriz energética chilena, constituyendo actualmente un 17% de la red, porcentaje que se reparte en energía geotérmica, eólica, mareomotriz, solar y pequeñas centrales hidráulicas.

De entre todas estas, es la energía solar la más consolidada, en particular la fotovoltaica, que pasó de ser técnicamente viable, a económicamente competitiva, gracias a que los costos de los paneles han disminuido en un 90% desde el 2009. La capacidad instalada de plantas fotovoltaicas en el Sistema Interconectado Central (SIC) es de un 7.7% a la fecha, y el 76% de los proyectos de generación con ERNC en construcción, son de generación solar fotovoltaica. De hecho, según la Comisión Nacional de Energía (CNE), Chile ha alcanzado ya una potencia fotovoltaica instalada de más de 1750 MW. Cabe también mencionar que, en los planes a corto plazo, se vislumbran 308 MW de instalaciones fotovoltaicas que se encuentran en proceso de pruebas y 264 MW de centrales solares en construcción. Además, la CNE informa que en el mediano-largo plazo se le sumarían a la red un total de 8 MW de potencia, a raíz proyectos solares en proceso de calificación que aún no han sido aprobados.

Esto refleja el enorme potencial e interés que existe hoy en día en nuestro país por desarrollar en la mayor medida posible la energía solar, y eventualmente, consolidar un mercado en torno a ello. Es con esta intención en mente que se lleva a cabo este proyecto, el cual busca construir e implementar un heliostato con seguimiento solar en dos ejes, que pueda ser utilizado para abastecer de energía a un gasificador de combustibles sólidos de

base carbonosa, siempre teniendo en mente que su diseño no sirva solo para esta aplicación en particular, sino que también sea aplicable a otros procesos térmicos afines, y así dar pie a un nuevo campo de aplicaciones solares a nivel nacional, que permitan sacarle provecho a la radiación de una manera que aún no ha sido explotada en nuestro país, y así dar un impulso más al naciente y prometedor mercado de energías renovables en Chile.

# DESARROLLO

## 2. Marco Teórico

En esta sección se explican todos los conceptos básicos de aplicaciones y del estado del arte que se encuentran relacionados con el uso de heliostatos y tecnologías solares afines.

### 2.1 La radiación

Para comprender de adecuadamente las tecnologías, aplicaciones y comportamiento de la energía solar, es necesario entender qué es lo que la compone, de dónde proviene y cuáles son sus características.

Esta energía tiene su origen en el sol, estrella que posee una temperatura promedio de 5778 K, en la cual ocurren una serie de reacciones que culminan en la liberación de energía hacia el planeta tierra y otros astros de la galaxia. Dicha energía liberada por el sol se conoce como radiación solar, la cual se puede definir como la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas emitidas por el sol. Esta se puede presentar en tres tipos de ondas electromagnéticas según su longitud de onda: ultravioleta, visible e infrarroja.

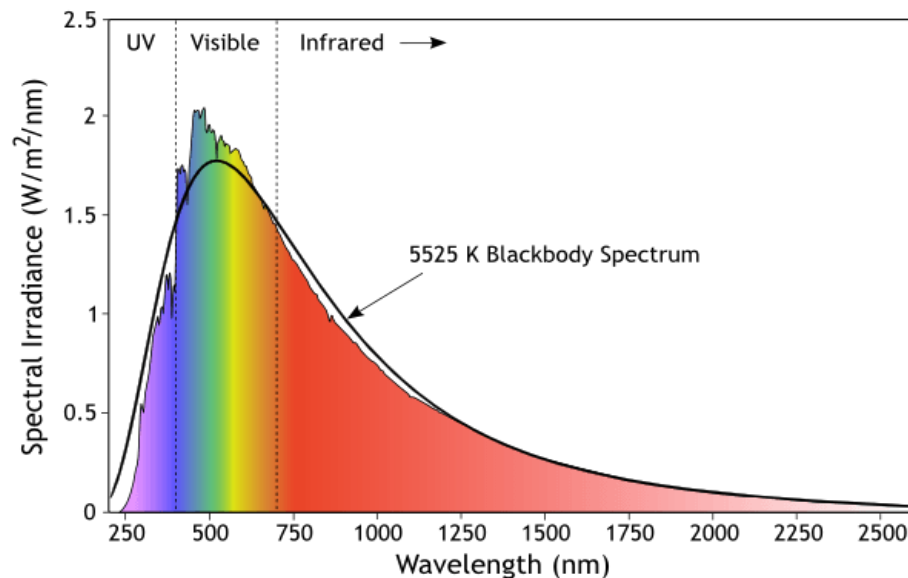


Figura 6: Distribución espectral solar.

Antes de tocar la superficie terrestre, la radiación debe atravesar la atmósfera, y al pasar a través de ésta sufre dispersión y absorción, con lo que sus rayos no inciden solamente de forma directa sobre la tierra. Es por ello que se definen cuatro tipos diferentes de radiación de acuerdo a cómo sea la incidencia de sus rayos sobre la superficie.

### 2.1.1 Radiación directa

Radiación solar que no se ha dispersado atmosféricamente. Esta incide sobre una superficie en la dirección de los rayos solares.

### 2.1.2 Radiación difusa

También llamada radiación del cielo, corresponde a la componente de la radiación solar que ha cambiado su dirección debido a la interacción con la atmósfera. Incide sobre una superficie desde toda la bóveda celeste.

### 2.1.3 Radiación reflejada

Radiación solar que incide en el suelo u otro cuerpo sólido en la superficie terrestre y luego incide en la superficie de estudio. En la literatura también se le puede encontrar como radiación albedo.

### 2.1.4 Radiación global

Radiación total que incide sobre una superficie. Es la suma de la radiación directa, difusa y reflejada.

La radiación extraterrestre es absorbida y dispersada a medida que pasa a través de la atmósfera. Para ilustrar de manera más gráfica esto, véase a continuación un esquema que muestra cómo se va descomponiendo la radiación solar extraterrestre al entrar a la atmósfera.

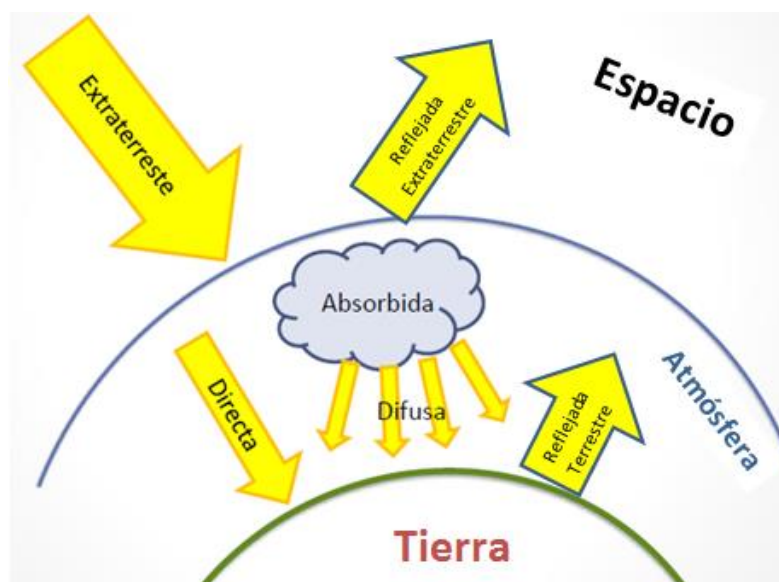


Figura 7: Tipos de radiación.

Es aquí donde entra en juego la constante solar ( $G_{sc}$ ), correspondiente a la intensidad con la cual la radiación del sol alcanza la tierra, cuyo su valor es:

$$G_{sc} = 1367 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

## 2.2 Energía solar

La energía emitida por el sol se puede clasificar de dos maneras:

### 2.2.1 Energía solar fotovoltaica

Se enfoca en la producción de electricidad a partir de celdas fotovoltaicas, las cuales generan corriente cuando la radiación incide sobre su misma superficie. La electricidad generada por estos sistemas puede ser ingresada de forma directa a redes de alimentación. Sus aplicaciones incluyen: redes de autoconsumo, sistemas de bombeo, transporte, telecomunicaciones, y plantas de generación entre otras.

### 2.2.2 Energía solar térmica

Utiliza la radiación incidente para suministrar calor a algún proceso. Esta es captada por colectores que pueden ser de baja o de alta temperatura. Son utilizados para sistemas de agua caliente sanitaria (ACS), secado de alimentos, cocinas solares, hornos solares y hasta centrales termoeléctricas.

Esta energía se puede utilizar dos maneras: con concentración y sin concentración, y cada una va asociada a diferentes equipos, procesos y aplicaciones.

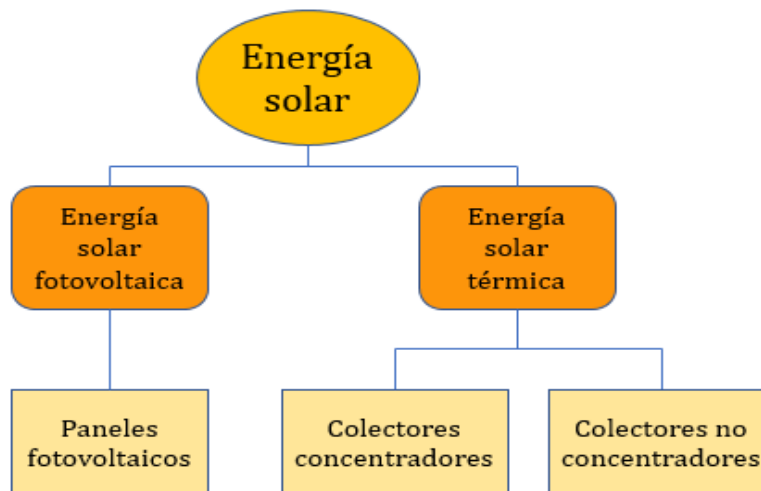


Figura 8: Ramas de la energía solar

### 2.2.2.1 Energía solar no concentrada

Aquí el área de captación del colector es igual al área de incidencia de energía, lo que implica que no se concentra la radiación, es por ello que sus temperaturas de operación suelen ser inferiores a los 100 °C. Este tipo de colector no utiliza solamente radiación directa, sino que aprovecha todas las componentes de la radiación incidente, ya sea reflejada o difusa. Por lo general no emplean mecanismos de seguimiento, por lo que la mayoría de estos colectores son fijos.

En este campo de aplicaciones se pueden encontrar los siguientes colectores:

- Colectores de placa plana (FPC): Como sus siglas lo indican este es un Flat Plate Collector. Consta de una placa metálica que actúa como absorbedor y tubos donde circula el fluido calor portador. Generalmente usan una cubierta de vidrio. Tiene una temperatura de operación máxima de 80 °C. Y sus principales aplicaciones son: el aire acondicionado, calentamiento de agua (ACS) y calor para procesos de baja temperatura.

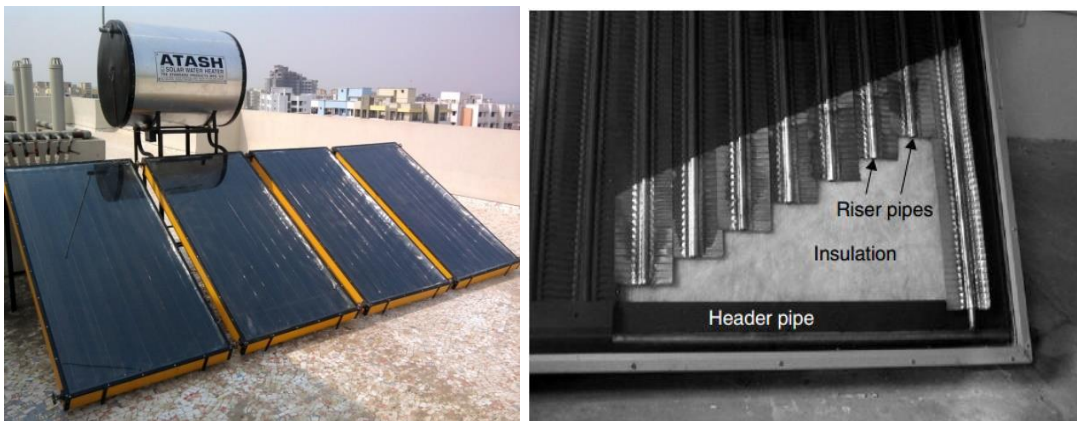


Figura 9: Instalación de colector FPC y sus componentes internos

- Colectores de tubo evacuado (ETC): Más conocidos en el resto del mundo como Evacuated Tube Collectors (o tubos al vacío), consisten en una serie de tubos (“heat pipes”) conectados a un único manifold. Aquí la radiación es absorbida por un fluido con cambio de fase (metanol, por ejemplo). Posee 2 circuitos: Circuito evaporación-condensación y circuito principal de fluido calor-portador. Estos son muy útiles para climas menos favorables. Suelen ser más eficientes debido a que tiene menos pérdidas térmicas, pero más costosos debido a que hay que estar manteniendo constantemente los tubos al vacío.

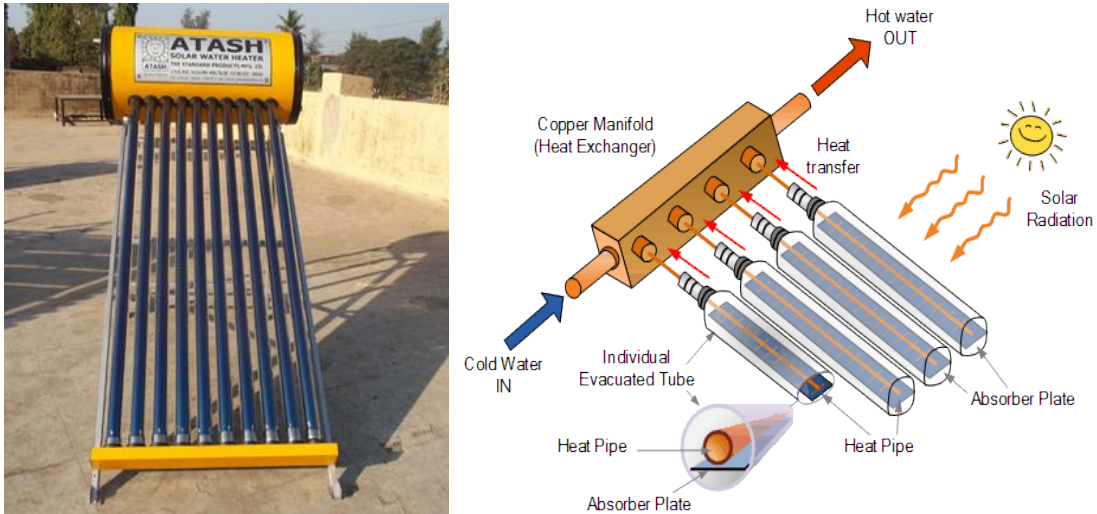


Figura 10: Colector ETC y esquema de su funcionamiento

### 2.2.2.2 Energía solar concentrada

Conocida mundialmente como energía CSP (Concentrated Solar Power), hace alusión a todos aquellos colectores que concentran la radiación solar directa en un área reducida; esto generalmente se logra a través de un arreglo de espejos que reflejen la radiación solar incidente. Las razones por las cuales es atractivo concentrar la radiación, es que debido a que:

- ✓ Se logra mayor densidad energética (más Watts por m<sup>2</sup>)
- ✓ Requiere una menor área de colección (disminuyendo pérdidas de energía)
- ✓ Se logra una mayor temperatura de operación

Para comprender este tipo de colectores se debe aclarar 3 conceptos básicos.

- i) *Área de apertura*: Superficie que recibe toda la radiación solar
- ii) *Área de recepción (o colección)*: Área donde se concentra la radiación. Dependiendo del tipo y tamaño de colector, ésta puede ser puntual o lineal.
- iii) *Razón de concentración*: Relación entre el área de apertura y de colección solar. Esta siempre es mayor a la unidad.

$$\text{Razón de concentración} = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de colección}}$$

En el mercado existen cuatro tipos de colectores concentradores, los cuales se categorizan según su tipo de foco (lineal o puntual) y su tipo de receptor (móvil o fijo).

Tipo de Colector		Foco	
		<i>Lineal</i>	<i>Puntual</i>
Tipo de receptor	Fijo	Colector Fresnel	Torre Solar (HFC)
	Móvil	Colector Cilindro Parabólico (PTC)	Colector Disco Parabólico (PDR)

Tabla 1: Tipos de colectores concentradores.

- Colector Cilindro Parabólico (PTC): El PTC o Parabolic Through Collector es un colector concentrador lineal con receptor móvil para poder seguir el sol en los diversos momentos del día. Utiliza seguimientos en un eje. Consta de una superficie reflectora, una tubería absorbadora (que es donde confluyen los rayos reflejados) y de una cubierta de vidrio (opcional).



Figura 11: Colector PTC en instalación de SEGS III, California.

- Colector Fresnel: Son de foco lineal y su receptor es fijo. Existen 2 tipos: el FLC (Fresnel Lens Colector) y el LFR (Linear Fresnel Reflector), y para concentrar los rayos en una dirección ambos usan el mismo principio: tanto los segmentos del lente como los espejos representan una porción de parábola diferente, con una distancia focal diferente.

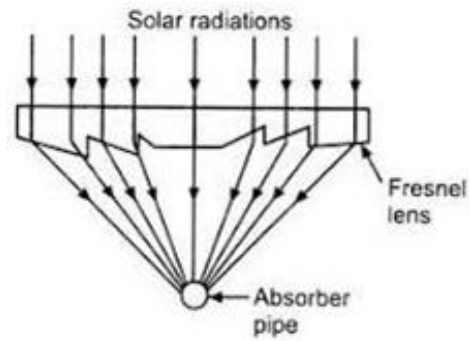


Figura 12: Colector Fresnel de Puerto Errado y su análisis óptico

- Colector Disco Parabólico (PDR): También conocido como Parabolic Dish Reflector, tiene un foco puntual y receptor móvil. Requiere de seguimiento en dos ejes y alcanza temperaturas de trabajo de hasta 1500 °C. Es un equipo modular con muy pocas aplicaciones en operación o a pequeña escala (< 1.5 [MW]). Puede convertir energía eléctrica operando un motor Stirling o transportar el fluido hacia una central de potencia.

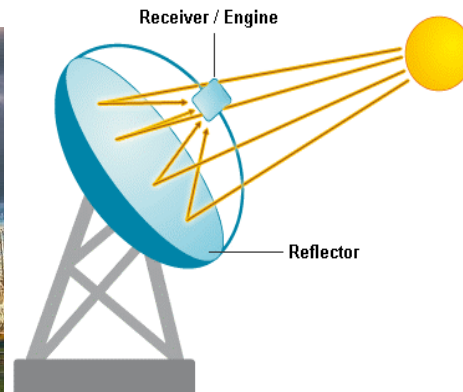


Figura 13: Colector PDR real y esquema de su modo de concentración

Es éste el principio de concentración que será utilizado para el gasificador que involucra este proyecto, el cual será explicado en detalle más adelante.

- Torre Solar (HFC): También llamado Heliostat Field Colector (HFC) o Solar Power Tower, consiste en un campo de helióstatos que redirigen la radiación solar hacia un foco puntual ubicado en lo alto de una torre. Entre sus características se puede afirmar que:
  - Posee altas tasas de concentración [300 – 1500].
  - Temperatura de salida del receptor: 550 °C - 565 °C.
  - Eficiencia de transformación eléctrica anual varía entre el 15% y 18%.

- Capacidad de almacenamiento energético se encuentra entre el 0% y el 90% de su capacidad total.
- Requiere menor preparación de suelo.

Sus aplicaciones más comunes suelen ser la generación eléctrica y calor para procesos a muy alta temperatura.



Figura 14: Planta solar Atacama-1 en la segunda región.

### 2.3 Procesos y aplicaciones CSP

Este trabajo estará enfocado en las tecnologías de concentración solar, también conocidas como CSP (Concentrated Solar Power). Existe hoy en día una amplia gama de usos y prácticas en los que la energía solar concentrada se ha hecho camino, estos van desde la producción de cal hasta la descomposición térmica de metano. A continuación, se muestra todos los procesos termoquímicos en los que la energía solar ya forma parte.

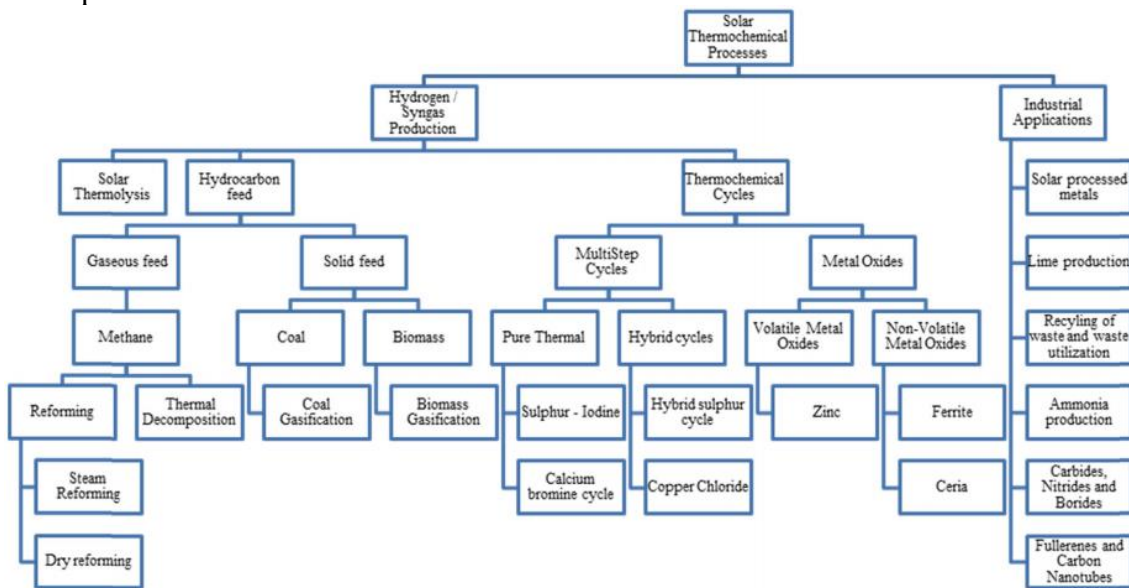


Figura 15: Mapa de procesos termoquímicos.

De esta gran familia, se hará hincapié en solo algunos procesos; para ello se clasificarán en dos categorías: de baja entalpía y de alta entalpía.

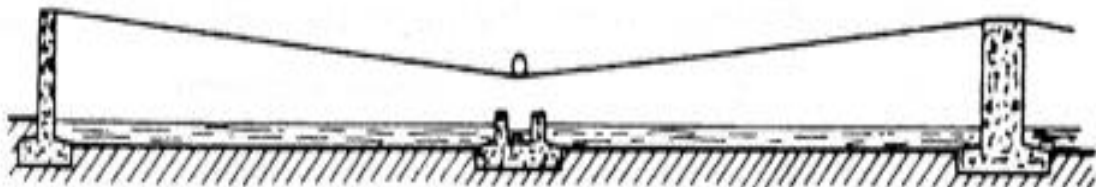
### 2.3.1 Procesos de baja entalpía

Son las tecnologías que utilizan energía térmica a baja temperatura (no más de 100 °C). Estos no entran en la categoría de procesos CSP, sin embargo, se indagará en sus aplicaciones más populares para hacerse una idea del funcionamiento y modo de operación de estas tecnologías.

#### 2.3.1.1 Desalinización de aguas

Consiste en la remoción de sales minerales disueltas en el agua de mar, la cual se realiza para la obtención de agua potable o también para sistemas de regadío. Este concepto nace en el año 1675, que es cuando se registra la primera patente sobre desalinización. Existen varios métodos para destilar agua, entre los que se encuentran la destilación en múltiple efecto, el flashing en múltiple efecto, la congelación, la compresión de vapor, la osmosis inversa, la electrodiálisis, y finalmente, la destilación solar. Los primeros no tienen gran relevancia en este trabajo, pero el último sí, por lo que solo se profundizará en éste.

La destilación solar corresponde a una aplicación con cambio de fase la cual se lleva a cabo mediante sistemas llamados “Solar Stills”, estos son básicamente estanques con una cubierta transparente (de vidrio o plástico), que almacenan el agua salina y la evaporan con la ayuda del calor aportado por la radiación solar. El principio utilizado en este sistema es el de crear una especie de efecto invernadero al interior del estanque; lo que sucede es que la radiación exterior atraviesa la cubierta, la cual actúa como trampa térmica para la radiación solar, de manera tal que ésta no logre atravesar de vuelta la cubierta transparente hacia el exterior, y así quede “atrapada” al interior del estanque. Esto hace que se caliente el agua, y cuando ésta alcanza una temperatura promedio de 60°C aproximadamente, la capa superficial de la piscina logra la temperatura de ebullición y comienza a evaporarse. Este vapor se condensa al entrar en contacto con la cubierta, con lo que se forman pequeñas gotas de agua, las cuales se van uniendo entre sí y se deslizan hacia un estanque de recolección gracias a la pendiente de la cubierta, obteniendo así agua destilada.



*Figura 16: Solar still de cubierta plástica tensionada.*

### 2.3.1.2 Calefacción

Uno de los campos con más desarrollo es el de agua caliente sanitaria, conocido también como sistemas ACS, que son muy utilizados en la calefacción y climatización de viviendas, oficinas y todo tipo de espacios. Su funcionamiento parte de una red de colectores solares a través de los cuales circula agua la cual se va calentando a medida que los colectores van captando la radiación exterior. Esto produce que haya una circulación constante de agua, la cual se mueve por diferencia de densidades (sistema pasivo) o mediante la ayuda de una bomba (sistema activo). El agua ya calentada pasa posteriormente a calentar la red de agua del recinto, ya sea de forma directa o indirecta, cuya diferencia radica en que, al utilizarla de forma indirecta, el agua de los colectores calienta el agua de la red mediante un intercambiador de calor, mientras que, al hacerlo de forma directa, es el agua de los mismos colectores la que se inyecta a la red. Estos suelen contar con un acumulador que sirve como sistema de almacenamiento para el agua caliente sanitaria ya calentada.

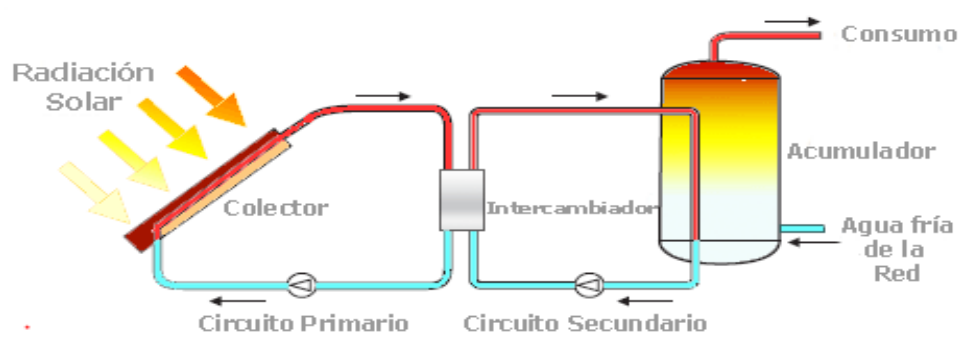


Figura 17: Instalación ACS con sistema pasivo indirecto.

Los colectores utilizados para en estas redes suelen ser de placa plana (FPC) o de tubo evacuado (ETC).

### 2.3.2 Procesos de alta entalpía

Son los que se llevan a cabo a muy altas temperaturas (200 °C y más), entre estos se encuentran el tratamiento de aceros, hornos para procesos industriales, gasificación y centrales termoelectricas entre otros. Estos deben considerar en su diseño todas las aristas que implica el trabajar bajo condiciones tan hostiles y los posibles efectos que éstas puedan generar en sus componentes, como es la expansión volumétrica de los materiales, la alteración de sus propiedades químico-físicas, y la posibilidad de fundir los elementos del sistema en cuestión. Estos procesos pueden lograrse haciendo uso de energía solar, siempre y cuando se utilice de forma concentrada.

#### 2.3.2.1 Plantas de fuerza

Son instalaciones industriales utilizadas para generar energía eléctrica a partir de alguna fuente combustible. Aquí la electricidad constituye una fuente secundaria de energía que es

obtenida a partir de la conversión de fuentes primarias de energía, tales como el carbón, gas natural, energía nuclear, geotérmica, eólica o solar, entre otras. Estas plantas suelen operar con ciclo Rankine (que utiliza vapor), ciclo Brayton (que utiliza gas) o con ciclo combinado, que es una combinación de los dos anteriores.

En el siguiente ítem se explica cómo funcionan las plantas de fuerza solares.

#### 2.3.2.1.1 Generación con torre solar

Como ya se mencionó en el punto 2.2.2.2, existen campos solares de helióstatos que se encargan de suministrar energía durante todo el día a una torre que actúa como horno solar. Esta torre hace uso de toda esta energía concentrada, y mediante el principio del ciclo Rankine es capaz de generar electricidad.

La energía recolectada por la torre es traspasada a un fluido calor-transportador que circula a través de ella, el cual va a parar a unos estanques de almacenamiento de sales fundidas. El sistema consta de dos estanques, uno a baja temperatura ( $\approx 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) por el cual pasa el fluido antes de subir al foco de la torre, y uno a alta temperatura ( $\approx 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), por el cual circula el fluido que ya fue calentado en el foco de la torre. Aquí el foco actúa como caldera. Luego de pasar por el estanque de sales a alta temperatura, el fluido pasa a un generador de vapor que le permite traspasar su energía térmica al agua del bloque generador de potencia, el cual se encarga de producir electricidad, transformarla y suministrarla a la red. Esta función es llevada a cabo por el sistema de generación que opera con ciclo Rankine. Una vez hecho esto, el fluido calor transportador ya enfriado pasa al estanque de sales a baja temperatura y se reinicia el ciclo.

Una de las grandes ventajas de estos sistemas es que, a diferencia de la gran mayoría de las tecnologías solares, ésta es capaz de producir electricidad las 24 horas del día de forma continua, ya que durante el día hace uso de la energía suministrada por el sol para generar potencia, y durante la noche, cuando no hay radiación solar, hace uso de la energía térmica almacenada en los estanques de sales fundidas para seguir alimentando al bloque de generación.

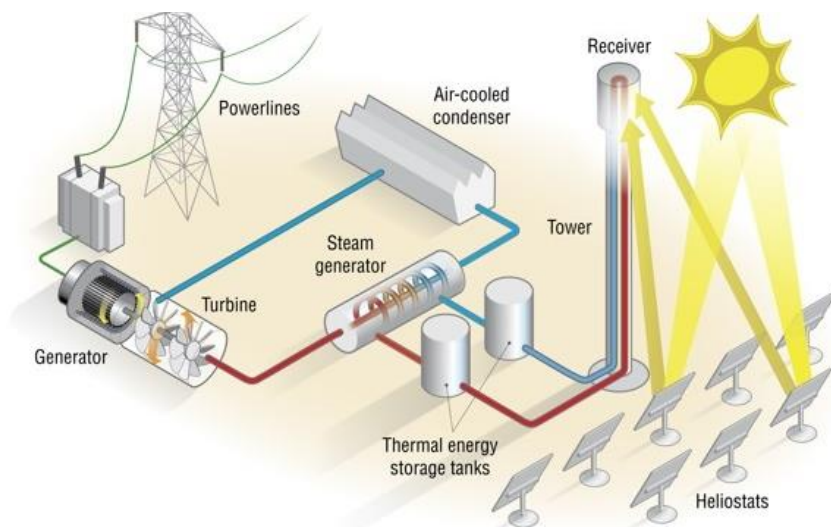


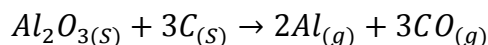
Figura 18: Layout de central de torre solar.

En un comienzo se utilizaban aceites térmicos sintéticos para el almacenamiento térmico, sin embargo, hoy en día se prefieren las sales fundidas ya que tienen un menor costo, mayor capacidad calorífica, son más inocuas con el medio ambiente y requieren de menor presión para su funcionamiento. Eso sí, cabe mencionar que éstas corren riesgo de congelamiento, por lo cual la torre debe drenarse cuando se hace alguna parada de planta.

### 2.3.2.2 Metalurgia solar

En el rubro de la manufactura y procesamiento de aleaciones metálicas se deben llevar a cabo ciertos procesos a alta temperatura, como por ejemplo ocurre en el caso del hierro, el cual debe pasar por un proceso de reducción. Éste consiste en triturar los minerales de hierro y someterlos a agentes reductores al interior de un reactor que alcanza temperaturas cercanas a los puntos de fusión de cada especie, esto con el fin de reducir los óxidos de todos los minerales involucrados (estos son Fe, FeO y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> generalmente). En el caso del aluminio ocurre algo similar puesto que también se requiere de procesos de reducción que separen el oxígeno presente en los minerales de aluminio. Es aquí en donde entra en juego la energía solar, ya que haciendo uso de concentración solar se puede aportar la energía térmica requerida para la operación de los reactores.

En el centro de estudios de Weizmann Institute Solar Facilities Unit (Israel), desarrollaron un reactor solar para la carbo-reducción de aluminio a baja presión, el cual se encuentra actualmente en etapa de pruebas. La reacción química de carbo-reducción es.



*Fórmula 1: Reacción de carbo-reducción*

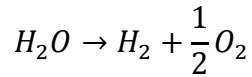
### 2.3.2.1 Química solar: Producción de H<sub>2</sub> y SYNGAS

Primero que todo se debe explicar qué es el SYNGAS. Como su nombre sugiere, consiste en un gas de síntesis compuesto por hidrógeno (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y en menor medida también por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>). Generalmente el SYNGAS suele estar compuesto en un 85% por CO y H<sub>2</sub>, y el 15% restante corresponde a una mezcla de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Éste puede obtenerse a partir de una variedad de materiales carbonosos, como la biomasa, carbón, petróleo, plásticos y residuos, entre otros.

La razón para producir SYNGAS es que de éste se puede obtener hidrógeno, metanol y combustibles sintéticos con múltiples aplicaciones en la industria.

#### 2.3.2.1.1 Hidrólisis

También llamada termólisis solar, se trata de una reacción endotérmica de disociación del agua, a través de la cual es posible obtener hidrógeno en un solo paso, como muestra la siguiente reacción:



*Fórmula 2: Reacción de hidrólisis*

Si bien esto parece bastante sencillo, presenta dos problemas que complican bastante su ejecución:

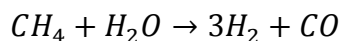
- *Altísimas temperaturas de reacción:* Mediante análisis termodinámico se estima que, con temperaturas de reacción de al menos 2500 K, a baja presión (~0.05 [bar]), se logran tasas de disociación de no más de 25%; y que, para lograr efectivamente separar todo el oxígeno de la molécula de agua, se requeriría una temperatura de aproximadamente 4300 K. Esto acarrea una serie de problemas técnicos en lo que respecta al uso de materiales, puesto que aún no se ha logrado desarrollar materiales que puedan soportar la temperatura requerida para llevar a cabo esta reacción.
- *Mezcla potencialmente explosiva:* Este es el principal problema por el cual aún no existen plantas que disocien agua por termólisis. Se debe tener mucho cuidado al separar el hidrógeno del oxígeno para que estos no reaccionen explosivamente, lamentablemente aún no se han podido idear con éxito un método seguro y eficiente de separación. Es debido a esto que la descomposición térmica del agua sigue en etapas aún muy tempranas de investigación y aún queda mucho por solucionar para que llegue a llevarse a cabo.

#### 2.3.2.1.2 Reformación de metano

Esta aplicación se utiliza para la obtención de hidrógeno y metanol. La idea a groso modo es obtener alguno de estos productos mediante el sometimiento del gas metano en conjunto con dióxido de carbono o vapor de agua, a una reacción endotérmica de alta temperatura (900 K – 1500 K), de manera tal que el gas producido pueda ser utilizado en diferentes aplicaciones industriales, ya sea sirviendo como combustible para procesos químicos, o para mejorar el poder calorífico del metano transformándolo en “gas solar recargado”, como lo hace la planta solar CSIRO de reformado de metano ubicada en Australia, la cual trabaja convirtiendo metano con un poder calorífico inferior de 353 kW, en gas recargado con un poder calorífico inferior de 428 kW, esto mediante un proceso de reformado que utiliza la energía solar captada por un campo de heliostatos.

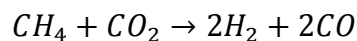
Si lo que se busca a través del reformado es una alta producción de metanol, se deberá optar por una reformación en seco, para ello se debe utilizar dióxido de carbono como reactante, así se logrará una mayor producción de CO que luego puede utilizarse para elaborar metanol. Si, por otro lado, la idea es producir una gran cantidad de H<sub>2</sub>, se deberá optar por utilizar vapor de agua como reactante.

Para producir mayor cantidad de H<sub>2</sub>:



*Fórmula 3: Reformación de metano con vapor como agente gasificador.*

Para producir mayor cantidad de CO:



*Fórmula 4: Reformación de metano con CO<sub>2</sub> como agente gasificador.*

Estas reacciones ocurren en reactores solares que pueden clasificarse dentro de dos categorías:

- *Reactores directos:* También se conocen como reactores volumétricos y corresponden a aquellos en los cuales la radiación solar es directamente transmitida a catalizadores que absorben y retransmiten esta energía a la mezcla reactante. Renombrados proyectos de reformación tales como CAESAR, SOLASYS y SOLREF han demostrado que los absorbedores fabricados en base a espumas cerámicas logran que la energía solar ingrese más profundamente al interior del material y se consiga una mejor transferencia de calor que asegure estabilidad en la reacción. Esto se debe a que dichas espumas poseen una alta porosidad.
- *Reactores indirectos:* Aquí una superficie opaca recibe la radiación solar, y esta la retransmite al gas o al medio de transferencia de calor del reactor (aire, sodio, partículas sólidas o sales fundidas). Dicha superficie puede tratarse de un tubo, una placa, etc. Este tipo de reactores tiene la ventaja de no requerir catalizador. Algunos de los proyectos actuales que hacen uso de este principio son:
  - Proyecto japonés MoSTAR de reformación en un reactor tubular. Este utiliza sales fundidas (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).
  - Proyecto WIS en Israel para reformado en seco, utilizando un tubo radiativo de sodio.
  - Proyecto CoMETHy para conversión de hidrógeno usando sales fundidas.
  - Proyecto ASTERIX, el cual además incorpora un sistema de almacenamiento térmico.

#### 2.3.2.1.3 Gasificación de combustibles sólidos

Es el proceso en torno al cual se centra este trabajo. La gasificación per se es un procedimiento mediante el cual se somete un combustible alto en carbono a altas temperaturas, esto en conjunto con un agente gasificador que puede ser vapor de agua, aire, O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>. El fin de esto es la obtención de SYNGAS. La gasificación convencional logra las temperaturas deseadas para la reacción mediante la combustión de algún combustible fósil que pueda aportar la energía térmica necesaria para gasificar. Durante los últimos 30

años la comunidad científica ha estado desarrollando otras alternativas que sirvan para energizar este proceso en base a radiación solar concentrada, a modo de alcanzar las altas temperaturas requeridas por la gasificación, pero de modo más ecológico. Los resultados han sido la obtención de un SYNGAS solar con las siguientes ventajas con respecto al SYNGAS obtenido con el proceso convencional.

➤ Ventajas SYNGAS solar v/s SYNGAS convencional:

- SYNGAS libre de residuos y subproductos contaminantes propios de la combustión.
- No se emanan productos contaminantes a la atmósfera, implicando una gasificación más ecológica.
- Mayor eficiencia de proceso, ya que no se debió utilizar combustible como energía para alimentar el proceso.
- Reducción de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en el SYNGAS resultante, lo que implica mayor porcentaje de H<sub>2</sub> y CO, que es lo que se busca.
- Incremento del poder calorífico en el gas resultante, ya que este absorbe parte de la energía solar suministrada.

Si bien se puede apreciar que los beneficios de emplear energía solar concentrada son muchos, esto también acarrea una serie de problemas operativos no menores, siendo uno de los más importantes la existencia de shocks térmicos producidos por la intermitencia de la radiación solar incidente. Esto ocasiona que en ciertos momentos del día solar haya “peaks” de producción de SYNGAS, razón por la cual se debe implementar equipos y materiales capaces de aguantar estos superávits energéticos.

Se puede gasificar una amplia variedad de combustibles, como, por ejemplo: petróleo, madera, gas natural, biomasa, carbón y residuos industriales entre otros. Y cada uno de estos pasa por etapas diferentes. Considerando el marco de este proyecto, en el cual se gasificará carbón, se explica cómo es el proceso de gasificación de dicho combustible, el cual pasa por dos etapas: pirólisis y gasificación.

#### I) Pirólisis

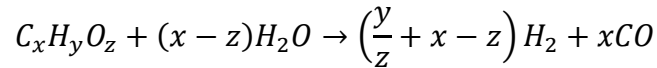
Es la etapa en que se desvolatiliza el carbón. Esto ocurre en el rango de los 400 K – 900 K, todo en ausencia de compuestos reactivos como el oxígeno. Con esto se logra convertir el carbón en una especie de coque. Cuando la pirólisis va alcanzando su peak de temperatura, producto del alto grado de rompimiento de enlaces químicos se comienzan a formar breas, alquitrán y otros gases hidrocarburos.

#### II) Gasificación

Aquí el carbón desvolatilizado resultante de la pirólisis, es sometido a un flujo gaseoso que actúa como agente gasificador, el cual puede ser de aire, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O o CO<sub>2</sub>. Este flujo reacciona en conjunto con el carbón a alta temperatura, hasta comenzar a gasificarse recién a una temperatura cercana a los 1100 K. Generalmente el carbón logra gasificarse hasta los 1800 K aproximadamente, puesto que, para temperaturas más altas, la tasa de gasificación

baja ostensiblemente y el proceso deja de ser una opción atractiva desde un punto de vista técnico.

La gasificación utilizando vapor de agua puede representarse químicamente mediante la siguiente reacción:



*Fórmula 5: Reacción de gasificación.*

## 2.4 Heliotecnia y geometría solar

Para diseñar un buen sistema de seguimiento y redireccionamiento de la radiación solar, es necesario conocer y comprender de qué manera se mueve el sol durante todo el año, y así poder determinar su posición en cualquier momento del día. Es aquí donde entran en juego una serie de variables que incluyen, entre otras, la hora civil, la hora solar, altitud solar, la ubicación geográfica, y el ángulo de incidencia del rayo solar con la superficie reflectante.

### 2.4.1 Ubicación Geográfica

Es la variable más importante en lo que respecta al posicionamiento solar, puesto que ésta determina la estación del año, la intensidad de la radiación incidente, y la duración del día solar del lugar.

Esta se define en función de tres parámetros: Latitud, longitud y altitud.

- Latitud (L): Se define como la distancia angular entre la línea del ecuador y un punto determinado del planeta, medidas con respecto al centro de la tierra. Esto sirve para indicar qué tan separado está un punto con respecto del ecuador. Por convención la latitud siempre:
  - Se mide en grados. Se considera 0° en el ecuador y 90° en los polos.
  - Tiene valor positivo en el hemisferio norte y negativo en el sur
  - Todos los puntos que tengan la misma latitud forman un paralelo
  
- Longitud (λ): La longitud local se define como la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y un meridiano considerado como base, medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto. Aquí la “línea” de referencia es el meridiano de Greenwich. De esta manera se puede saber qué tan separado está un punto dado con respecto a ese meridiano. Por convención la longitud siempre:
  - Se mide en grados. Varía entre 0° y 180°, siendo el meridiano de Greenwich el meridiano 0°.

- Tiene valor positivo hacia el este y negativo hacia el oeste.
- Se utiliza para determinar los husos horarios (o zonas horarias) a lo largo de todo el planeta

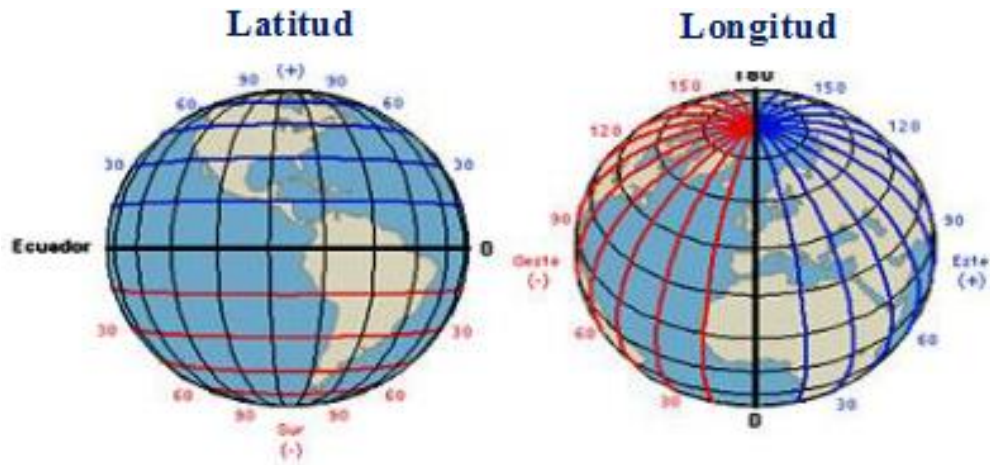


Figura 19: Latitud y Longitud.

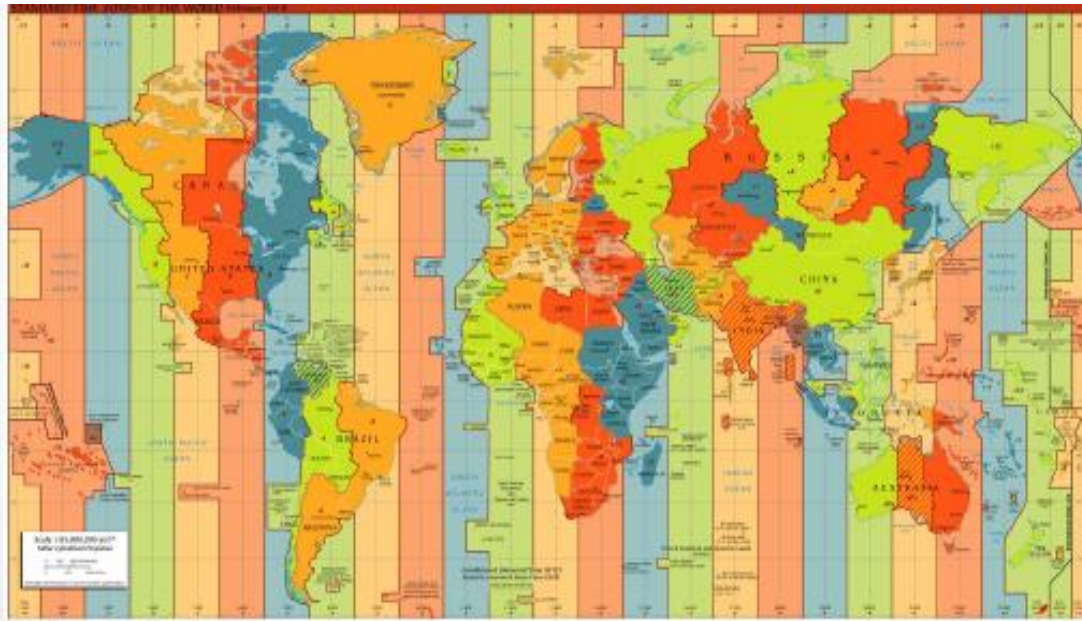


Figura 20: Husos horarios.

- Altitud ( $h_g$ ): Es la distancia vertical de un punto de la tierra con respecto al nivel del mar, considerado como nivel cero. Esta se mide en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y es positiva para valores sobre la superficie y negativa para valores bajo la superficie, lo que se le conoce como profundidad. Este parámetro se vuelve importante cuando se tiene una geografía dispereja, como ocurriría en una locación montañosa por ejemplo, en donde pueden existir superficies elevadas causen sombreamientos indeseados sobre la superficie a irradiar.

## 2.4.2 Hora civil: UTC

Como sus siglas lo indican en inglés, es el Coordinated Universal Time, y es el estándar para la medición del tiempo en nuestro planeta. Es en función de éste que se definen los husos horarios, los cuales toman valores positivos o negativos del UTC; en Chile por ejemplo se tiene un UTC-3 en horario de verano y UTC-4 en horario de invierno.

Es el UTC quien define el Tiempo Local Estándar (TLE), más conocido como Hora Civil.

## 2.4.1 Ecuación del Tiempo (ET)

Esta se calcula en minutos y su valor depende del día del año (N); su importancia radica en que permite determinar el Tiempo Solar Aparente, concepto que se explica un poco más adelante. La ET se obtiene con la fórmula:

$$ET = 9,87 \sin 2B - 7,58 \cos B - 1,5 \sin B \quad [min]$$

*Fórmula 6: Ecuación de tiempo*

Para lo cual es necesario calcular el parámetro B.

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad [^\circ]$$

*Fórmula 7: Parámetro B*

En donde N corresponde al día del año, el cual se puede determinar fácilmente haciendo uso de una tabla de conversión que traduce la fecha del año en el número N correspondiente al día del año.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Día del año (N)	i	31+i	59+i	90+i	120+i	151+i	181+i	212+i	243+i	273+i	304+i	334+i

*Tabla 2: Días N del Año*

Por lo que, si se desea saber, por ejemplo, a qué día del año corresponde el 17 de marzo, este correspondería a  $N = 76$ , siempre y cuando el año no sea bisiesto, en cuyo caso habría que sumarle 1.

#### 2.4.2 Tiempo solar medio y aparente

Por un lado, el Tiempo Solar Medio (TSM) idealiza el movimiento aparente del sol en ciclos de 24 horas, en donde cada hora equivale a  $15^\circ$  de rotación terrestre.

Por otro lado, el Tiempo Solar Aparente (TSA) es el que refleja la posición real del sol, y se diferencia del TSM en que considera la diferente velocidad de rotación que tiene el sol durante el año. El TSA es de vital importancia puesto que es en función de éste que luego se podrán obtener las coordenadas solares.

$$TSA = TLE + \frac{ET - 4(\lambda_S - \lambda_L)}{60} \quad [hr]$$

*Fórmula 8: Tiempo solar aparente*

Donde:

- TSA = Tiempo Solar Aparente
- TLE = Tiempo Local Estándar (Hora Civil)
- ET = Ecuación de Tiempo
- $\lambda_S$  = Longitud Estándar ( $15^\circ$  por cada huso horario)
- $\lambda_L$  = Longitud Local

#### 2.4.3 Ángulos solares

Para poder determinar la posición del sol en el cielo se hace uso del sistema geocéntrico, según el cual las órbitas por las que se mueve el sol alrededor de la tierra varían durante el año en función de la estación en que se esté.

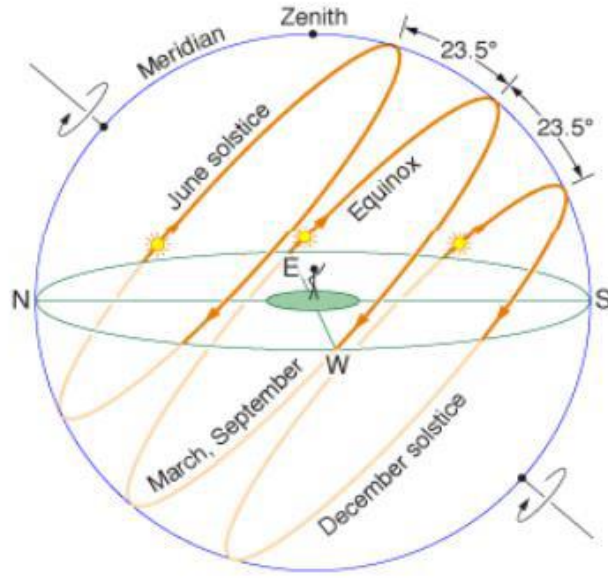


Figura 21: Órbitas solares en torno a la tierra vistas en el norte.

Teniendo esto en mente, se hace necesario profundizar en ciertos conceptos que involucran al posicionamiento solar.

#### 2.4.3.1 Declinación solar ( $\delta$ )

Se define como la desviación angular de los rayos del sol con respecto al eje ecuatorial. Este concepto parte de la base que la tierra tiene un ángulo de rotación de  $23.45^\circ$  respecto del vector normal al plano de traslación, por lo que la declinación fluctúa entre  $-23.45^\circ$  y  $+23.45^\circ$  durante el año, tomando sus valores máximos y mínimos en los solsticios de verano e invierno respectivamente.

$$\delta = 23.45 \sin\left\{\frac{360}{365}(284 + N)\right\} \quad [^\circ]$$

Fórmula 9: Declinación solar

#### 2.4.3.2 Hora solar ( $h$ )

Se determina para un punto específico en la superficie de la tierra, y corresponde al ángulo que debería rotar la tierra para traer al meridiano del lugar directamente bajo el sol (resultando en el mediodía solar).

$$h = (TSA - 12) \times 15 \quad [^\circ]$$

Fórmula 10: Hora solar

Donde:

- TSA se mide en horas
- $h = 0^\circ$  en el mediodía solar

#### 2.4.3.3 Altitud ( $\alpha$ ) y Zenit ( $\Phi$ )

La altitud solar se define como el ángulo entre el rayo solar y el plano horizontal a la superficie terrestre. Y el zenit es el complemento de la altitud.

Estos parámetros se calculan a partir de la latitud local, la declinación y la hora solar.

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad [-]$$

*Fórmula 11: Azimut y Zenit solar*

La máxima altitud solar cada día ocurre al mediodía solar, que se da cuando  $h = 0^\circ$ , y esta se abrevia  $\alpha_n$ .

Se tiene que en el hemisferio norte:

$$\alpha_n = 90^\circ - L + \delta \quad [^\circ]$$

*Fórmula 12: Altitud máxima en hemisferio norte*

Y para el hemisferio sur:

$$\alpha_n = 90^\circ + L - \delta \quad [^\circ]$$

*Fórmula 13: Altitud máxima en hemisferio sur*

#### 2.4.3.4 Azimut solar ( $z$ )

Se define como el ángulo entre la proyección de los rayos del sol en el plano horizontal con respecto a una referencia. En el hemisferio sur éste se mide con respecto al norte y viceversa. El azimut se considera positivo hacia el oeste y negativo hacia el este.

Se calcula de la siguiente manera.

$$z = \begin{cases} \sin^{-1}\left[\frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)}\right] & , \quad \cos(h) > \frac{\tan(\delta)}{\tan(L)} \\ -180^\circ + \left| \sin^{-1}\left[\frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)}\right] \right| & \text{(mañana)} \\ 180^\circ - \sin^{-1}\left[\frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)}\right] & \text{(tarde)} \end{cases} \quad [^\circ]$$

Fórmula 14: Azimut solar

Y con este último concepto claro, ya es posible calcular la posición del sol en cualquier lugar del mundo a cualquier día y hora del año.

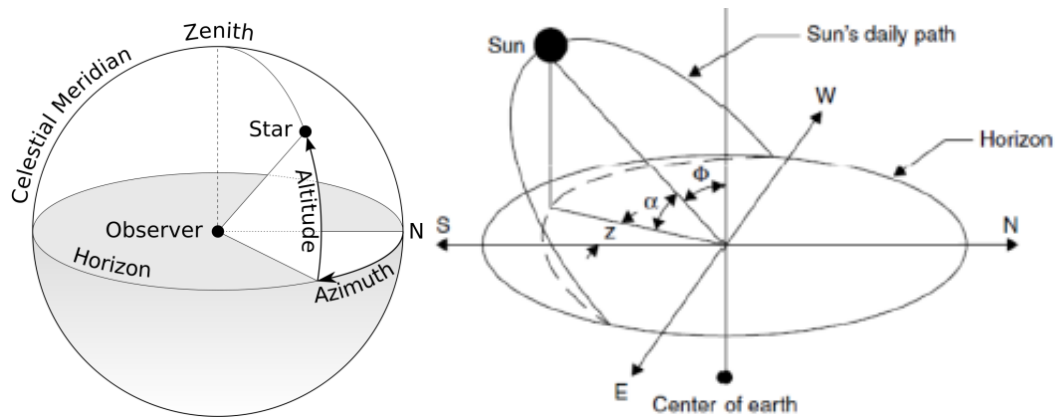


Figura 22: Mapa de coordenadas solares.

## 2.5 Helióstatos

Ya habiendo profundizado en todos los aspectos vinculados al posicionamiento solar, ahora recién es posible hablar del tema principal de esta tesis: Los heliostatos.

Estos son sistemas cuya función es captar la radiación que proviene del sol y proyectarla (o redirigirla) hacia un punto durante todo el día solar, el cual comienza con la salida del sol y termina con la puesta de este.

Para lograr su cometido, los heliostatos hacen uso del principio de reflexión óptica, de forma tal que el vector normal al plano del heliostato bisecte el ángulo formado entre el vector de incidencia solar y el vector de proyección.

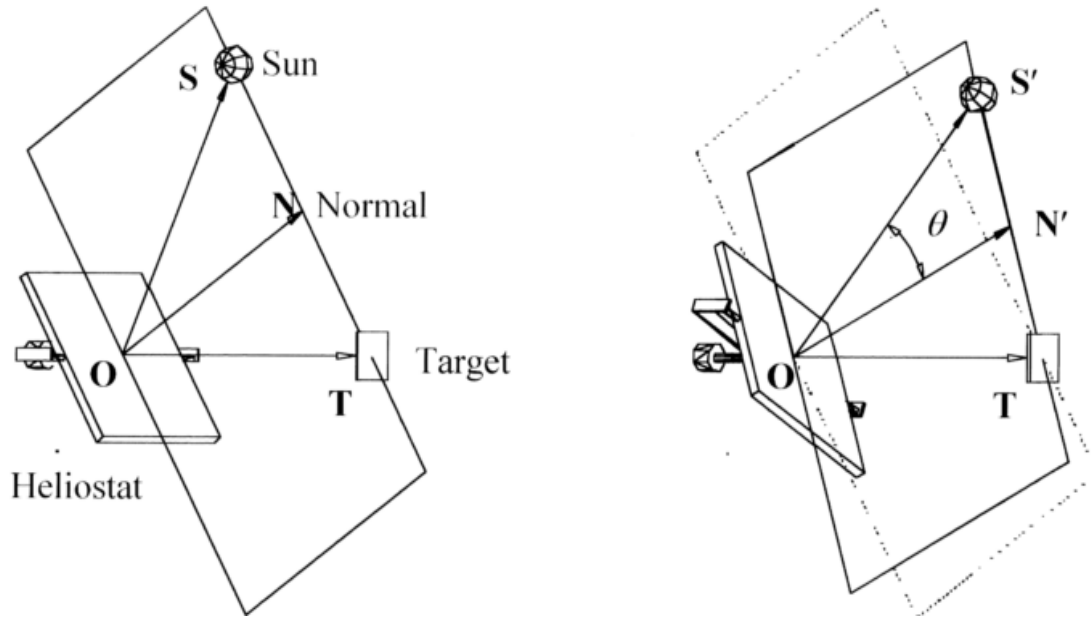


Figura 23: Ley de reflexión en helióstatos.

Aquí el único que permanece constante durante todo el día es el vector de proyección ( $\overrightarrow{OT}$ ) que apunta hacia el objetivo (“target”), puesto que el sol se mueve todo el día, con lo cual el vector de incidencia ( $\overrightarrow{OS}$ ) y el normal ( $\overrightarrow{ON}$ ) están en constante cambio.

Para poder lograr esto, suele contar con sistema de seguimiento en dos ejes, de forma tal que sea capaz de realizar dos movimientos: el cenital y el azimutal, los cuales se llevan a cabo con respecto al zenit y al azimut respectivamente.

### 2.5.1 Estado del arte: Funciones y sus sistemas asociados.

Para que un heliostato sea capaz de operar adecuadamente, debe cumplir con una serie de subfunciones que suelen estar asociadas a ciertos sistemas y componentes específicos.

<b><u>Subfunción</u></b>	<b><u>Componente o sistema asociado</u></b>
1) Reflejar radiación solar	Espejos
2) Fijar los espejos	Estructura de soporte
3) Fijación a tierra	Vigas y cimientos
4) Determinación de desfase	Control
5) Rotación de los espejos	Mecanismo motriz

Y para comprender bien en qué consiste cada uno de estos, se describen los sistemas y componentes asociados a continuación.

### 2.5.1.1 Espejos

Existen varias alternativas de superficies reflectantes en el mercado, siendo las más populares la película (o cinta) reflectante y el vidrio reflectante. Este vidrio puede tener un espesor que va desde 1 hasta 4 [mm] y se utiliza bastante puesto que no es caro, tiene alta durabilidad y una muy buena reflectancia. Por otro lado, la película reflectante aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo, pero muestra una alta reflectancia y posee la ventaja comparativa de ser muy ligera, lo que se traduce en costos estructurales mucho menores.

También es posible encontrar otros tipos de espejos, como es el metal pulido y los espejos plásticos, pero el problema que tienen estos es que poseen reflectancias muy bajas.

### 2.5.1.2 Estructura de soporte

Existen numerosos diseños con diferentes áreas de captación, tipos de armadura, sistemas de sujeción y anclaje, etc. Pero los más populares en la industria caen en las siguientes categorías.

#### ➤ Helióstatos tipo T con marco de acero

Son aquellos en los cuales los paneles (o espejos) están fijos a una estructura de vigas la cual confluye en un tubo horizontal que se une en su centro con el pedestal que soporta toda la estructura. Puesto que el acero y el vidrio poseen diferentes coeficientes de expansión volumétrica, es imperativo que las uniones entre las vigas y los paneles tengan pasadores flexibles a modo de evitar esfuerzos en los espejos.

Estos diseños deben soportar grandes cargas en los extremos de los paneles, lo que a veces ocasiona deformaciones por flexión en el tubo horizontal debido al peso propio de la estructura.

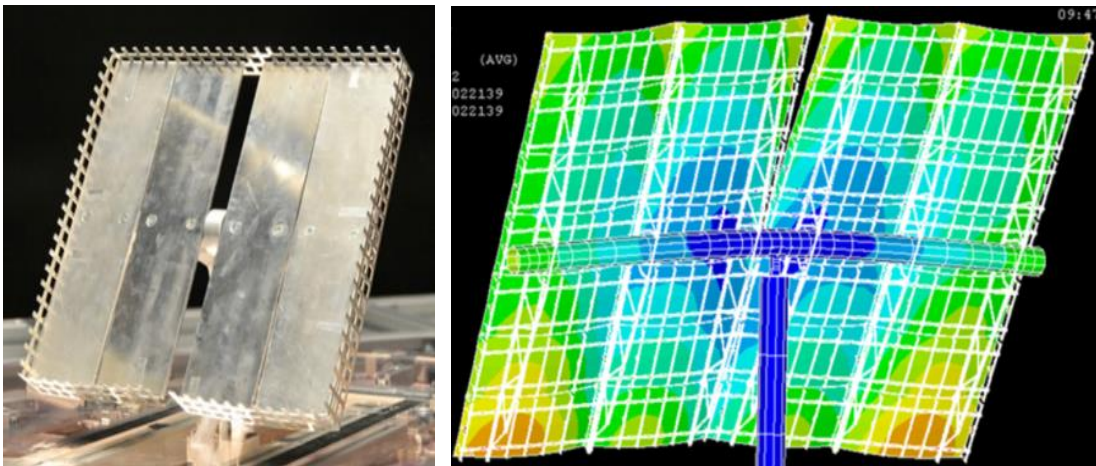


Figura 24: Helióstatos tipo T.

➤ Helióstatos de espejo estampado

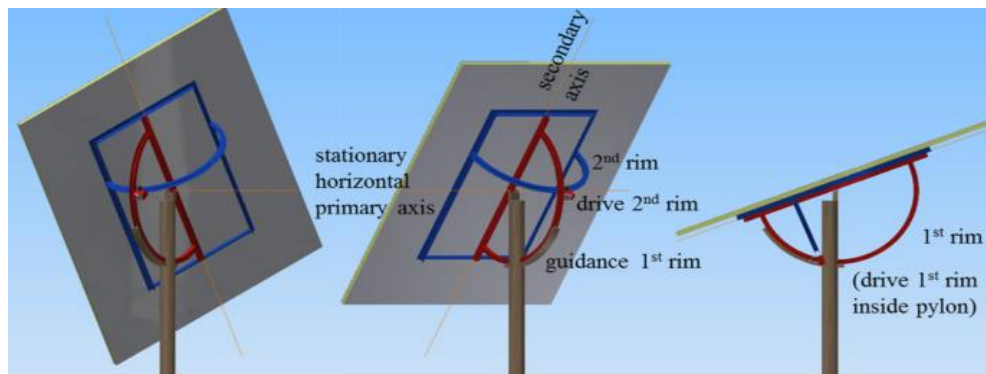
Son aquellos en que la estructura del soporte va estampada al espejo reflectante con algún adhesivo especializado. Aquí la flexibilidad del adhesivo compensa las diferencias de expansión térmica entre el metal y los paneles. Este tipo de soportes suele ocupar paneles ligeramente más delgados y menos componentes estructurales, lo que se traduce en una considerable disminución en el peso total de la estructura y una mayor facilidad de ensamblaje y fabricación. Algunos de estos también son en T.



*Figura 25: Helióstatos de espejo estampado.*

➤ Helióstatos con paneles tipo sándwich

Son aquellos en donde los paneles reflectantes están formados por un espejo delgado por un lado, una capa de acero por el otro y una espuma de poliuretano entre ambos. Todos sus bordes están sellados y enmarcados para prevenir contra la humedad. Con respecto a la estructura esta suele estar compuesta de dos guías perpendiculares que pivotan con respecto a dos ejes, primario y secundario. Estas guías están unidas a un marco, el cual sostiene al panel reflectante que rota en torno a dos los ejes. La rotación se logra mediante dos ruedas, un en cada guía, las cuales permiten el movimiento del panel en torno a ambos ejes.



*Figura 26: Helióstatos con paneles tipo sándwich.*

Este diseño presenta una serie de ventajas (y desventajas) con respecto a los anteriores.

#### **Ventajas**

- Menor peso de estructura
- Menor carga en los rodamientos
- No requiere componentes mecánicos de precisión

#### **Desventajas**

- Alta carga en las guías
- Alta dificultad de montaje
- Requiere mayor altura de elevación, con lo que aumenta la carga eólica

### 2.5.1.3 Vigas y cimientos

Son los elementos encargados de anclar el heliostato al suelo, lo cual suele hacerse con cimientos de hormigón. Ésta suele ser la solución implementada puesto que provee al aparato de una base sólida a un precio razonable. Para desarrollarlo se debe construir una base de concreto sólida, a la cual el heliostato se une mediante métodos de sujeción mecánica, como pernos por ejemplo. Otra práctica muy común consiste en excavar un hoyo en el suelo, al cual se le inserta el pedestal y luego se rellena con cemento el resto del hoyo. Estas dos aplicaciones suelen emplearse para heliostatos grandes, puesto que requieren de bases sólidas que sean capaces de aguantar las cargas eólicas a las que se vea sometido el sistema.

Para heliostatos más pequeños no se justifica dicho nivel de construcción, de hecho, en la planta solar “Sierra Sun Tower” de “eSolar”, se demostró que para aquellos con un área de captación menor a 2 [m<sup>2</sup>] que no estén sometidos a grandes vientos, es innecesario aplicar sujeciones al suelo, ya que estos son capaces de mantener su posición fija simplemente haciendo uso de su propio peso

### 2.5.1.4 Control

La misión del heliostato es reflejar la luz solar hacia un punto fijo de la forma más exacta posible, es por ello que los mecanismos de control deben ser capaces de determinar la orientación de los paneles reflectantes y determinar posibles desviaciones a modo de poder minimizar y corregir los desfases involucrados. Dentro del sistema de control se pueden encontrar controladores, sensores, codificadores, interruptores de fin de carrera y procesadores que se encargan de transmitir señales al mecanismo motriz para que éste pueda direccionar el heliostato a la posición deseada.

Se suele tener dos tipos de algoritmo, lazo abierto y lazo cerrado.

#### ➤ Lazo cerrado (“Closed-loop”)

Utiliza un sistema de sensores ópticos para controlar la posición de los paneles. Estos sensores suelen ir montados directamente por sobre el heliostato y se utilizan para detectar la posición del sol y la del objetivo mediante procesamiento de imagen. Esta información permite al sistema de control orientar el espejo de forma que el punto céntrico entre las

imágenes captadas (representada por el vector normal al espejo) coincida con el punto medio entre el sol (S) y el receptor (R).

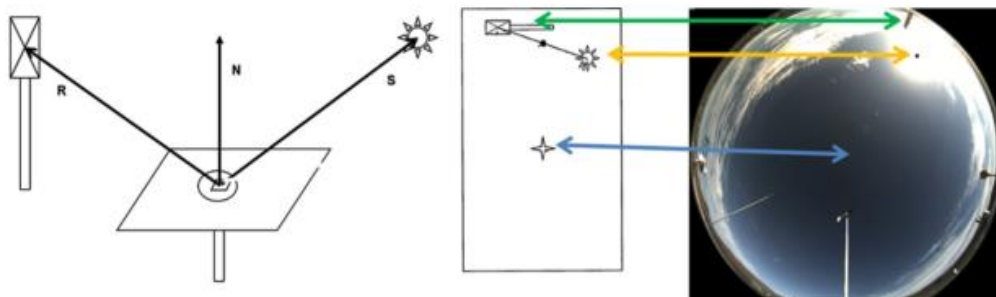


Figura 27: Funcionamiento de sensor óptico.

➤ Lazo abierto (“Open-loop”)

Este algoritmo se basa en el principio de que la posición del sol es totalmente predecible durante todo el año. A partir de ello, estos sistemas calculan dónde se encuentra el sol y envían señales al mecanismo motriz para que este mueva a los espejos a lo largo de la trayectoria solar ya predeterminedada. Estos sistemas funcionan muy bien, sin embargo, su eficiencia se ve altamente alterada cuando la estructura sufre deformaciones ya que eso genera que la reflexión se distorsione y no llegue al receptor como corresponde, por lo cual estos sistemas deben estar bien mantenidos y calibrados.

En ambos sistemas se puede tener dos opciones de redes: Cableadas o no cableadas. Las redes cableadas son aquellas en las cuales todos los heliostatos se conectan a un sistema central de control. Esto se utiliza en plantas comerciales donde los campos de heliostatos poseen una gran área de colección. Este tipo de redes no es la opción económicamente más viable cuando se tiene heliostatos pequeños ya que para estos, el costo de cableado sube mucho. Para estos casos conviene usar redes no cableadas, en donde cada heliostato funciona de forma independiente. Una forma popular para lograr esto es alimentar el heliostato mediante un panel fotovoltaico que le suministre la corriente necesaria para su sistema motriz, y que dicho sistema sea controlado a través de una red central inalámbrica vía WiFi.



Figura 28: Heliostato alimentado por panel FV y comunicado por antena.

### 2.5.1.5 Mecanismo motriz

Aquí hay dos grandes aspectos a considerar, uno es la fuente de poder y el otro es la transmisión del movimiento. Se profundizará cada uno de estos por separado.

#### ➤ Fuente de poder

Actualmente existen dos tipos de tecnologías aplicables a heliostatos: Motores rotatorios electromagnéticos y accionadores hidráulicos.

Los motores rotatorios son una solución muy atractiva ya que pueden generar movimiento para aplicaciones que requieren tanto grandes como pequeñas cantidades de energía. Estos motores duran bastante, son fáciles de mantener y como varios de sus componentes se fabrican a gran escala, no involucran grandes costos. Por lo general se suelen utilizar motores de corriente directa (DC) o sino motores asíncronos de corriente alterna (AC).

Los accionadores hidráulicos son más utilizados en aplicaciones de alta potencia. Esto involucran bombas hidráulicas, servo-válvulas, controladores electrónicos y motores rotatorios hidráulicos. Como estos trabajan con fluidos, se generan desgastes en sus sellos y componentes con lo cual se hace necesario realizar mantenimiento de manera constante, lo cual sube mucho su costo.



*Figura 29: Accionadores rotatorios y lineales activados por motores rotatorios.*

#### ➤ Transmisión de movimiento

Aquí los aspectos críticos a considerar son la relación de transmisión y la precisión. Los heliostatos requieren una muy baja velocidad de rotación, pero un torque muy alto, lo que exige que los motores rotatorios tengan altas relaciones de transmisión. Por otro lado, una de las dificultades más grandes radica en los pasos de giro por revolución de estos, puesto que cada motor avanza una cantidad específica de ángulos por cada paso recorrido

("degrees per-step"), por lo que si se requiere una rotación angular que no sea múltiplo del número de ángulos por paso disponibles en el motor, el movimiento no será preciso.

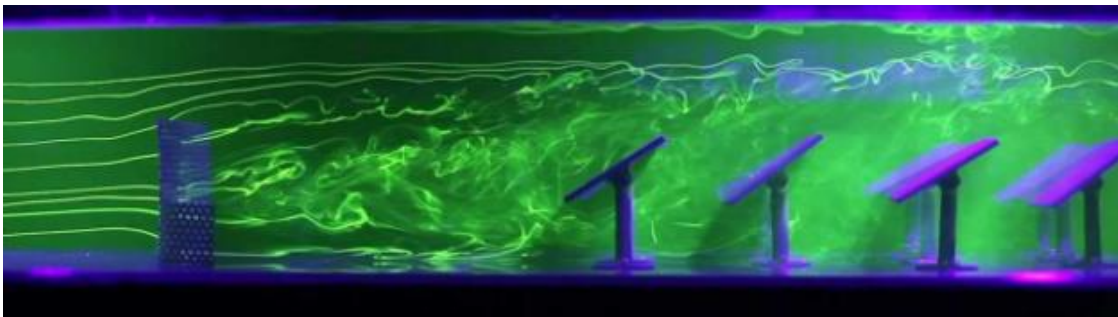
Existen numerosos mecanismos y componentes que posibilitan la transmisión dependiendo de la potencia, velocidad y exactitud requerida. Los elementos más utilizados son las correas de transmisión, piñones, cremalleras, tornillos sin fin, ruedas de fricción, engranajes, pernos, tuercas, etc.

#### 2.5.1.6 Carga eólica

Los heliostatos no solo están expuestos al sol, sino también a mucho viento. Esto implica que los cimientos, la estructura, los engranajes y todo su diseño debe considerar las cargas eólicas del lugar en que esté. Numerosos estudios demuestran que en zonas ventosas se producen turbulencias que generan cargas importantes en los componentes de estos sistemas, por lo que es importante tomar en consideración las condiciones de la zona para ver cómo estas podrían afectar en el funcionamiento del heliostato.

Los efectos del viento en heliostatos se pueden dividir en dos: Carga eólica estática y dinámica. Por un lado, la carga estática depende del cuadrado de la velocidad del viento, por lo que una pequeña variación en la velocidad implica una diferencia significativa en la carga percibida. Una forma popular y efectiva de reducir las cargas estáticas consiste en instalar una reja porosa en el perímetro del módulo reflectante, con esto se minimiza la separación del flujo y se logra reducir el torque causado por el viento en hasta un 40%. Esta reducción se traduce en hasta un 30% menos de material requerido en la estructura del heliostato y sus cimientos, lo cual disminuye considerablemente los costos totales.

También se puede reducir las cargas estáticas poniendo una reja porosa horizontal alrededor del heliostato (en vez de sobre él), con esto se logra disminuir en hasta un 40% la fuerza horizontal y los torques percibidos por los heliostatos.



*Figura 30: Flujo de viento sobre heliostato a través de reja porosa.*

Por otro lado, la carga dinámica va ligada a la formación de vórtices por detrás del heliostato, lo cual genera turbulencias que pueden hacer vibrar y resonar la estructura. Una posible solución para esto es aumentar la rigidez de la estructura de soporte, lo que suele traducirse en un aumento en los costos.

### 3. Propuesta de tres configuraciones de heliostatos

La idea inicial en que se engloba el desarrollo del heliostato es en llevar a cabo un proyecto de gasificación solar a haciendo uso de tecnologías CSP. Para ello se decidió una configuración inicial que parte con la recepción de la radiación solar por parte de un heliostato, el cual redirige los rayos incidentes hacia un disco parabólico que los concentra en la entrada de un reactor, luego éste hace uso de toda esta energía para gasificar el combustible sólido en base carbonosa que se encuentra en su interior, y así obtener gas de síntesis. La configuración esquemática para este sistema es la siguiente.

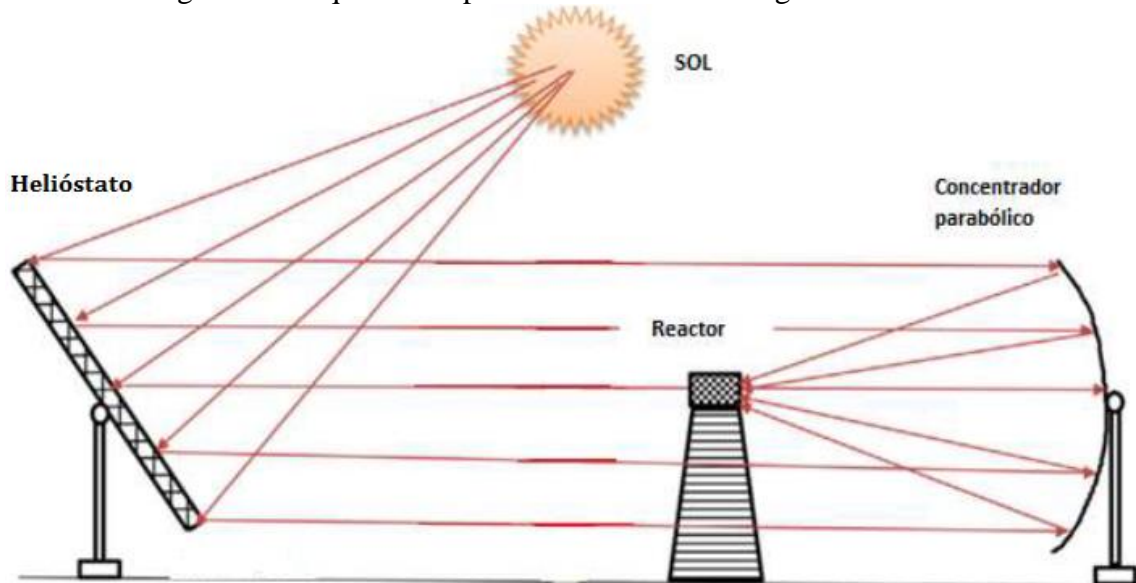


Figura 31: Configuración esquemático de sistema de gasificación solar.

Con este objetivo se fueron proponiendo ciertos diseños de heliostato, cuyas dimensiones y estructura fueron cambiando conforme evolucionaba la configuración del sistema de gasificación elegida, teniendo siempre en cuenta los materiales a los cuales se podía acceder en el momento.

#### 3.1 Diseño N°1

En un comienzo se propuso utilizar un disco concentrador abandonado en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Sede de Viña del Mar. A este se le realizó un levantamiento y de acuerdo con sus dimensiones se le diseñó una estructura de soporte en Autodesk Inventor.



*Figura 32: Disco parabólico inicial y su diseño de soporte.*

Este disco posee un área proyectada de apertura de 5,5 [m<sup>2</sup>] aproximadamente y tiene la particularidad de ser ovalado, no circular, ya que, de acuerdo con su geometría, posee un lado más largo que el otro. Al tener el disco erguido según su posición de diseño, este tiene longitud vertical de 2,7 [m] y una longitud horizontal de 2,4 [m]. Es necesario señalar también que su foco de concentración no se encuentra en el centro del disco, sino más bien en las cercanías del extremo inferior del disco, a lo largo de su eje vertical.

Este disco no posee una capa reflectora en su cara cóncava, por lo que se propone adherirle sobre esta una película reflectante solar modelo 1100 marca 3M<sup>TM</sup>, la cual cuenta con una reflectancia de 94%.

Considerando una radiación incidente promedio de 1 sol (1.000 [W/ m<sup>2</sup>]), se tendría una potencia nominal de concentración de aproximadamente 5.500 [W] en su foco, y tomando que tanto el helióstato como el disco parabólico usarían la película metálica reflectante 3M<sup>TM</sup>, se tendría una potencia neta de concentración en el foco de aproximadamente:

$$P_{Neta,N^{\circ}1} = P_{Nominal,N^{\circ}1} \times 0,94^2 = 5.500 [W] \times 0,94^2$$

$$P_{Neta,N^{\circ}1} \approx 4.860 [W]$$

*Fórmula 15: Potencia neta de Diseño N°1.*

Y en vista de que se tiene estimado un consumo de entre 4.000 y 6.000 [W] para el proceso de gasificación, sí se alcanzaría a suministrar la energía requerida para la producción de SYNGAS.

Para este diseño se planteó la utilización de un helióstato grande que abarcara toda el área de apertura del disco. Éste habría de tener paneles cuadrados hechos de vidrio reflectante con una superficie total de 9[m<sup>2</sup>] (3 [m] por lado) y la estructura sería de acero.

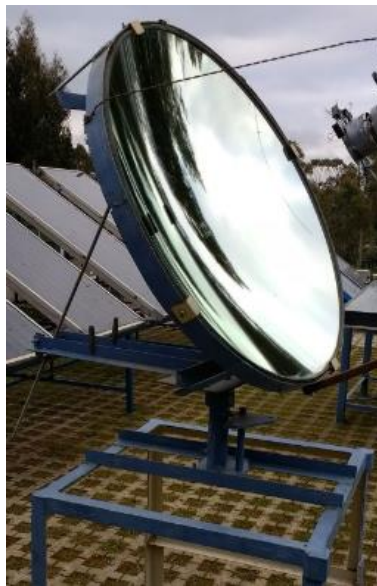
Al ir desarrollando este diseño y someterlo a análisis, fueron saliendo a la luz una serie de complicaciones que culminaron en la reevaluación y rediseño de esta estructura y la configuración general. Las complicaciones fueron:

- La gran envergadura del soporte del disco implicaba un gran costo y un considerable tiempo de mecanizado para la fabricación de sus piezas.
- Al utilizar ese disco, se requeriría tener al helióstato en una posición muy alta (al menos 3 [m]) a fin de que los rayos que este proyecta sobre el disco no sean sombreados por el reactor que se encuentra entremedio de ambos. Para ello habría que implementar una estructura de helióstato muy grande y pesada que estaría sometida a cargas eólicas significativas, por lo que necesitaría pilares anchos, rodamientos pesados y un fuerte sistema motriz que fuese capaz de mover el panel de forma eficiente. Esto se traduce en el uso de grandes accionadores lineales y motores hidráulicos que no iban a ser fáciles de conseguir.

### 3.2 Diseño N°2

Se replanteó la configuración del sistema y se propuso un segundo layout. En este nuevo planteamiento se parte del hecho que el reactor para gasificación necesita estar orientado hacia abajo, lo que limita al disco parabólico a están mirando hacia arriba, y al utilizar un disco parabólico grande se requiere un helióstato con mucha altura y de gran envergadura, lo cual, de acuerdo con los puntos recién discutidos, complica la implementación del sistema. Es por ello que se descarta la opción de utilizar el disco parabólico de 5,5 [m<sup>2</sup>] y se opta por emplear otro disco parabólico más pequeño disponible en el LER. Este es el disco parabólico marca C.A. Parsons con diámetro igual a 900 [mm] y el foco a 350 [mm] del centro del disco medido a lo largo de su eje central.

Este posee un área proyectada de apertura de 0,636 [m<sup>2</sup>], lo que se traduce en una potencia nominal de concentración de aproximadamente 636 [W] en su foco.



*Figura 33: Disco Parabólico A. C. Parsons.*

Dado que este disco es considerablemente más pequeño que el anterior, su aporte energético también es mucho menor, y como lo que se desea es un suministro de potencia mayor a los 4.000 [W], no alcanza simplemente con un helióstato alimentando a este disco. Es por ello que se toma la determinación de poner 9 helióstatos pequeños apuntando hacia el disco parabólico pequeño de forma simultánea. De esta manera, el disco recibiría una radiación de 9 soles, lo que equivale a una potencia nominal de concentración de unos 5.724 [W] en su foco.

Este disco ya cuenta con un espejo reflectante por lo cual no es necesario realizarle ninguna intervención. No se tienen detalles técnicos sobre su índice de reflectividad, sin embargo, este demostró ser altamente eficiente durante ensayos de gasificación realizados en ocasiones anteriores, por lo que se considerará que su reflectancia es igual a la de la película 3M. Considerando que los 9 helióstatos y el disco tienen una reflectancia de 94%, se lograría una potencia neta de concentración aproximada de:

$$P_{Neta,N^{\circ}2} = P_{Nominal,N^{\circ}2} \times 0,94^2 = 5.724 [W] \times 0,94^2$$

$$P_{Neta,N^{\circ}2} \approx 5.057 [W]$$

*Fórmula 16: Potencia neta de Diseño N°2.*

Los helióstatos tendrían una superficie de 1 [m<sup>2</sup>] (1[m] por lado) y su construcción sería a partir de materiales ligeros para abaratar costos y facilitar su construcción.

La estructura de estos sería en base a piezas impresas en una impresora 3D, la cual utilizaría filamento PETG (politereftalato de etileno de glicol) para construirlas. La razón para usar este material es que es muy ligero, resistente y suele durar mucho. Para imprimir las piezas, la impresora solo necesita el archivo con la pieza hecha en Autodesk Inventor, guardada en formato STL.

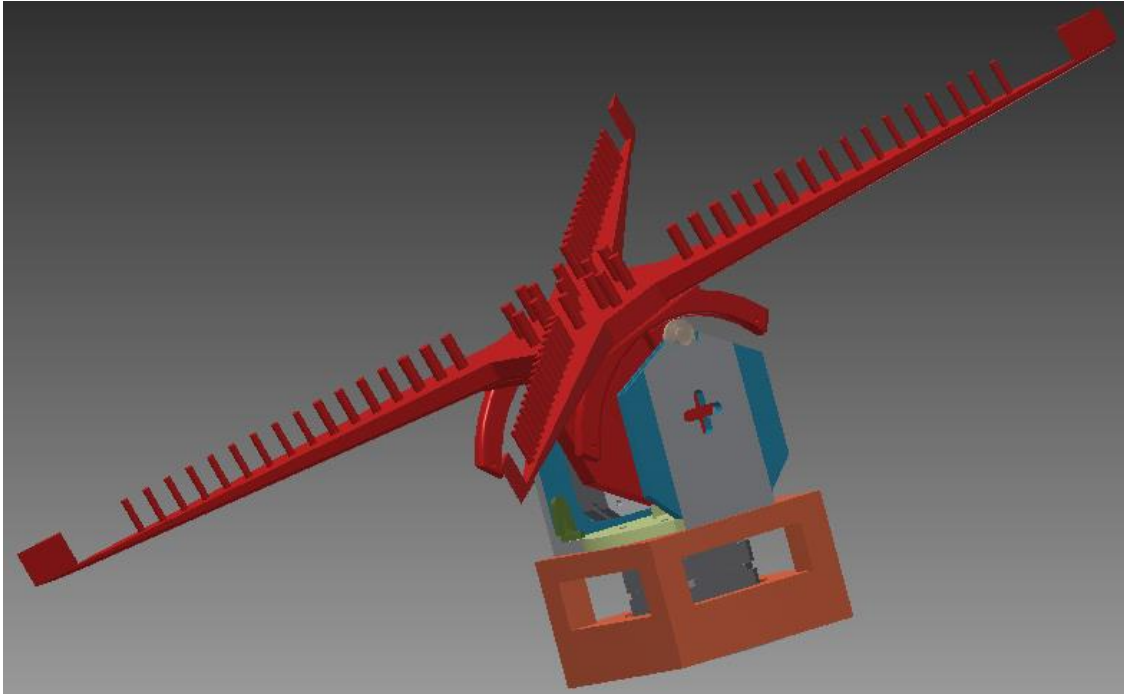
Los espejos a utilizar serían planchas de plumavit recubiertas con la película reflectante 3M™. Con esto se podría reflejar la radiación incidente sin añadir ninguna carga significativa a la estructura, siendo además de muy fácil montaje.

Para el sistema motriz de estos helióstatos se utilizarían dos motores paso a paso obtenidos de unas antiguas impresoras en desuso. Estos son los motores stepper Epson EM-402, capaces de entregar un torque máximo de 4 [kg/cm]. Un motor se encargaría de dar al panel de espejos el movimiento cenital y el otro de darle el movimiento azimutal.

Referente al sistema de control, cada helióstato estaría controlado por una placa electrónica Arduino UNO acoplada a un controlador de motores L293D Motorshield. Estos se encargarían de ordenar a los motores paso a paso que muevan el panel reflectante de forma tal que los rayos solares incidentes se reflejen sobre el disco parabólico.

Estos motores y controladores se explicarán más en detalle en los puntos 4.3 y 4.4.

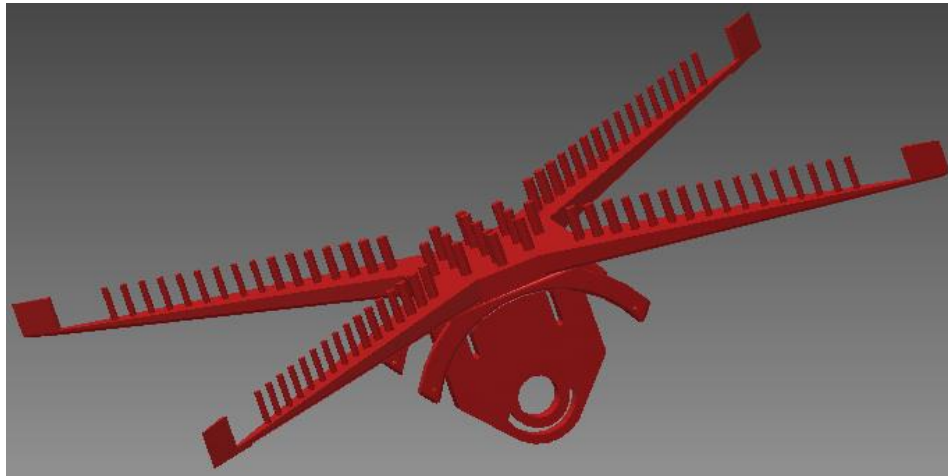
Dicho diseño se vería así:



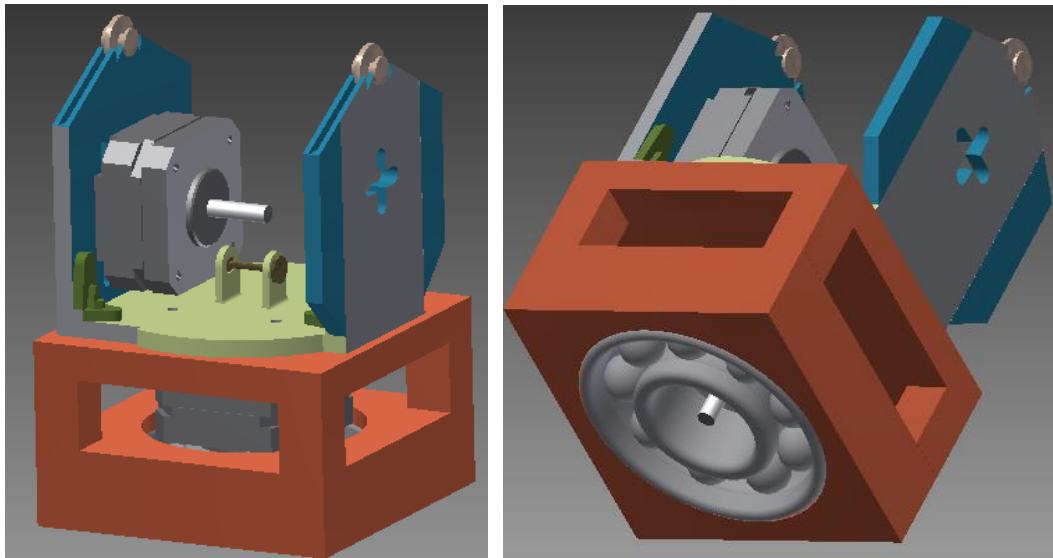
*Figura 34: Modelación del segundo diseño*

Esta estructura iría montada sobre un tubo de PVC que le daría al sistema la altura necesaria para poder reflejar los rayos al disco parabólico, a modo de evitar posibles sombreados con el reactor que se encuentra entremedio. Dicho tubo de PVC se incrustaría en una base cuadrada de por lo menos 1 [m<sup>2</sup>] para asegurar la estabilidad del sistema frente a su peso propio y los vientos en el LER.

Aquí los paneles de plumavit se incrustarían sobre el anclaje superior móvil (color rojo) para quedar firmes. Este anclaje se movería hacia arriba y hacia abajo para dar el movimiento cenital de acuerdo al giro que el motor le vaya transmitiendo. Para mayor estabilidad y no generar tanta carga sobre ese motor, se emplearía un sistema de apoyo en base guías que ayuden a sostener el panel con la ayuda de ruedas pequeñas montadas sobre las aletas soporte (color azul con gris). Este anclaje poseerá además una guía inferior que actuaría como sistema de seguridad en caso de que, al tener el panel muy inclinado y con carga eólica haciendo presión en su extremo inferior ocasionando que el motor ceda, tranque el giro del anclaje superior, y así se evite el choque entre los paneles reflectantes y el pilar de la estructura.



*Figura 35: Anclaje superior en ensamble inicial.*



*Figura 36: Soporte y sistema motriz en vista superior e inferior.*

En el corazón de la estructura se erguirían dos aletas, una de las cuales sujetaría al motor encargado de transmitir el movimiento cenital. Estas aletas estarían sujetas a una pieza base, cuya unión iría reforzada por nervios estructurales (color verde musgo). Por otro lado, esa pieza base estaría apernada a un cubo de transmisión (color naranja), al cual se sujetaría en su interior el motor encargado del movimiento azimutal, cuyo engranaje iría acoplado a un rodamiento que estaría montado en la parte inferior del cubo. De esta manera, al utilizar el aro interior del rodamiento como punto fijo al cual se sujetaría el pilar (tubo de PVC), se tendría un sistema en que, al entregar potencia al motor azimutal, giraría todo el ensamble sostenido por el aro exterior del rodamiento, y así se podría orientar los paneles en la posición deseada.

Si bien este diseño se adecúa mucho mejor que el anterior a los requerimientos del sistema de gasificación, su implementación y funcionamiento también presentan ciertos problemas.

- La impresora puede imprimir piezas cuyas dimensiones no excedan los 250 [mm]. Esto imposibilita la impresión del anclaje superior, cuyo lado más largo mide 506 [mm]. Esto implica que para fabricar dicha pieza habría que diseñarla en partes más pequeñas que se ensamblen entre sí.
- Al igual que en el primer diseño, el disco estaría boca arriba en una posición muy alta, lo que obligaría a los helióstatos a ubicarse a gran altura (a lo menos unos 3 [m]) para lograr apuntar al disco sin incurrir en posibles sombreados generados por el reactor que esta entremedio. Esto se traduce, por una parte, en una mayor carga eólica para los helióstatos, que requerirían de bases de gran tamaño y tubos anchos de PVC con reforzamientos para poder asegurar la estabilidad de la estructura, y, por otra parte, generaría dificultades para el acceso al mantenimiento y posibles intervenciones que se le quiera efectuar a los sistemas motrices y de control del ensamble
- Debido a la poca capacidad de torque que tienen los motores paso a paso, es posible que cuando haya mucho viento incidiendo sobre los espejos, los motores no tengan la potencia necesaria para vencer el contra-torque al que se someten, con lo cual se saltarían pasos o simplemente no girarían, generando un desfase en el sistema de seguimiento, que se traduciría en una menor potencia nominal de concentración en el disco parabólico.
- Debido a que los motores pueden dar un máximo 200 pasos por revolución, están limitados a tener un giro mínimo de  $1,8^\circ$  por paso, por lo que el panel reflector estaría limitado a rotar en múltiplos de  $1,8^\circ$ , tanto para el movimiento cenital como el azimutal. Si bien esa magnitud no es tan grande como para causar grandes desfases, sí afectaría la precisión del sistema de seguimiento, ya que cualquier rotación angular menor a ese valor sería imposible.

Considerando estas dificultades, se opta por un rediseño.

### 3.3 Diseño N°3

Uno de los focos de este diseño es evitar el uso de helióstatos tan altos, para lo cual se propone emplear el principio “Beam Down Tower”, el cual se puede utilizar cuando hay más de un helióstato y consiste en apuntarlos todos hacia un espejo fijo en altura que refleja toda esa radiación incidente hacia un punto más bajo. Esta tecnología es muy útil cuando se necesita que los rayos solares lleguen desde arriba, como es en nuestro caso.

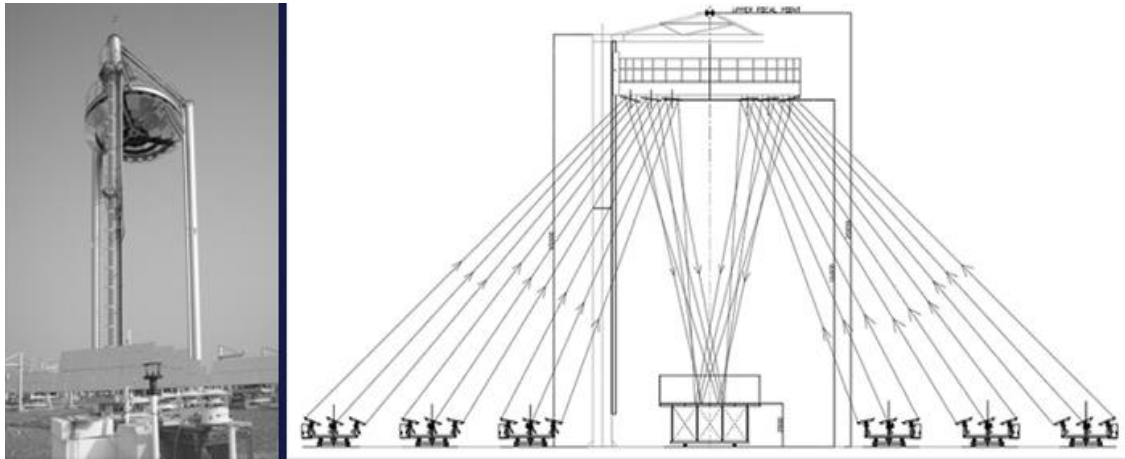


Figura 37: Planta Masdar Solar Hub y su principio óptico Beam Down.

Aplicando dicho principio al sistema de gasificación solar de este trabajo, se tendría una configuración con el siguiente orden:

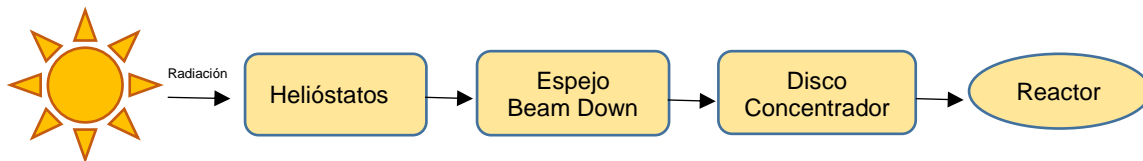
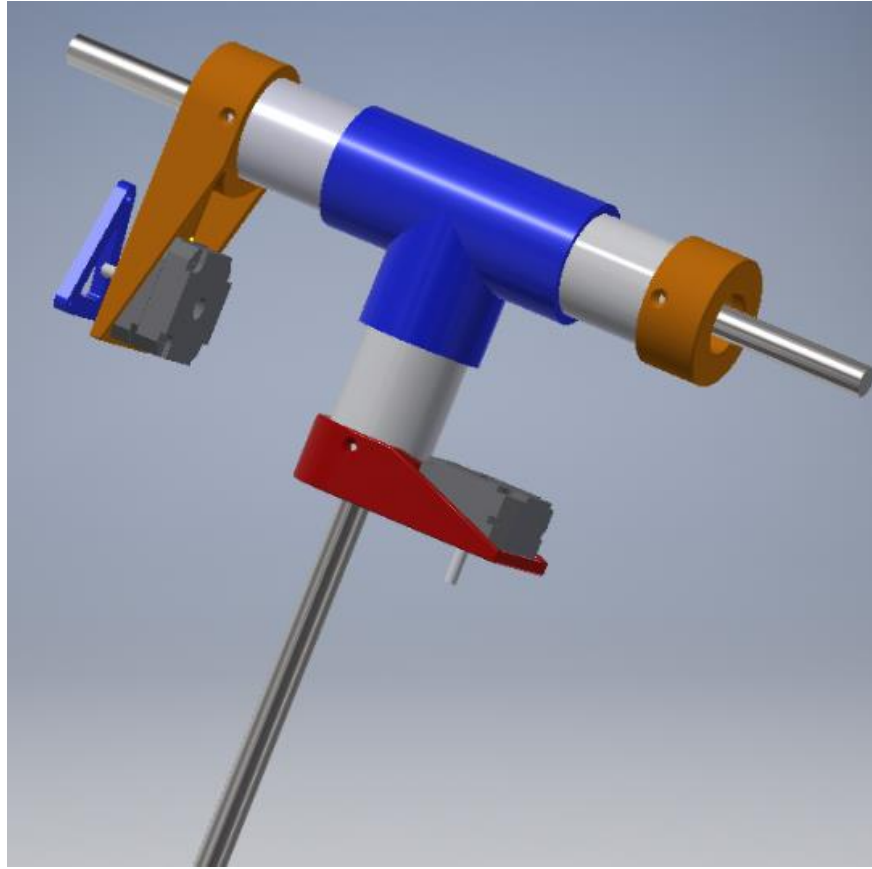


Figura 38: Esquema de equipos para sistema gasificador.

Esto les daría a los helióstatos la ventaja de poder ubicarse a poca altura, quedando el panel muy cerca del suelo, con lo que serían fáciles de mantener e intervenir, además de requerir bases más pequeñas y menos robustas por la poca carga eólica que han de recibir.

Se plantea también un mejoramiento al sistema motriz, en donde en vez de transmitir el giro de cada motor directamente a la estructura misma, se acople a cada uno de estos un juego de engranajes plásticos pequeños que le transmitan el giro a un eje de motriz. Cada motor tendrá un juego de engranajes y un eje respectivo. Un eje se encargará del movimiento cenital y el otro del azimutal. El rol de estos juegos de engranes consiste, por un lado, en aliviar la carga directa sobre los motores en caso de que los paneles sean sometidos a vientos fuertes, y por otro lado, tendrán como función el reducir la relación de transmisión de velocidades entre el motor y el eje motriz, de manera tal que por cada paso que dé el eje del motor, solo se transmita una fracción de ese movimiento angular al eje motriz, abriendo así la posibilidad de dar movimientos angulares más pequeños y precisos, y permitiendo así un mejor ajuste de posición para los paneles, logrando una reflexión solar más certera.



*Figura 39: Modelación del tercer diseño*

Estructuralmente se define como un diseño en T, el cual tendría anclado a su eje cenital, el panel reflector, y anclado a su eje azimutal (que también actúa como pedestal), iría la base del sistema.

Si bien este diseño soluciona gran parte de las dificultades presentes en las propuestas anteriores, se debe considerar que, al añadir una segunda etapa de reflexión, aumentan las pérdidas energéticas por reflectancia, generando que baje la potencia neta de concentración en el disco.

En este caso, considerando que para la fabricación del espejo “Beam Down” también se utilice la película reflectante 3M™, se tendría que los tres sistemas de reflexión involucrados poseerían una reflectancia de 94%. Y dado que esta configuración cuenta con la misma potencia nominal que el diseño anterior, se tendría que la potencia neta de concentración en el disco parabólico equivaldría a:

$$P_{Neta,N^{\circ}3} = P_{Nominal,N^{\circ}3} \times 0.94^3 = 5.724 [W] \times 0.94^3$$

$$P_{Neta,N^{\circ}3} \approx 4.754 [W]$$

*Fórmula 17: Potencia neta de Diseño N°3.*

## 4. Diseño final

Decir que para simplificar no se indagará en la construcción de la torre “Beam Down” ni en la puesta en marcha de todos los helióstatos, si no que se enfocará el trabajo en la construcción e implementación de uno solo, que es objetivo último de esta tesis.

Se determinó, de forma esencialmente cualitativa, que el helióstato a construir se basará en el diseño N°3, debido a que:

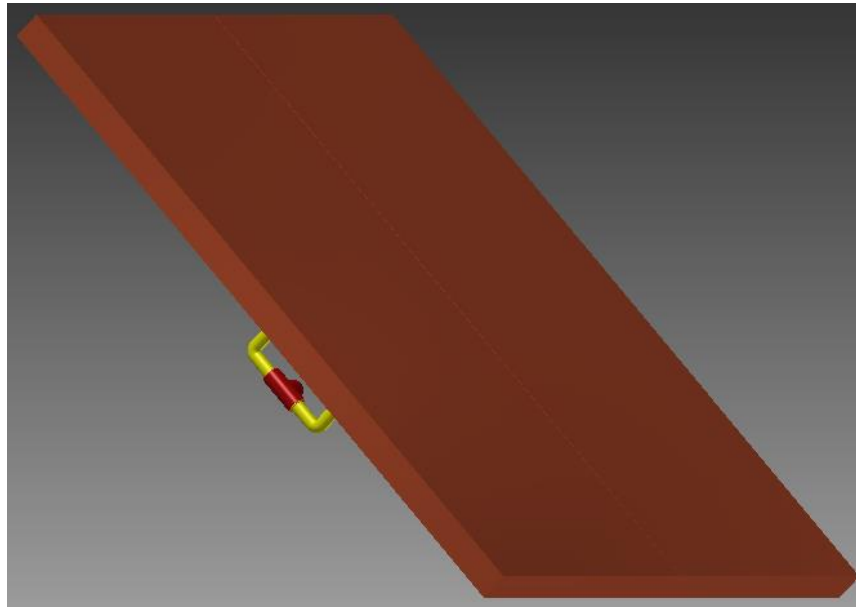
- ✓ Es el que mejor se adecúa a los parámetros de precisión y reflexión esperados
- ✓ Económicamente es el más factible de todos
- ✓ Es el más fácil y rápido de construir

Y para asegurar que su funcionamiento en el LER se lleve a cabo sin contratiempos, se hará un análisis de los posibles efectos y cargas que pueden generar los leves vientos presentes en dicha zona.

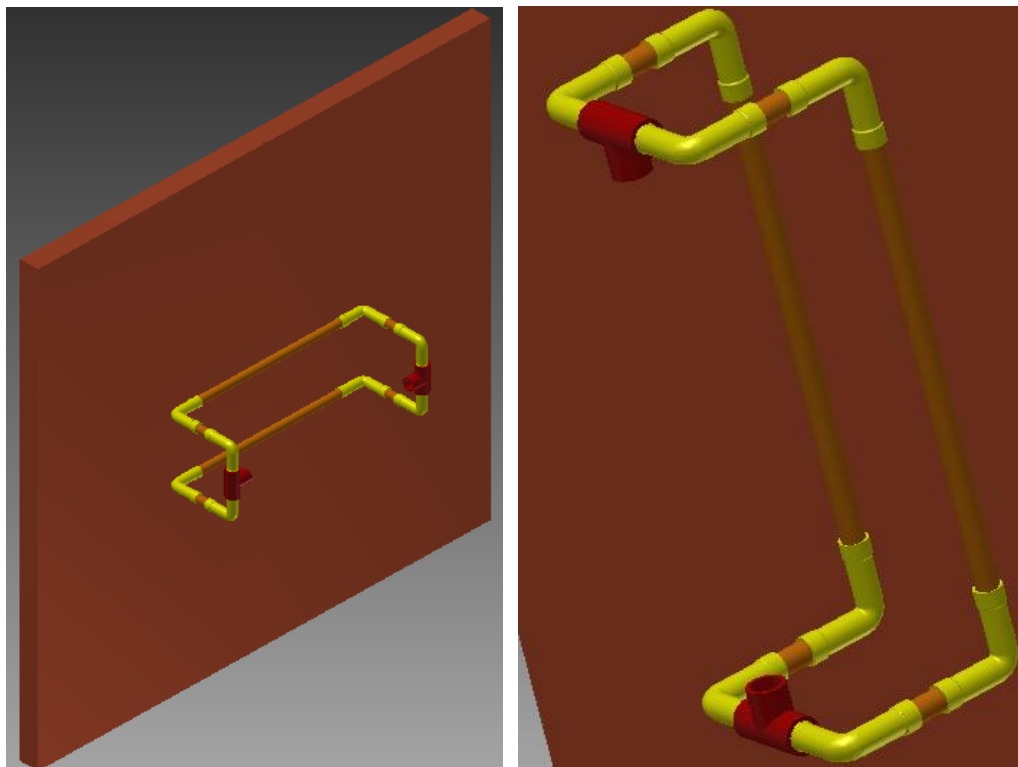
### 4.1 Panel reflector

En base a lo visto en la base teórica, se opta por un diseño liviano fabricado a partir de planchas de plumavit recubiertas con película reflectante 3M™, el cual irá anclado al soporte estructural mediante un arreglo de tubos pequeños de PVC. Para esto se utilizarán dos planchas de plumavit de 1 [m] x 0.5 [m] x 0.04 [m], las cuales irán pegadas la una a la otra mediante un adhesivo especial para EPS, a modo de poder formar una placa cuadrada de 1 [m<sup>2</sup>] de superficie.

En la parte trasera del panel, irán pegados 2 tubos de PVC eléctrico de 16 [mm] de diámetro, a los cuales se le conectarán dos codos de PVC (uno en cada extremo), orientados de forma perpendicular al plano de reflexión, y sobre cada uno de estos codos se acoplará otro tubo corto unido a un codo exterior, de forma tal que los 4 codos exteriores derivarán en dos Tee's de PVC hidráulico de 26 [mm] de diámetro.



*Figura 40: Panel reflectante*



*Figura 41: Parte trasera del panel y su estructura de anclaje.*

Entre las dos Tee's de PVC hidráulico irá acoplado el eje de transmisión para el movimiento cenital, el cual forma parte del sistema motriz y del soporte estructural del sistema.

Para construir este componente se necesitan los siguientes elementos:

- 2 planchas de plumavit de 1 [m] x 0.5 [m] x 0.04 [m].
- 2 tubos de PVC eléctrico de diámetro 16 [mm] y longitud de 290 [mm].
- 2 tubos de PVC eléctrico de diámetro 16 [mm] y longitud de 40 [mm].
- 4 codos de PVC eléctrico de diámetro 16 [mm].
- 2 codos de PVC hidráulico de diámetro 26 [mm].

## 4.2 Soporte

Esta parte consta de dos subsistemas principales, los cuales en conjunto logran soportar la totalidad de los componentes, transmitir giro al panel reflector, y darle estabilidad a la estructura. Estos subsistemas son:

- Estructura móvil superior
- Pedestal base

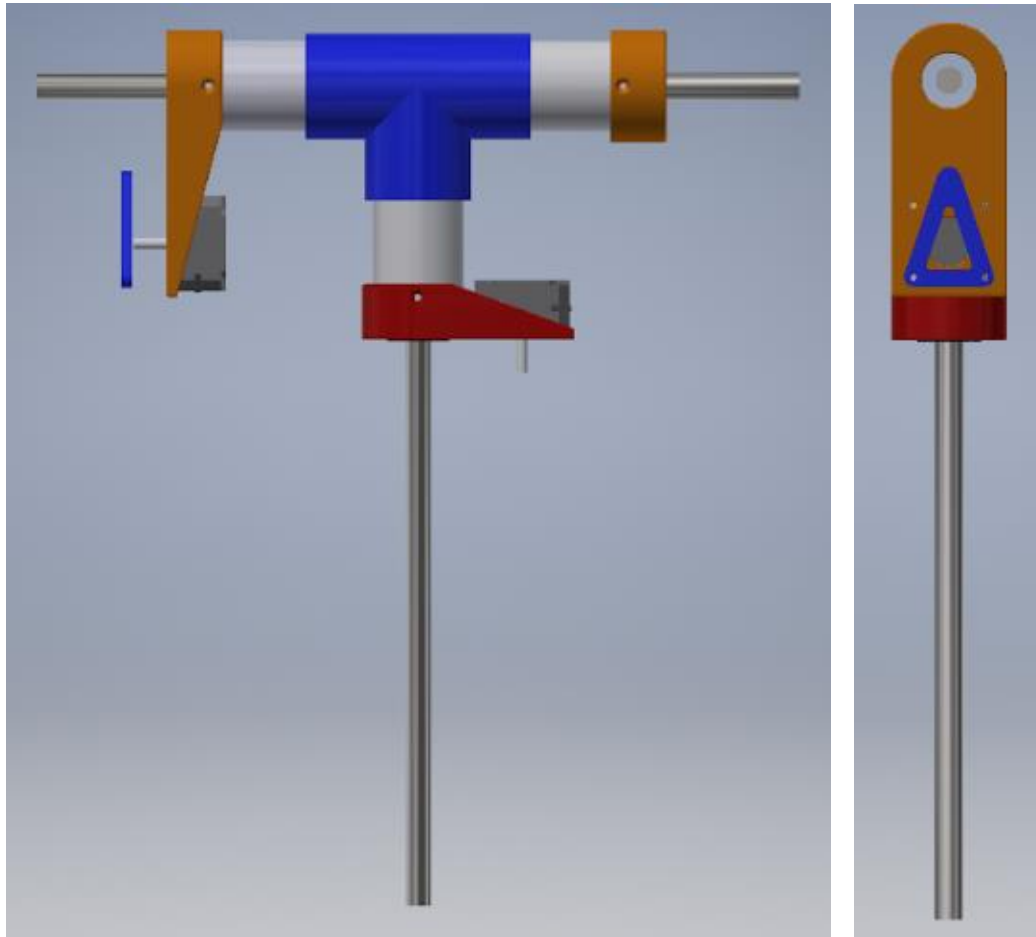
Y ambos serán explicados a continuación.

### 4.2.1 Estructura móvil superior

Consiste en un soporte tipo T, cuya estructura se arma a partir de un arreglo de tubos de PVC hidráulico de 40 [mm] de diámetro, una Tee de PVC ad hoc para dichos tubos, y piezas construidas con material plástico PETG en impresora 3D.

Este subsistema estructural tiene como fin la transmisión de tanto el giro cenital como el azimutal al panel reflectante. Fue diseñado teniendo en mente el funcionamiento del sistema motriz, y todos los componentes que éste involucra.

El cuerpo principal lo conforma una estructura tipo T, por dentro de la cual pasa el eje cenital. Éste se encuentra acoplado a dos rodamientos, los cuales se encuentran enclaustrados, uno a cada extremo lateral de la estructura. En cada extremo se ubica una tapa (piezas de color amarillo en Figura 42), la cual aloja en su interior al rodamiento. Una tapa sirve simplemente como punto de apoyo para rodamiento, mientras que la otra además se encarga de albergar el motor y el arreglo de engranajes necesarios para transmitir torque al eje cenital. Sobre dicha tapa se ubica un soporte triangular (color azul) el cual actúa como punto de anclaje exterior para la rueda dentada intermedia, asegurándole así al sistema de transmisión, la estabilidad requerida para funcionar apropiadamente.



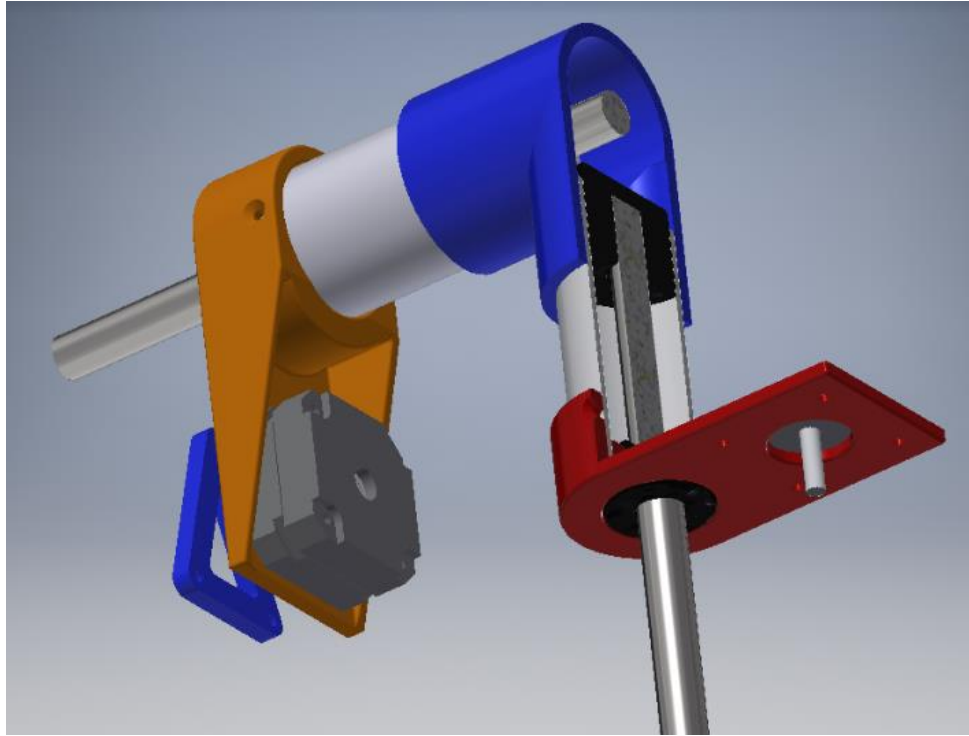
*Figura 42: Vista frontal y lateral de la estructura superior móvil.*

Este subsistema es soportado por el eje azimutal, el cual se orienta verticalmente dentro del extremo inferior de la T, y va sujeto al interior de ésta mediante dos bujes (de color negro), como se observa en la Figura 43. El buje inferior actúa netamente como guía para centrar el eje, mientras que el superior, además de eso, hace de tope para encasillar al eje azimutal y así éste pueda soportar la estructura en T.

A este eje se le acoplará una rueda dentada justo por debajo de la tapa inferior (color rojo) de la estructura en T. Como se aprecia en la Figura 43, el motor azimutal estará anclado a la tapa inferior.

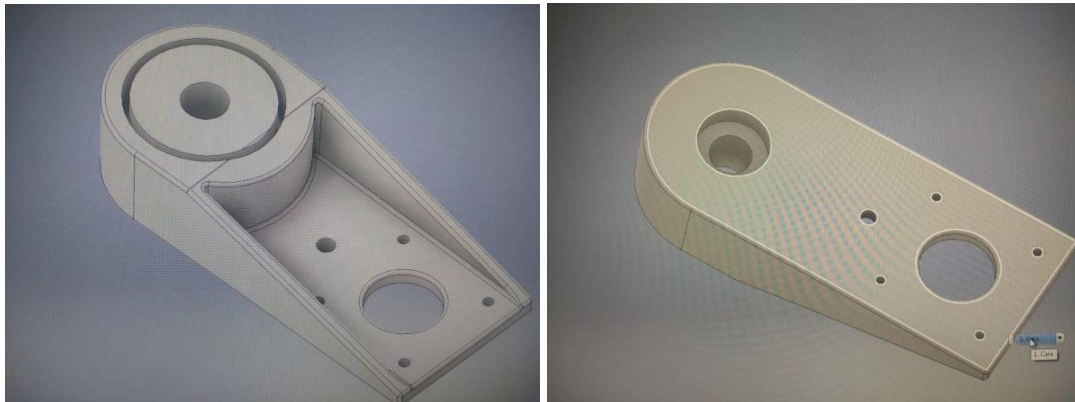
El funcionamiento aquí se logra haciendo que el engranaje del motor azimutal transmita torque a la rueda dentada, y como ésta se mantiene inmóvil junto con el eje azimutal, se generará un giro de la estructura en T, manteniendo el eje azimutal como punto fijo. De esta manera se logra hacer girar al panel.

Cabe mencionar que ruedas dentadas no se incluyen en el esquema, puesto que el sistema de transmisión será explicado en detalle más adelante.

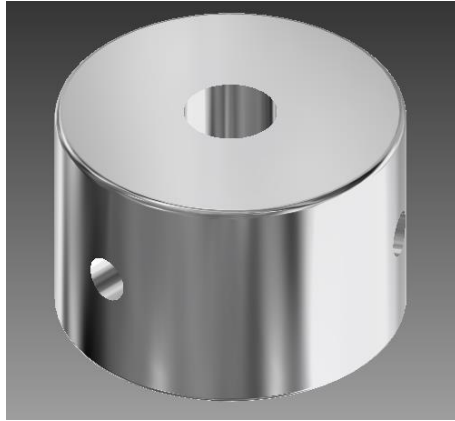


*Figura 43: Vista en corte de la estructura superior móvil.*

En el extremo inferior del eje azimutal se acoplará un tubo de PVC sanitario, con el cual el eje quedará fijo, evitando así que éste rote indeseadamente cuando el motor azimutal le transmita torque, logrando de esta manera que sea la estructura en T la que gire, y no el eje azimutal. Aquí, para sujetar el eje azimutal al PVC sanitario, se utilizarán dos puntos de sujeción. Uno será en el extremo superior del tubo de PVC, el cual tendrá una tapa con una perforación para que entre el eje, y el otro será en el extremo inferior del eje, en donde irá el anclaje inferior de eje azimutal (Figura 45). Dentro de dicha pieza irá enclaustrado el eje para que éste quede inmóvil, y el anclaje irá a su vez apernado al interior del tubo de PVC en tres puntos, con pernos M6.



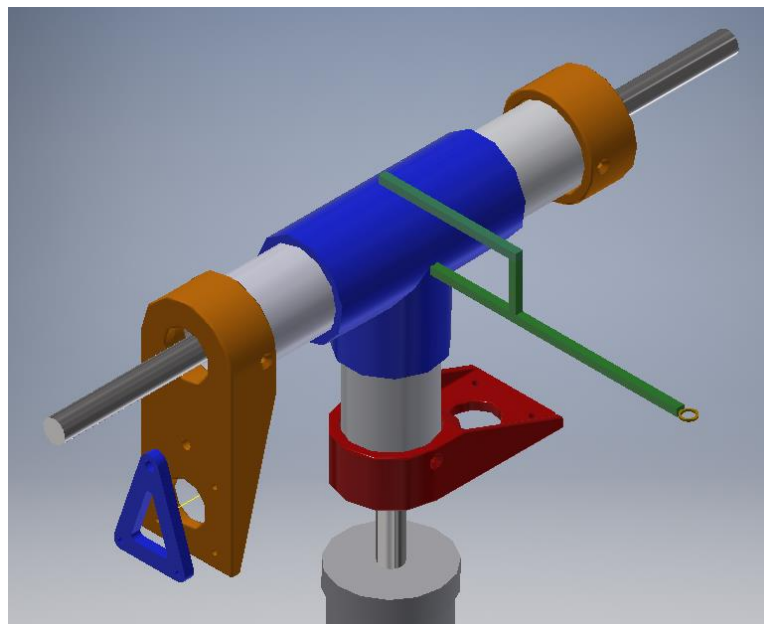
*Figura 44: Tapa con soporte motriz azimutal, en vista inferior y superior.*



*Figura 45: Anclaje inferior de eje azimuthal*

Para ayudar al motor cenital a levantar el panel cuando éste se encuentre en posición vertical (ya que es ahí cuando el motor se verá más exigido), se incluirá una guía en la estructura tipo T, a través de la cual pasará una cuerda que unirá el extremo superior del panel con un contrapeso. Este mecanismo actuará como un sistema de contra-torque constante el cual ayudará al motor a levantar el panel cuando este se encuentre vertical. En la Figura 46 se observa como la guía (de color verde) se monta sobre la Tee de PVC hidráulico. Esta guía estará hecha en base a palos de maqueta de perfil cuadrado de 10 [mm] por 10 [mm], y sus uniones y sujeciones a la estructura tipo T se realizarán con pernos M4.

En esa misma figura es posible visualizar cómo el eje azimuthal va unido a la tapa de PVC sanitario.



*Figura 46: Montaje de guía de contra-torque en estructura superior móvil.*

Para construir este componente se necesitan los siguientes elementos:

- 2 tubos de PVC hidráulico de diámetro 40 [mm] y longitud de 75 [mm].
- 1 tubo de PVC hidráulico de diámetro 40 [mm] y longitud de 165 [mm].
- 1 codo de PVC hidráulico de diámetro 40 [mm].
- 1 tubo de PVC sanitario de diámetro 50 [mm].
- 1 tapa de PVC sanitario de diámetro 50 [mm].
- 1 tapa circular con soporte para rodamiento, hecho en impresora 3D.
- 1 tapa con soporte motriz cenital y espacio para dos ruedas dentadas, hecho en impresora 3D.
- 1 tapa con soporte motriz azimutal y espacio para una rueda dentada, hecho en impresora 3D.
- 1 buje inferior, hecho en impresora 3D.
- 1 buje superior tipo tapa, hecho en impresora 3D.
- 2 ejes de acero con diámetro 12 [mm] y longitud de 335 [mm], obtenidos de una impresora EPSON.
- 2 rodamientos de 12 [mm] marca Koyo.
- 1 soporte triangular para rueda dentada, hecho en impresora 3D.
- 1 anclaje inferior de eje azimutal, hecho en impresora 3D.
- 3 pernos M6, para sujetar el anclaje inferior al tubo de PVC sanitario.
- 1 palo de maqueta de 10 [mm] por 10 [mm].
- 4 pernos M4, para la sujeción de la guía de contra-torque.

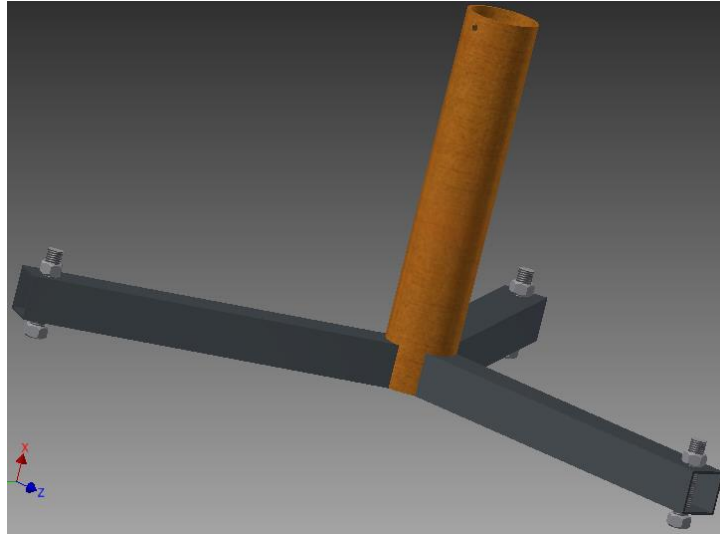
#### 4.2.2 Pedestal base

Es la estructura encargada de soportar todo el heliostato. Consiste en un soporte tipo trípode, el cual se compone de un tubo de acero orientado verticalmente, que en la base tiene tres patas soldadas a su superficie, con una distancia angular de  $120^\circ$  entre ellas. Para asegurar la estabilidad de este sistema en cualquier tipo de suelo, se realiza en los extremos de cada pata, una perforación a través de la cual pasa un perno, que ha de tener una tuerca en su extremo opuesto, y de esta manera se le pueda regular la altura a cada pata de forma independiente, permitiendo así que el pedestal pueda mantenerse derecho y estable sin importar lo irregular que sea la superficie en la cual esté parado.

Al interior este pedestal ha de ubicarse el tubo de PVC sanitario de la estructura superior móvil, y para que éste quede fijo, se le realizó una perforación al tubo del pedestal, por el cual pasa un perno que ha de apretarse una vez que la estructura superior móvil se encuentra montada, para que ésta quede fija al pedestal base.

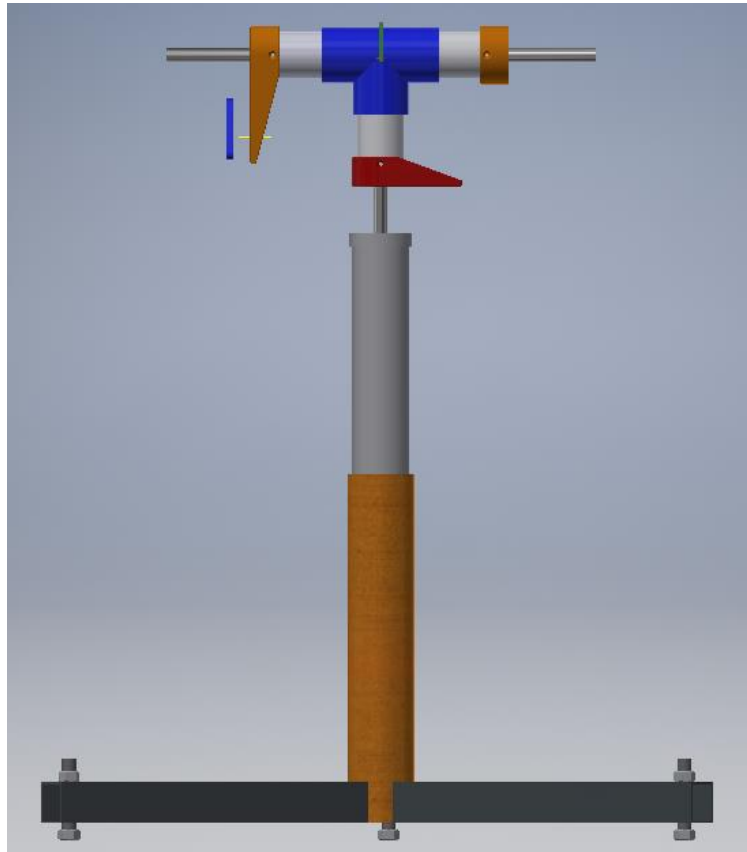
Para construir este componente se necesitan los siguientes elementos:

- 1 tubo acero al carbono de diámetro interior 55 [mm], 3.5 [mm] de espesor y 300 [mm] de longitud.
- 3 perfiles cuadrados de 20 [mm] x 20 [mm] y longitud 300 [mm].
- 3 pernos M6 de largo 25 [mm] mínimo, con sus respectivas tuercas.



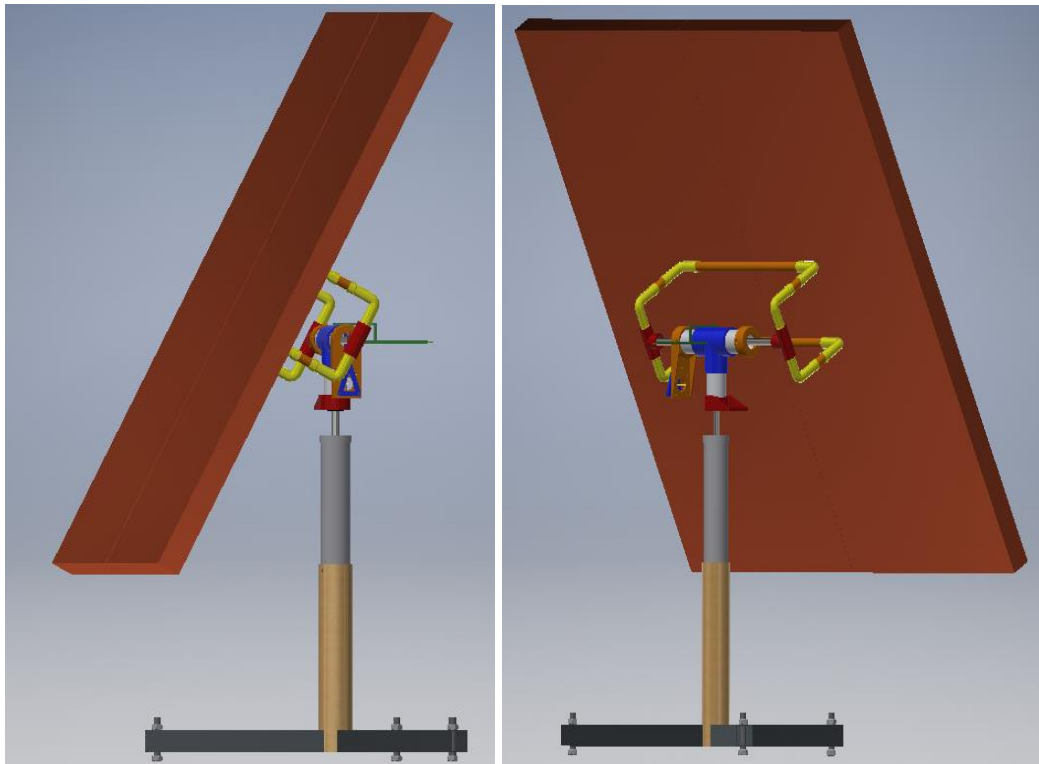
*Figura 47: Modelación de pedestal base*

Al ensamblar el pedestal base con la estructura móvil superior se tiene el siguiente conjunto:

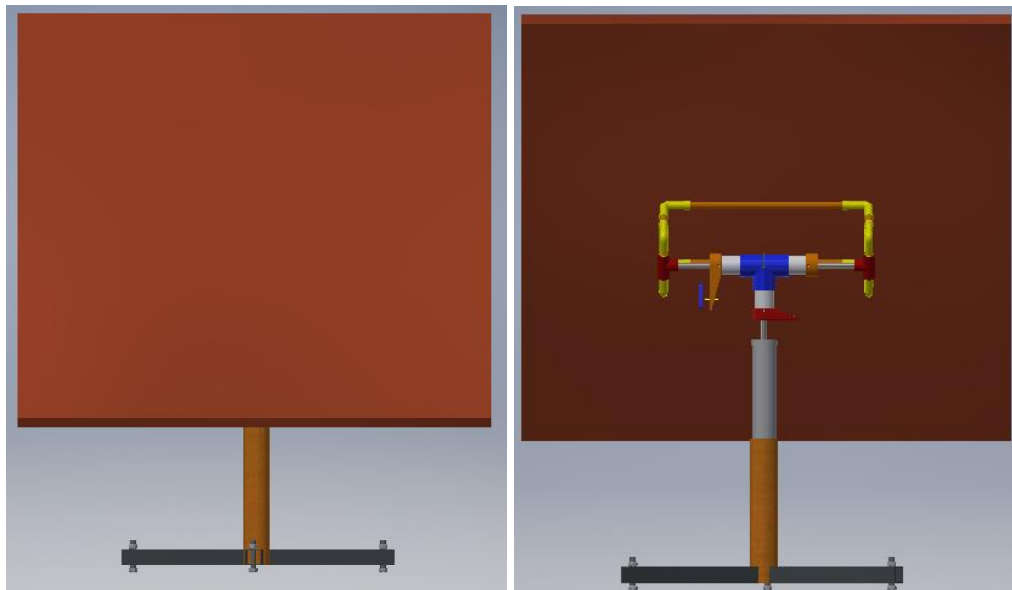


*Figura 48: Estructura superior móvil montada sobre el pedestal*

Y al ensamblar el panel reflector a todo ese soporte, se obtiene la estructura completa del helióstato.



*Figura 49: Helióstatto modelado, en vista lateral izquierda y derecha.*



*Figura 50: Helióstatto modelado, en vista delantera y trasera.*

### 4.3 Sistema motriz

Para poder transmitir los torques requeridos a la hora de mover el panel, se han de utilizar dos motores paso a paso y una serie de ruedas dentadas plásticas, todo aquello obtenido de una impresora EPSON. Son dos los subsistemas motrices que componen el sistema motriz:

- Sistema motriz azimutal.
- Sistema motriz cenital.

Y estos serán explicados en detalle a continuación.

#### 4.3.1 Sistema motriz cenital

Es el que transmite torque para que el panel pueda moverse hacia arriba y hacia abajo. Su mecanismo se encuentra ubicado en uno de los costados de la estructura tipo T, acoplado a la tapa con soporte motriz cenital. Su mecanismo consta de un motor paso a paso (“stepper”) bipolar EM-402, con par motor máximo de 1.0 [kgf · cm], cuyo engranaje transmisor acoplado tiene 46 dientes.



*Figura 51: Motor stepper Nema 17, marca EPSON modelo EM-402.*

Este engranaje transmite su movimiento a una rueda dentada doble que actúa como reductora de transmisión. Ésta tiene un engranaje de mediano de 92 dientes por un lado y uno pequeño de 29 dientes por el otro. Éste último transmite su torque a una rueda dentada grande de 184 dientes, que es la que se encuentra acoplada al eje cenital. Este sistema de transmisión se ve representado en la Figura 47.

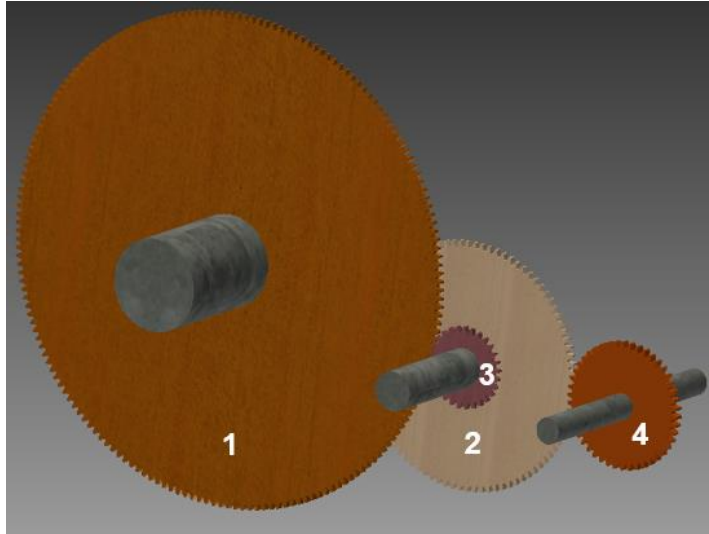


Figura 52: Mecanismo de transmisión cenital

Aquí la relación de transmisión se obtiene de la a partir de las siguientes relaciones:

$$Z_1 = 184 \text{ [dientes]}$$

$$Z_2 = 92 \text{ [dientes]}$$

$$Z_3 = 29 \text{ [dientes]}$$

$$Z_4 = 46 \text{ [dientes]}$$

En donde:

$$Z_1 \omega_1 = Z_3 \omega_3 \quad (\text{I})$$

$$\omega_2 = \omega_3 \quad (\text{II})$$

$$Z_2 \omega_2 = Z_4 \omega_4 \quad (\text{III})$$

Y reemplazando (I) y (III) en (II) se obtiene que:

$$\omega_4 \left( \frac{Z_4}{Z_2} \right) = \omega_1 \left( \frac{Z_1}{Z_3} \right)$$

Por lo que la relación de transmisión  $RT_1$  entre el motor y la rueda dentada del eje cenital es de:

$$RT_1 = \frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_2 Z_4} = \frac{184 \cdot 92}{29 \cdot 46} = 12.69 : 1$$

Fórmula 18: Relación de transmisión del mecanismo cenital

Y como el motor da 200 [pasos/revolución], eso equivale a un giro mínimo de 1.8 [°/paso], con lo que la relación de rotación cenital angular ( $R_{zenit}$ ) es de:

$$R_{zenit} = \frac{\text{Giro mínimo de motor}}{RT_1} = \frac{1.8 \left[ \frac{\circ}{\text{paso}} \right]}{12.69} = 0.142 \left[ \frac{\circ}{\text{paso}} \right]$$

*Fórmula 19: Relación de rotación cenital angular.*

Para construir este mecanismo se necesitan los siguientes elementos:

- 1 motor “stepper” NEMA 17 marca EPSON, modelo EM-402, cuyo engranaje transmisor posee 8 [mm] de espesor, 19.3 [mm] de diámetro y 46 dientes.
- 1 rueda dentada grande con 3.5 [mm] de espesor, 74.4 [mm] de diámetro y 184 dientes.
- 1 rueda dentada doble, compuesta de dos engranajes, uno pequeño con 3.5 [mm] de espesor, 12 [mm] de diámetro y 29 dientes, y otro mediano con 5 [mm] de espesor, 38 [mm] de diámetro y 92 dientes.
- 1 perno M5 de longitud 35 [mm] con su respectiva tuerca. Este perno actuará como eje de la rueda dentada doble

#### 4.3.2 Sistema motriz azimutal

Es el que transmite torque para que el panel pueda moverse de este a oeste (o de derecha a izquierda). Su mecanismo se encuentra ubicado por debajo de la estructura tipo T, acoplado a la tapa con soporte motriz azimutal. Su mecanismo, al igual que en el caso anterior, consta del mismo motor paso a paso, con el mismo engranaje transmisor. Este engranaje transmite su movimiento a una rueda dentada plástica con 3 [mm] de espesor, 74.4 [mm] de diámetro y 184 dientes.

Este sistema de transmisión se ve representado en la Figura 48 y su relación de transmisión se obtiene a partir de:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 184 \text{ [dientes]} \\ Z_2 &= 46 \text{ [dientes]} \end{aligned}$$

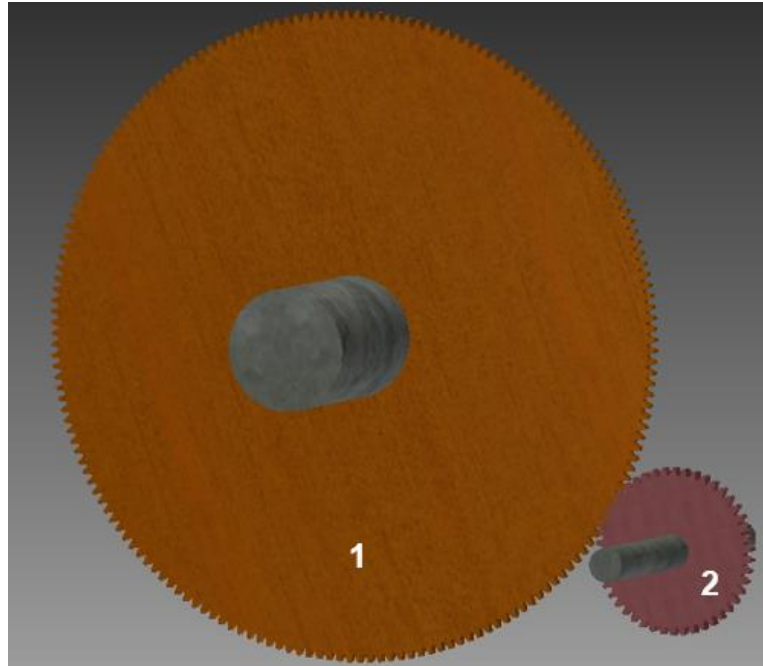
Aquí cada rueda posee una velocidad de rotación angular diferente, pero como ambas ruedas se transmiten torque de forma directa, se cumple la siguiente relación.

$$Z_1 \omega_1 = Z_2 \omega_2 \quad (\text{IV})$$

Lo que quiere decir que la relación de transmisión  $RT_2$ , desde el motor azimutal hacia la rueda dentada, es de:

$$RT_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{184}{46} = 4 : 1$$

*Fórmula 20: Relación de transmisión del mecanismo azimutal*



*Figura 53: Mecanismo de transmisión azimutal*

Y al usar un motor idéntico al caso anterior, el cual tiene un giro mínimo de 1.8 [°/paso], se obtiene una relación de rotación azimutal angular ( $RT_{azim}$ ) de:

$$R_{azim} = \frac{\text{Giro mínimo de motor}}{RT_2} = \frac{1.8 \left[ \frac{\circ}{\text{paso}} \right]}{4} = 0.45 \left[ \frac{\circ}{\text{paso}} \right]$$

*Fórmula 21: Relación de rotación azimutal angular*

Para construir este mecanismo se necesitan los siguientes elementos:

- 1 motor stepper NEMA 17 marca EPSON, modelo EM-402, cuyo engranaje transmisor posee 8 [mm] de espesor, 19.3 [mm] de diámetro y 46 dientes.
- 1 rueda dentada grande con 3.5 [mm] de espesor, 74.4 [mm] de diámetro y 184 dientes.

Mediante estas relaciones de reducción es posible mover el panel de forma más precisa, realizando giros más pequeños y al mismo tiempo aliviando la carga sobre los motores.

### 4.3.3 Memoria de cálculo

Para cerciorarse de que los motores muevan el panel de acuerdo a lo establecido por el código, hay que asegurarse de que estos no se salten pasos y así evitar que el panel quede a medio camino. Para ello es necesario analizar dos potenciales situaciones en las que los motores se verían sobre exigidos:

- Alto torque cenital producido por el peso del panel
- Alto torque azimutal producido por carga eólica estática

En ambos casos se ve amenazada la eficiencia de los motores paso a paso, por lo que se realizarán los cálculos correspondientes para asegurarse de que la efectividad del sistema no se vea afectada.

#### 4.3.3.1 Memoria de cálculo I: Torque cenital producido por el panel reflector

Este cálculo busca determinar la magnitud que debe tener el contrapeso, para que el motor cenital sea capaz de levantar el panel reflector cuando éste se encuentre en posición vertical.

Primero que todo se debe determinar cuál es el torque máximo que es capaz de entregar el eje cenital para mover el panel.

Se tiene que el par motor máximo del motor cenital ( $M_{stepper}$ ) es de 1.0 [kgf · cm], y como éste ha de actuar como engranaje conductor del eje cenital (correspondiente al eje conducido), es posible obtener el par motor del eje cenital ( $M_{zenit}$ ), con ayuda de la relación de transmisión del mecanismo cenital ( $RT_1$ ).

$$M_{zenit} = M_{stepper} \cdot RT_1 = 1.0 [kgf \cdot cm] \cdot 12.69$$

$$M_{zenit} = 12.69 [kgf \cdot cm]$$

*Fórmula 22: Par motor del eje cenital.*

Y con ese valor, ahora es posible realizar un balance de momentos en torno al eje cenital, esto en un diagrama de cuerpo libre el cual se presenta en la Figura 54.

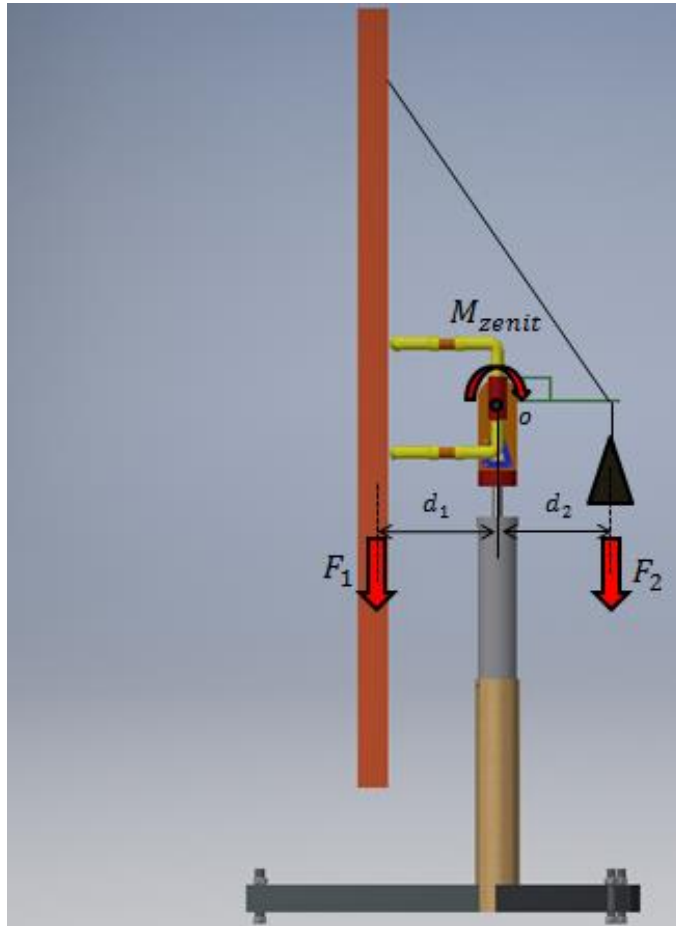


Figura 54: Diagrama de cuerpo libre, para cálculo de momento cenital.

Aquí la incógnita es  $F_2$ , y todos los otros valores son parámetros de diseño.

Constante	Valor	Detalle
$F_1$	1.6[kgf]	Peso del panel reflector
$d_1$	15 [cm]	Distancia del eje cenital al centro de masa del panel
$d_2$	16 [cm]	Distancia del eje cenital al centro de masa del contrapeso
$M_{zenit}$	12.69 [kgf · cm]	Par motor del eje cenital
$F_2$	?	Peso del contrapeso

Tabla 3: Parámetros para cálculo de torque cenital

Aquí, haciendo una sumatoria de momentos en el punto O se obtiene:

$$\sum M_o = 0$$

$$M_{zenit} + F_2 \cdot d_2 - F_1 \cdot d_1 = 0$$

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot d_1 - M_{zenit}}{d_2}$$

$$F_2 = 0.71 [kgf]$$

*Fórmula 23: Magnitud del contrapeso para torque cenital*

Con lo cual queda establecido que el contrapeso de la estructura pesará 710 [gr].

#### 4.3.3.2 Memoria de cálculo II: Torque azimuthal producido por carga eólica estática.

Si bien los vientos en el LER son bastante suaves, debe considerarse el peor de los escenarios posibles y ver cómo respondería el heliostato ante dichas condiciones. Para esto se requiere hacer un análisis de las condiciones eólicas de la zona.

En el Laboratorio de Energías Renovables de la universidad hay una estación de medición para las condiciones eólicas, la cual mide las velocidades del viento desde dos alturas diferentes: a 18 metros y a 27 metros sobre el nivel del suelo. De acuerdo con la información obtenida de los adquisidores de datos, la mayor velocidad registrada en el LER ocurre a los 27 metros y tiene una magnitud de 4.911 [m/s]. En vista de que el panel reflectante del heliostato estará en un punto mucho más bajo (1,5 [m] de altura aproximadamente), este percibirá velocidades aún menores que esta, no obstante, para el cálculo de la carga eólica, se considerará el peor de los escenarios posibles, vale decir, que la velocidad del viento en la zona de ubicación del heliostato sea igual a la velocidad eólica máxima registrada en el LER, vale decir, 4.911 [m/s].

Se procede a calcular cuál es la máxima fuerza de arrastre que el viento es capaz de producir sobre el panel, tomando en consideración su área. Para ello, se considera una temperatura atmosférica de 20 °C en el LER, en donde el aire tendrá las siguientes propiedades.

Parámetro	Valor	Detalle
$\rho_{aire}$	1.2 [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad del aire
$\mu_{aire}$	1.81 · 10 <sup>-5</sup> [kg/m · s]	Viscosidad dinámica del aire

*Tabla 4: Propiedades del aire en el LER.*

Con estos datos, y sabiendo que la velocidad máxima del viento ( $V_{aire}$ ) corresponde a 4.911 [m/s], se tiene que el número de Reynolds sobre el panel cuadrado de longitud característica de 1 [m], será de:

$$Re_{panel} = \frac{\rho_{aire} \cdot V_{aire} \cdot L}{\mu_{aire}}$$

$$Re_{panel} = 3.25 \cdot 10^5 [-]$$

*Fórmula 24: Número de Reynolds sobre panel reflector*

Y para calcular el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) del viento sobre el panel, se aplica la ecuación de mecánica de fluidos para placas lisas, obtenida del libro *Shames*.

$$C_d = \frac{0.074}{(Re_{panel})^{1/5}} - \frac{1700}{Re_{panel}}$$

$$C_d = 6.18075 \cdot 10^{-4} [-]$$

*Fórmula 25: Coeficiente de arrastre del viento sobre el panel reflector*

Y con aquel valor es posible calcular la fuerza de arrastre ( $F_d$ ) que está siendo ejercida sobre el panel, cuya superficie es de  $A_{panel} = 1 [m^2]$ .

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot V_{aire}^2 \cdot C_d \cdot A_{panel}$$

$$F_d = 8.94 \cdot 10^{-3} [N] = 9.11 \cdot 10^{-4} [kgf]$$

*Fórmula 26: Fuerza de arrastre sobre el panel reflector*

Ahora que se sabe la magnitud de la carga eólica sobre el panel, es posible realizar un análisis sobre la incidencia de ésta en el giro azimutal y su motor asociado.

Si bien es de esperar que dicha fuerza actúe sobre el centro del panel, ésta puede concentrarse en cualquier punto de su superficie, y como el objetivo de este análisis es someter al motor azimutal a las condiciones menos favorables posibles, se estudiará la situación en que la fuerza de arrastre actúe sobre uno de los extremos laterales del panel, y así corroborar que el motor azimutal sea capaz de mantener la posición del panel cuando la carga eólica ejerza contra-torque sobre el eje azimutal.

En el diagrama de cuerpo libre de la Figura 55, se muestra en una vista superior del heliostato, cómo actuaría la fuerza de arrastre sobre el panel cuando el sistema se encuentra en posición de operación.

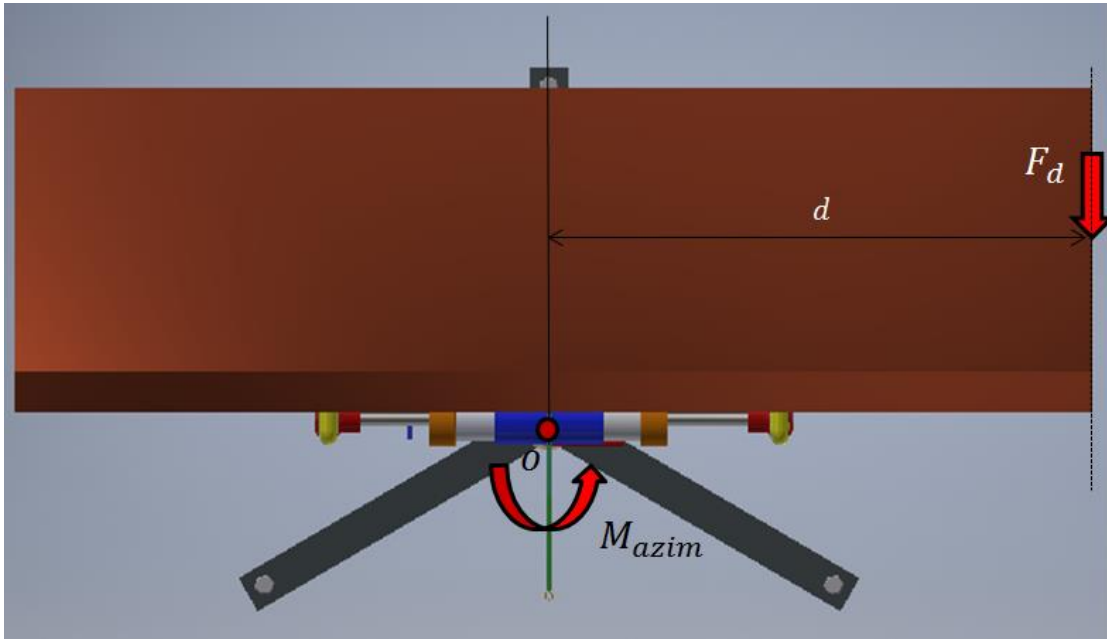


Figura 55: Diagrama de cuerpo libre para cálculo de momento azimutal

Y los valores que toma cada parámetro se explican en la Tabla 5.

Parámetro	Valor	Detalle
$F_d$	$9.11 \cdot 10^{-4} [kgf]$	Fuerza de arrastre sobre el panel reflector
$d$	50 [cm]	Brazo entre la fuerza de arrastre y el eje azimutal
$M_{azim}$	?	Par necesario para mantener la posición azimutal

Tabla 5: Parámetros para cálculo de torque azimutal

Y haciendo balance de momentos en el punto O se obtiene:

$$\sum M_o = 0$$

$$F_d \cdot d - M_{azim} = 0$$

$$M_{azim} = 0.046 [kgf \cdot cm]$$

Fórmula 27: Momento azimutal mínimo para soportar la carga eólica

Y en vista de que el motor azimutal es idéntico al cenital, se sabe que su par motor máximo es de 1.0 [kgf · cm], y como ya se conoce la relación de transmisión azimutal (RT<sub>2</sub>), se obtiene que el par motor máximo del eje azimutal ( $M_{azim,max}$ ) es igual a:

$$M_{azim,max} = M_{stepper} \cdot RT_2 = 1.0 [kgf \cdot cm] \cdot 4$$

$$M_{azim,max} = 4.0 [kgf \cdot cm]$$

*Fórmula 28: Par motor máximo del eje azimutal*

Y como  $M_{azim,max} > M_{azim}$ , queda en evidencia que el contra-torque producido por la carga eólica estática es mucho menor que el par motor conducido por el eje azimutal, con lo cual el panel no tendría dificultad en mantener su posición y realizar su movimiento azimutal cuando el viento choque sobre él.

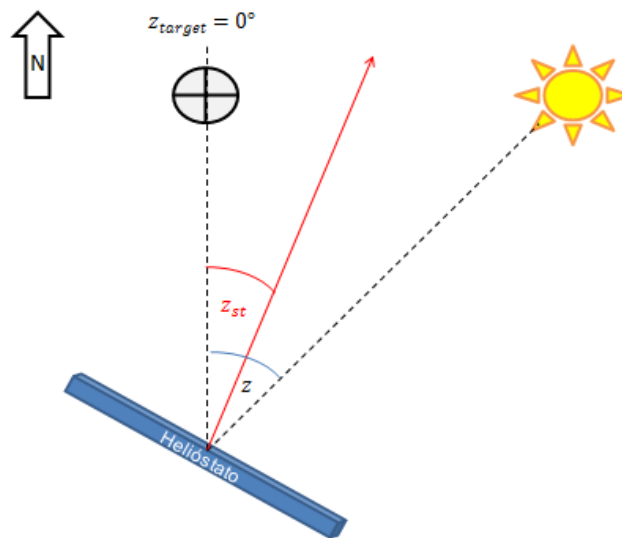
#### 4.4 Sistema de seguimiento y control

Se empleará un sistema de control tipo lazo abierto, en el cual se hará uso de las fórmulas de heliotecnía para obtener el vector solar en tiempo real, para luego, con dicho vector, calcular hacia dónde debe apuntar el helióstato para que la radiación incidente llegue al objetivo deseado. Todo esto obedeciendo al principio de reflexión.

##### 4.4.1 Principio óptico

Primero que todo, se debe comprender cómo ha de reflejarse la radiación solar incidente, a modo de orientar el panel reflector a la posición correspondiente.

Para el movimiento azimutal, se establece que el objetivo a irradiar se encontrará mirando directamente hacia el sur, frente a frente con el helióstato, quien estará orientado hacia el norte, por lo que el ángulo azimutal entre el helióstato y el objetivo con respecto al norte será  $z_{target} = 0^\circ$ . Esquemáticamente, el ángulo azimutal al cual apuntar, que ha de llamarse bisectriz azimutal ( $z_{st}$ ), se obtiene así:



*Figura 56: Bisectriz azimutal ( $z_{st}$ )*

Y matemáticamente su cálculo se realiza a partir del ángulo azimutal calculado con las fórmulas de geometría solar.

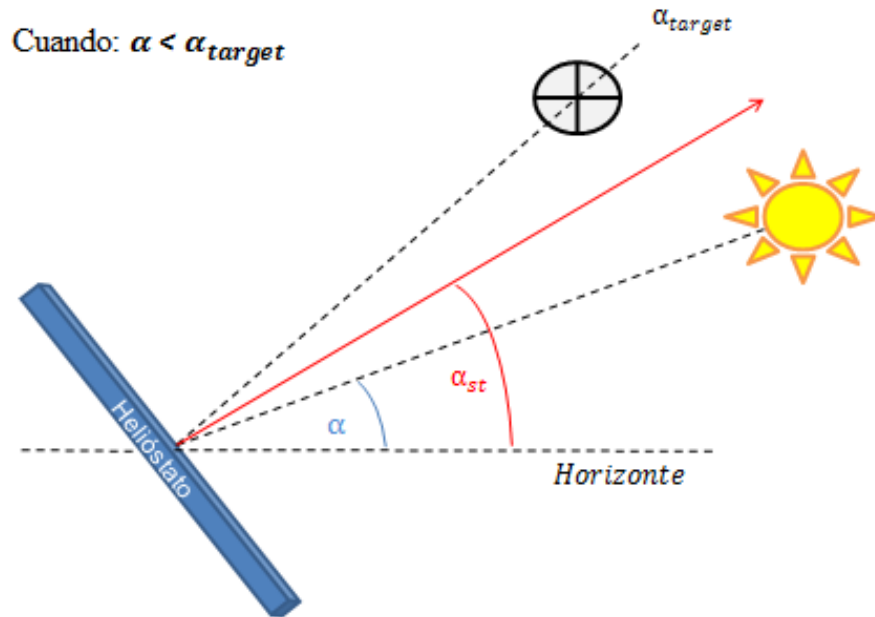
$$z_{st} = \frac{z - z_{target}}{2} = \frac{z - 0}{2} = \frac{z}{2} \quad [^\circ]$$

*Fórmula 29: Bisectriz azimutal*

En el esquema, se muestra una posición solar que ocurre antes del mediodía solar ( $TSA < 12$  [hr]), con lo cual el valor de la bisectriz será negativo. En el caso de que sea después del medio día solar, el cálculo será el mismo, solo que al tener un azimut positivo, la bisectriz también tendrá valor positivo.

Ahora, tomando en cuenta el movimiento cenital, se sabe que el objetivo ha de encontrarse por sobre el heliostato, pero aún no se ha determinado cuánto exactamente, ya que esos son parámetros que han de definirse en etapas futuras del proyecto de gasificación, por lo cual aún no se le asignará un valor al ángulo cenital entre el heliostato y el objetivo con respecto al horizonte. Este ángulo ha de llamarse  $\alpha_{target}$ . Se pueden dar dos casos diferentes a lo largo del día, uno en que el sol se encuentre por debajo del objetivo ( $\alpha < \alpha_{target}$ ) y otro en que el sol esté más alto que el objetivo ( $\alpha > \alpha_{target}$ ).

Esquemáticamente, el ángulo cenital al cual apuntar, que ha de llamarse bisectriz cenital ( $\alpha_{st}$ ), se obtiene de la siguiente forma cuando  $\alpha < \alpha_{target}$ .



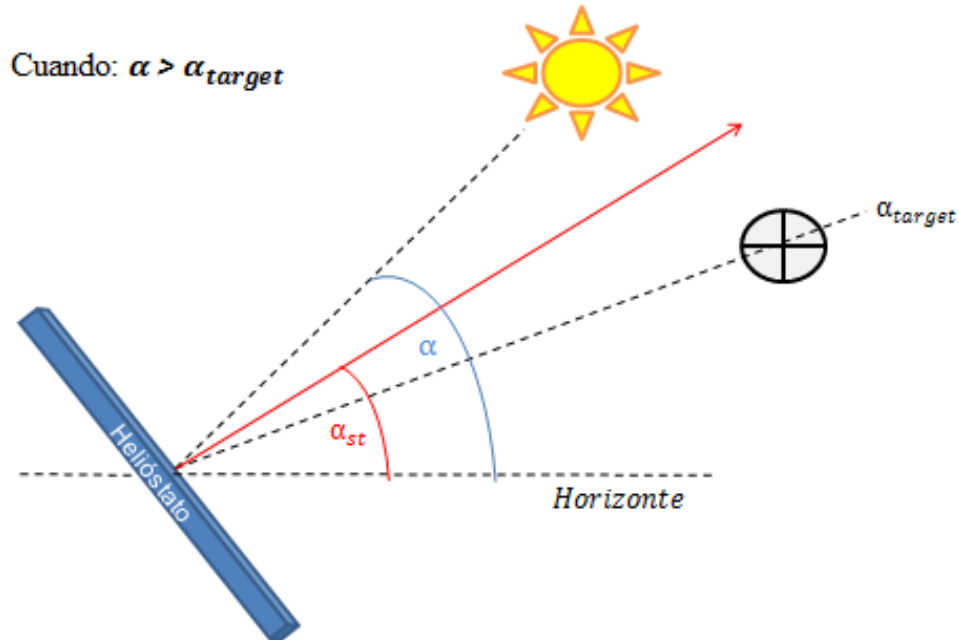
*Figura 57: Bisectriz cenital ( $\alpha_{st}$ ), cuando  $\alpha < \alpha_{target}$*

Donde:

$$\alpha_{st} = \alpha + \left( \frac{\alpha_{target} - \alpha}{2} \right) = \frac{1}{2} (\alpha + \alpha_{target}) \quad [^\circ]$$

*Fórmula 30: Bisectriz cenital, cuando  $\alpha < \alpha_{target}$*

Y cuando  $\alpha > \alpha_{target}$ , la bisectriz cenital se ve así:



*Figura 58: Bisectriz cenital ( $\alpha_{st}$ ), cuando  $\alpha > \alpha_{target}$*

Donde  $\alpha_{st}$  se obtiene matemáticamente así:

$$\alpha_{st} = \alpha_{target} + \left( \frac{\alpha - \alpha_{target}}{2} \right) = \frac{1}{2} (\alpha + \alpha_{target}) \quad [^\circ]$$

*Fórmula 31: Bisectriz cenital, cuando  $\alpha > \alpha_{target}$*

Como se observa, en ambos casos (Fórmulas 19 y 20) se obtiene una ecuación idéntica para la obtención de la bisectriz cenital, independiente de si el sol está por sobre o debajo del objetivo.

El objetivo último del sistema de seguimiento es mantener la orientación del panel de forma tal que la normal a su superficie coincida con ambas bisectrices durante todo el día solar.

Ahora que se sabe el principio óptico a emplear, se explicará los sistemas operativos de control requeridos para lograr posicionar el panel reflector en sus posiciones correspondientes.

#### 4.4.2 Mecanismo de seguimiento y dispositivos asociados

El movimiento del panel será controlado por un sistema de lazo abierto, el cual calculará la trayectoria solar en función de la hora que es y la ubicación geográfica del heliostato. Con esta información determinará hacia dónde apuntar el panel reflector de acuerdo a la orientación que tengan las bisectrices cenitales y azimutales en dicho momento. Para apuntar hacia el objetivo deseado, el panel estará constantemente autocorrigiendo su posición en base al vector solar que se vaya obteniendo durante cada iteración. Este cálculo ha de realizarse cada 5 minutos, puesto que el sol se mueve lentamente, por lo que no vale la pena hacerlo muy seguido ya que si se obtiene que para reajustar el panel hay realizar un giro azimutal  $0.02^\circ$ , este no podrá realizarse puesto que la relación de rotación azimutal es de  $0.45 [^\circ/\text{paso}]$ , por lo que el giro mínimo posible es de  $0.45^\circ$ .

Para llevar a cabo la función de control se utiliza una serie de dispositivos electrónicos, que han de ser explicados uno a uno a continuación.

##### ➤ Placa de desarrollo Arduino UNO

Es el controlador principal del sistema, este utiliza el chip microcontrolador ATmega 328, y posee 6 entradas analógicas, 14 pines digitales y un voltaje de entrada que acepta desde 7 hasta 12 [V]. Puede alimentarse vía transformador o sino también vía USB, que también sirve como puerto para ingresarle el código que se desea ejecutar.

Esta placa es el corazón del circuito, ya que es quién se comunica con todos los otros dispositivos para indicarles qué hacer y cuándo hacerlo.

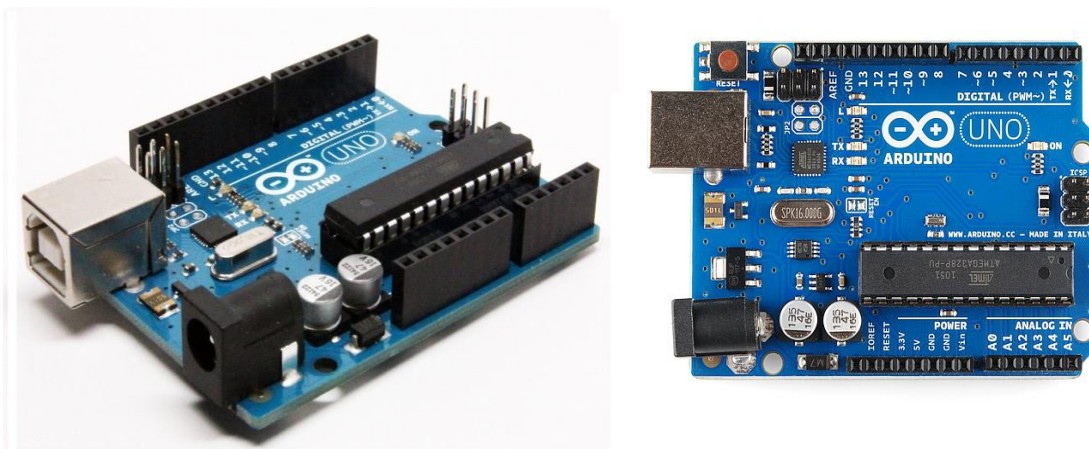
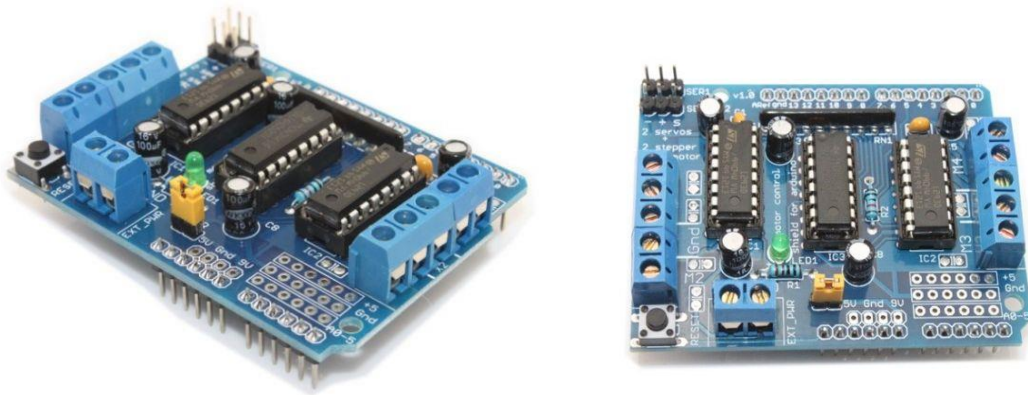


Figura 59: Placa Arduino UNO en vista isométrica y superior.

➤ Motorshield L293D

Es la placa controladora de motores. Ésta es capaz de manejar hasta cuatro motores DC o dos motores paso a paso. Permite controlar su velocidad y dirección de giro. Esta placa va montada directamente por sobre la placa de Arduino UNO, que es quien le dice cómo actuar. Ambos motores EPSON EM-402 se conectan a este Motorshield, que es quién les da la orden para que giren acorde al programa establecido en la placa de desarrollo.



*Figura 60: Motorshield L293D en vista isométrica y superior.*

La alimentación del circuito ocurrirá a través de esta placa Motorshield, la cual recibirá 7.5 [V] de potencial, con lo cual alimentará a la placa de desarrollo, los motores y a los interruptores.

➤ RTC DS1307

También conocido como “Real Time Clock” o reloj autónomo digital, es el dispositivo encargado de proporcionarle la hora al sistema en tiempo real, con fecha, horas, minutos y segundos. La implementación de este aparato le permite al sistema de control realizar el seguimiento de forma automática, evitando así la molestia de tener que ingresar los datos temporales de manera externa, de esta forma la placa controladora es capaz de realizar los cálculos de manera independiente sin hacer uso de un computador. Este reloj cuenta además con una batería pequeña que posee 3 años de autonomía, la cual le permite mantener el registro de la hora sin necesidad de alimentación.

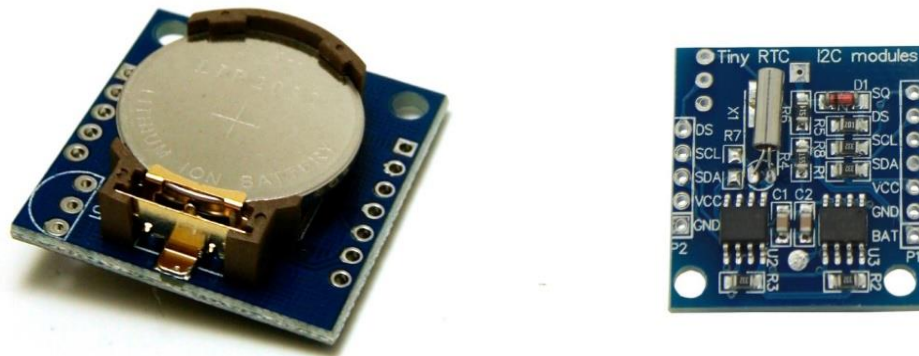


Figura 61: RTC DS1307 en vista superior e inferior.

➤ End Stop Switch

Es un dispositivo de final de carrera, cuya finalidad es avisar cuando el panel se encuentra en su posición inicial, a modo de poder establecer un punto base (tanto en el movimiento cenital como en el azimutal) con respecto al cual se cuente el número de pasos que debe dar cada motor. Hay dos de estos dispositivos en el sistema, uno es el interruptor cenital, que se encuentra ubicado en la estructura móvil superior, de forma tal que cuando el panel reflector llegue a la posición vertical, éste haga clic sobre el interruptor y así quede establecido el punto base del giro cenital. Análogamente, el interruptor azimutal también se encuentra instalado sobre la estructura superior móvil, para que cuando el panel llegué a su posición azimutal base, el interruptor azimutal haga clic y el motor azimutal comience a contar sus pasos desde dicho punto.

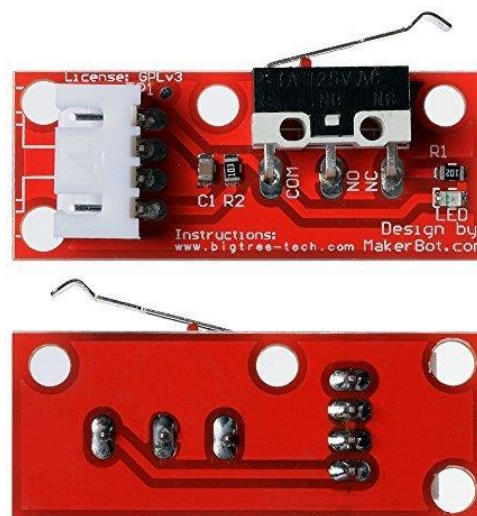
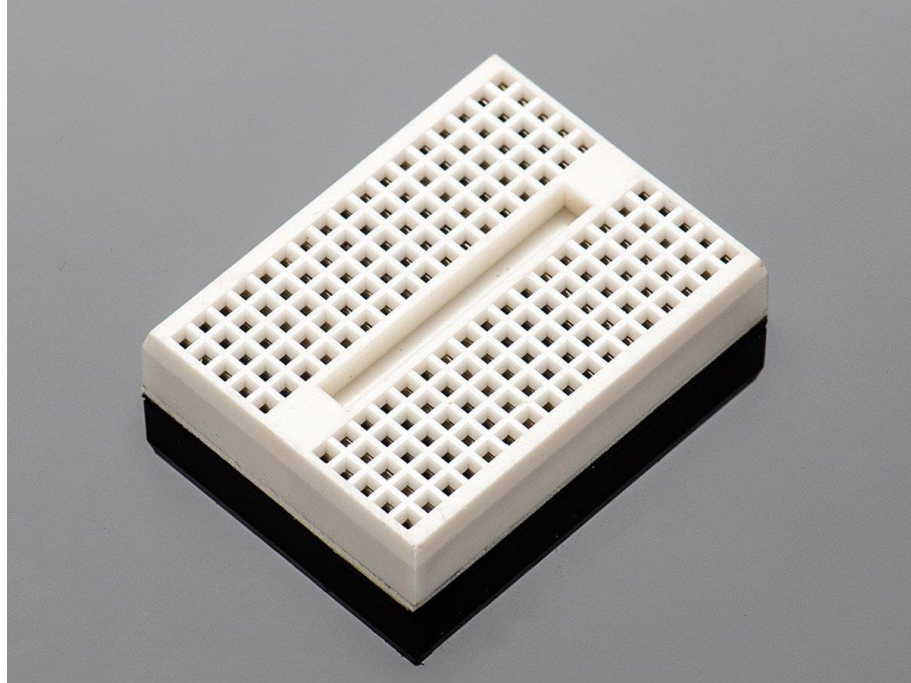


Figura 62: Interruptor End Stop Switch.

### ➤ Breadboard

Placa que sirve para aumentar el número de conexiones del circuito. Esta se utiliza para comunicar al RTC con el Arduino UNO.



*Figura 63: Breadboard.*

#### 4.4.3 Algoritmo de control y seguimiento

En vista de que todo el proceso de seguimiento se basará en la trayectoria que sigue el sol durante el año (o, en otras palabras, los valores tomen el zenit y el azimut), se hace necesario establecer primero, entre qué ángulos se va a mover el heliostato durante todo ese tiempo. Para ello, se analizan en un diagrama de trayectoria solar, los valores del zenit y el azimut que toma el sol en Quilpué (que es el emplazamiento del proyecto) durante los días más críticos del año, correspondientes a los equinoccios de otoño y primavera, y los solsticios de verano e invierno.

De acuerdo con este análisis, se calculó que los valores más extremos de la altitud ocurren durante el mediodía solar del solsticio de verano, y que los valores más extremos para el azimut ocurren ese mismo día, cuando el sol sale y cuando se esconde. Esto coincide con la teoría ya que ese es el día solar más largo del año.

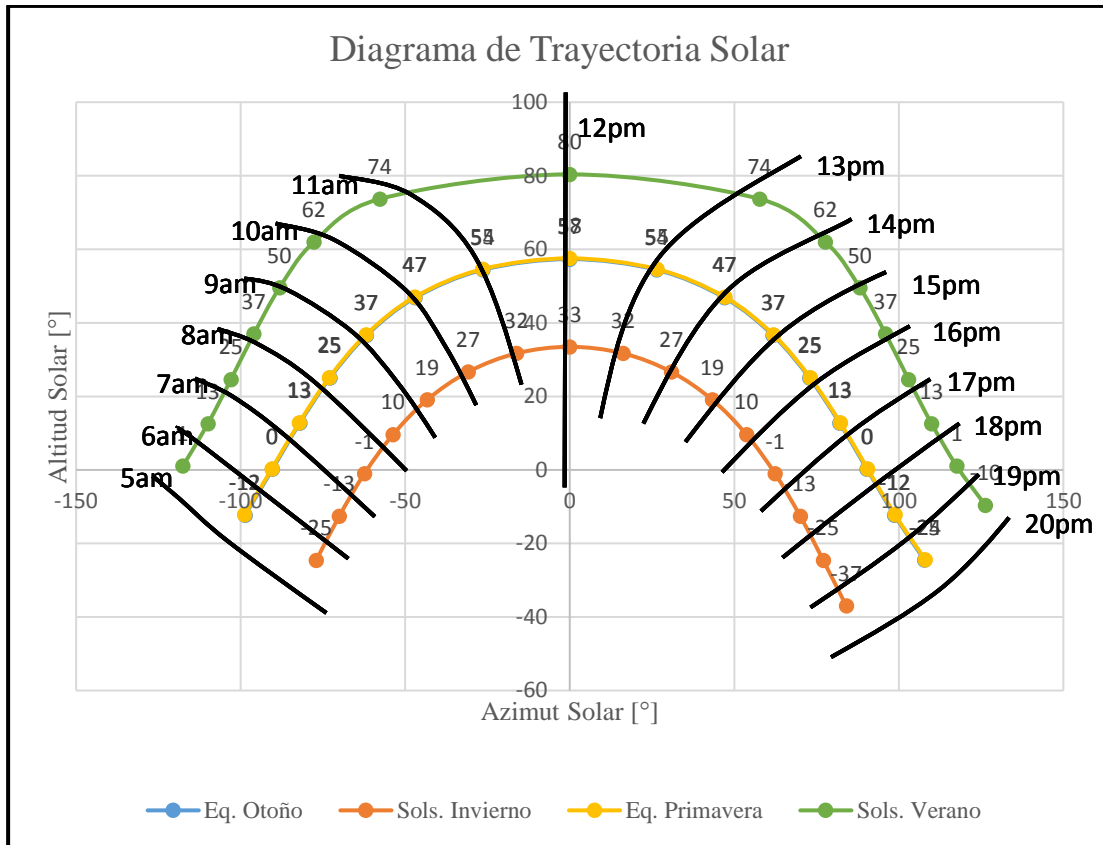


Figura 64: Diagrama de trayectoria solar en Quilpué.

Concretamente, se obtuvo que los valores más extremos para ambos ángulos, durante el día solar del solsticio de verano, fueron:

Ángulos cenitales y azimutales más extremos durante el año	
$z_{max} = 117.6^\circ$	$\alpha_{max} = 80.4^\circ$
$z_{min} = -117.6^\circ$	$\alpha_{min} = 0^\circ$

Tabla 6: Valores máximos y mínimos del zenit y del azimut en Quilpué.

Con lo cual se desprende que ambos motores deben estar programados para suministrar el movimiento suficiente para que el panel sea capaz de moverse entre aquellos ángulos.

En base a todas las consideraciones anteriores, se diseña un diagrama de flujo con todos los procedimientos necesarios para que el helióstato refleje la radiación solar en la dirección deseada.

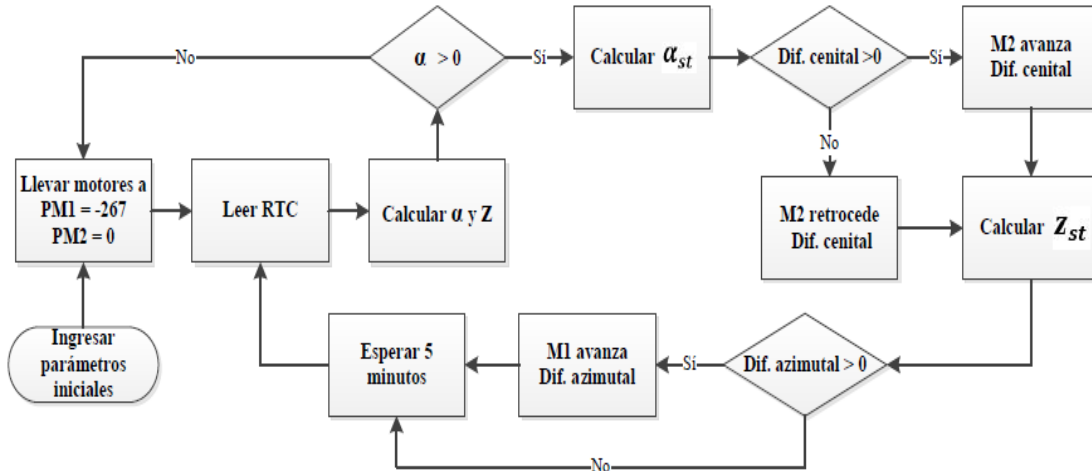


Figura 65: Diagrama de flujo para posicionamiento del panel.

En donde la nomenclatura de cada sigla se especifica según la siguiente descripción.

- M1: Motor 1, correspondiente al motor azimutal.
- M2: Motor 2, correspondiente al motor cenital.
- PM1: Posición del motor azimutal, medida en pasos.
- PM2: Posición del motor cenital, medida en pasos.
- RTC: Reloj autónomo digital.
- $\alpha$ : Altitud solar, medida en grados.
- $z$ : Azimut solar, medido en grados.
- $\alpha_{st}$ : Bisectriz cenital, medida en pasos.
- $z_{st}$ : Bisectriz azimutal, medida en pasos
- Dif. cenital: Corresponde a la diferencia entre la bisectriz cenital y la posición del motor cenital. Se mide en pasos y se calcula así:

$$Dif. cenital = \alpha_{st} - PM2$$

Fórmula 32: Diferencia cenital.

- Dif. azimutal: Es la diferencia entre la bisectriz azimutal y la posición del motor azimutal. Se mide en pasos y se calcula así:

$$Dif. azimutal = z_{st} - PM1$$

Fórmula 33: Diferencia azimutal.

Y los procesos involucrados en el diagrama se explican a fondo en la siguiente descripción:

- Ingresar parámetros iniciales: Considera la ubicación geográfica (latitud y longitud), establecer la velocidad de giro de los motores y su número de pasos, y, además, contempla el posicionamiento del objetivo a apuntar con respecto al heliostato, para lo cual se debe ingresar la inclinación angular del objetivo por sobre el heliostato, y cuántos grados al este (-) o al oeste (+) de éste se encuentra.
- Llevar motores a  $PM1 = -267$  y  $PM2 = 0$ : Se llevan ambos motores a sus posiciones iniciales correspondientes. Primero, el motor azimutal gira en dirección este hasta tocar el primer interruptor de fin de carrera, el cual le indica que llegó al punto más extremo del movimiento azimutal del sol, el cual está definido como  $PM1 = -267$  [pasos], que equivale a  $-120^\circ$  de acuerdo con la relación de rotación  $R_{azim}$ . Esto le avisa al motor azimutal que ahí comienza su recorrido. Inmediatamente a continuación de ello, el motor cenital comienza a girar para bajar el panel, y cuando éste llega a su posición vertical, toca el segundo interruptor de fin de carrera, indicándole que ahí se encuentra la posición cenital mínima del día solar, la cual queda definida como  $PM2 = 0$  [pasos], que equivale a  $0^\circ$  de inclinación de acuerdo con la relación de rotación  $R_{zenit}$ . A partir de este punto ambos motores comienzan su conteo de pasos.
- $\alpha > 0$ : Este procedimiento discrimina si la altitud es positiva o no. El fin de esto es determinar si el día solar ha terminado o si aún continúa.
- Calcular  $\alpha_{st}$ : Como el día solar no ha terminado, el heliostato debe seguir operando, para lo cual se procede con cálculo de la bisectriz cenital (en grados), y se transforma al número equivalente de pasos según la relación de rotación  $R_{zenit}$ .
- Dif. cenital  $> 0$ : Este comando calcula y discrimina si la posición cenital del panel ( $PM2$ ) coincide con la bisectriz cenital calculada.
- $M2$  avanza Dif. cenital: En caso de que la diferencia cenital sea positiva, el motor cenital avanza la diferencia equivalente en pasos para orientar el panel hasta que coincida con la bisectriz cenital. Con esto se actualiza el conteo de pasos de  $PM2$ . Nótese que el motor cenital solo avanzará hasta el mediodía solar ( $TSA < 12$ [hr]), ya que a partir de ese momento el sol comienza a bajar para más tarde esconderse en el horizonte.
- $M2$  retrocede Dif. cenital: Si la diferencia cenital es negativa, significa que la bisectriz cenital se encuentra en una posición más baja que la posición del motor cenital, con lo cual se le ordena a éste que retroceda la distancia equivalente en pasos hasta que coincida con la bisectriz cenital. Con esto se actualiza el conteo de pasos de  $PM2$ . Cabe mencionar que este comando entrará en acción una vez pasado el mediodía solar ( $TSA < 12$  [hr]).
- Calcular  $z_{st}$ : Se calcula la bisectriz azimutal (en grados) y se transforma a su número equivalente de pasos según la relación de rotación  $R_{zenit}$ .
- Dif. azimutal  $> 0$ : Discierne si la posición del motor azimutal coincide con la bisectriz azimutal.
- $M1$  avanza Dif. azimutal: En el caso de que la bisectriz azimutal sea mayor que la posición del motor azimutal, éste avanza la diferencia equivalente en pasos para orientar el panel hasta que este coincida con la bisectriz azimutal. Una vez ejecutado este comando, se actualiza el conteo de pasos de  $PM1$ .
- Esperar 5 minutos: Se espera un momento a que el sol avance en su trayectoria, y posteriormente se reinicia el ciclo, partiendo desde el punto de la lectura horaria.

Todo el código de programación de este proceso se realiza en el software Arduino IDE, y para que este se pueda ejecutar, es necesario, además de la instalación de dicho software, incluirle las siguientes librerías.

- “Time”
- “Time.Lib”
- “DS1307RTC”
- “math”
- “Wire”
- “RTCLib”
- “AFMotor”

Y, además, se debe configurar a priori el reloj RTC para fijarle la hora civil exacta.

## 5. Construcción

El sistema completo del helióstato contempla el armado de tres partes: El soporte móvil superior, el panel reflector y el pedestal base. En esta sección se explica y se muestra esquemáticamente el proceso de armado de estos componentes, y finalmente, el ensamblaje del sistema completo. Todos los materiales involucrados en la manufactura están especificados en la sección de diseño del presente informe.

### 5.1 Armado de piezas por separado

Primero se enseñará cómo se armaron los subsistemas por separado, y luego se mostrará el ensamblaje de la estructura completa del helióstato.

#### 5.1.1 Pedestal base

Para ensamblar este componente se soldaron (con soldadura al arco) tres perfiles cuadrados de acero al carbono, a un tubo hecho del mismo material, con 120° de separación angular entre un perfil y otro, haciendo del soporte una estructura tipo trípode, en donde los perfiles actúan como patas, y el tubo como columna. En el extremo de cada pata, se realizó una perforación, por la cual pasa un perno M6, el cual es va sujeto con una tuerca; de esta manera se puede hacer variar la altura de cada “pata”, con simplemente aflojar o tensar la tuerca.

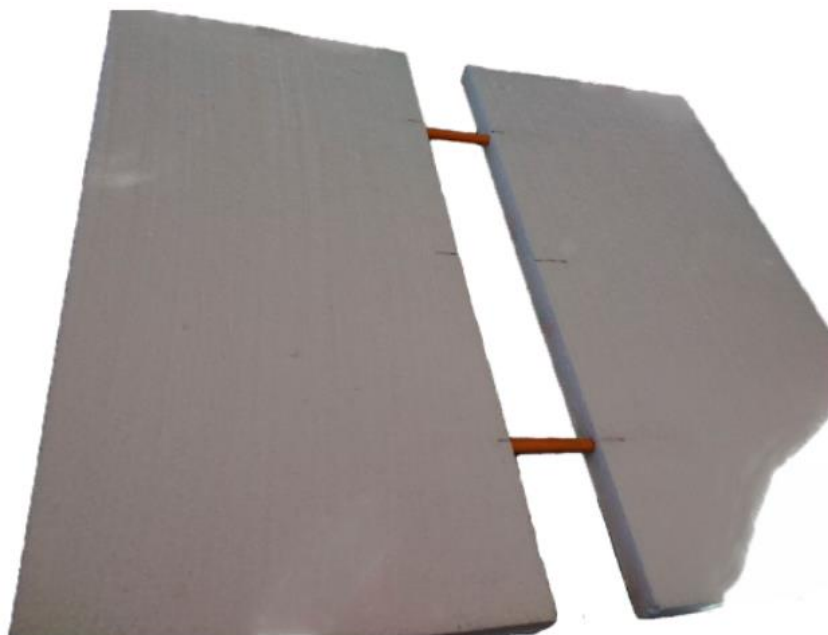
En el extremo superior de la columna, se realizó otra perforación, y en el perímetro de dicho agujero se soldó una tuerca, por la cual pasa un perno M10, el cual tiene la función de apretar el tubo de PVC sanitario que se aloja al interior del trípode.



*Figura 66: Pedestal base construido*

### 5.1.2 Panel reflector

Primero se une dos planchas de plumavit, haciendo uso de adhesivo sin solvente para poliestireno expandido, marca Decoflair, y, además, dos tubos de PVC eléctrico de 16 [mm] de diámetro y 500 [mm] de longitud, los cuales van ensartados en ambos costados del panel, para poder darle más sujeción al conjunto.



*Figura 67: Unión de planchas de plumavit para el panel.*



*Figura 68: Rollo de película metálica reflectante.*

Una vez unidos, se limpia una de sus superficies y se le pega la película metálica reflectante. Esta aparece con un protector azul en la Figura 69.



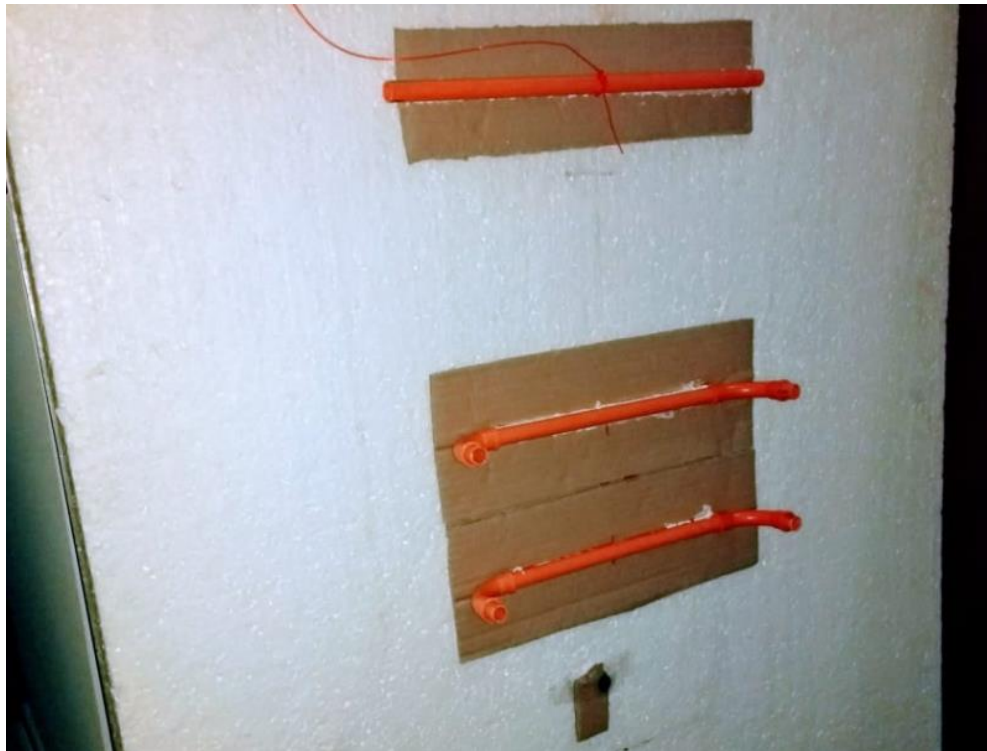
*Figura 69: Película reflectante (con protector) adherida al plumavit.*

Luego de esto, se da vuelta el panel para instalarle su estructura de anclaje, la cual ha de ir acoplada a la estructura superior móvil. Para ello se pegan al centro del panel dos planchas cuadradas de cartón de 100 [mm] x 300 [mm] (haciendo uso del mismo adhesivo), y posteriormente, se pega un tubo PVC eléctrico encima de cada plancha de cartón. Luego de ello, se acopla un codo de PVC eléctrico en cada extremo de aquellos tubos, de forma tal

que cada codo sea normal a la superficie del panel. En la superficie libre de cada uno de estos codos, se acopla otro tubo pequeño de PVC eléctrico de 35 [mm] de longitud.

Después de esto, se pega una tercera plancha de plumavit en la parte superior del panel (a 130 [mm] del borde), junto con otro tubo de PVC eléctrico, ambos de las mismas dimensiones que el caso anterior, con la diferencia de que a este tubo tiene amarrado a su centro una cuerda de nylon, la cual ha de conectar el contrapeso con el extremo superior del panel.

Por último, se pega una cuarta plancha de cartón en la parte inferior del panel (a 200 [mm] del centro), de 35 [mm] x 65 [mm], sobre la cual se pega una golilla M6, que actúa como una superficie dura sobre la cual el interruptor de fin de carrera cenital hace clic cuando el panel llega a su posición vertical.



*Figura 70: Parte trasera del panel reflector.*

De esta estructura ha de ir colgado el contrapeso, el cual consiste en un pote plástico con forma cilíndrica con 114 [mm] de diámetro y 140 [mm] de altura, el cual contiene piedras en su interior, que en conjunto tienen una masa de 710 [gr]. En la tapa de este pote va incrustado un gancho plástico que es el que finalmente pende de la cuerda de nylon que conecta con el panel.



*Figura 71: Contrapeso.*

### 5.1.3 Soporte móvil superior

Primero se construye la estructura tipo T con los tubos y la Tee de PVC hidráulico, como se muestra en la Figura 72 (a). De forma separada, se acoplan los dos rodamientos en los extremos del eje cenital, a 65 [mm] de cada borde específicamente, como aparece en la Figura 72 (b).

Luego, se toman estos dos conjuntos y se ensamblan para que el eje cenital quede al interior de la T, y posteriormente, en los bordes de la T, se instalan las tapas con soporte motriz cenital, azimutal, y la tapa circular con soporte para rodamiento (Figura 73).



*Figura 72: Armado de estructura tipo T y rodamientos en eje cenital.*



*Figura 73: Tapas de soporte cenital y su acople en estructura tipo T.*

Ahora se instala el mecanismo motriz sobre la tapa con soporte motriz cenital, empleando un motor EM-402, una rueda dentada doble y una rueda dentada simple, las cuales van especificadas en la sección de diseño. Este ensamble se muestra en la Figura 74.

A continuación se instala el eje azimutal en la estructura tipo T con su mecanismo motriz correspondiente, empleando un motor EM-402 y una rueda dentada (Figura 75). Cabe mencionar que los motores quedan sujetos a las tapas de soporte mediante cuatro pernos M3 para cada uno, y además, que el eje azimutal queda fijo y centrado dentro de la T gracias al buje superior tipo tapa y al buje inferior, el cual va acoplado a la tapa de soporte motriz azimutal.



*Figura 74: Ruedas dentadas y mecanismo motriz cenital.*



Figura 75: Mecanismo motriz azimutal y su montaje en el soporte en T.

Ahora, en la parte exterior de esta estructura tipo T se instala el sistema de control y seguimiento. Para ello se sitúa en su costado las placas electrónicas de desarrollo Arduino UNO y el Motorshield L293D, las cuales van montadas una sobre la otra. Aledaña a estas placas se coloca la Breadboard, sobre la cual se encuentra instalado el RTC. El RTC se comunica con el Arduino UNO mediante los pins GND (“Ground”, conexión a tierra), VCC (“Supply Voltage”), SDA (“Serial Data Address Input/Output”) y SCL (“Serial Clock Input”), que van conectados a los pins GND, 3.3V, SDA y SCL del Arduino UNO respectivamente, como se muestra en el esquema de la Figura 76.

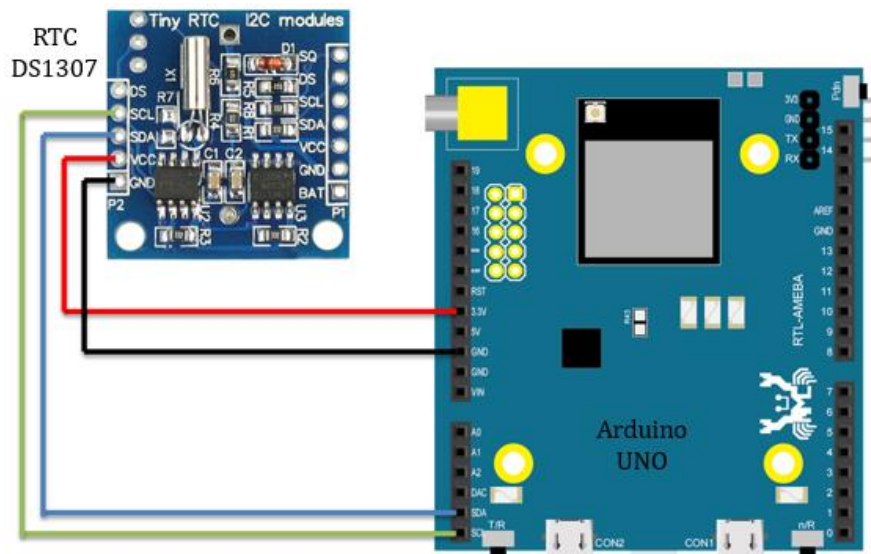
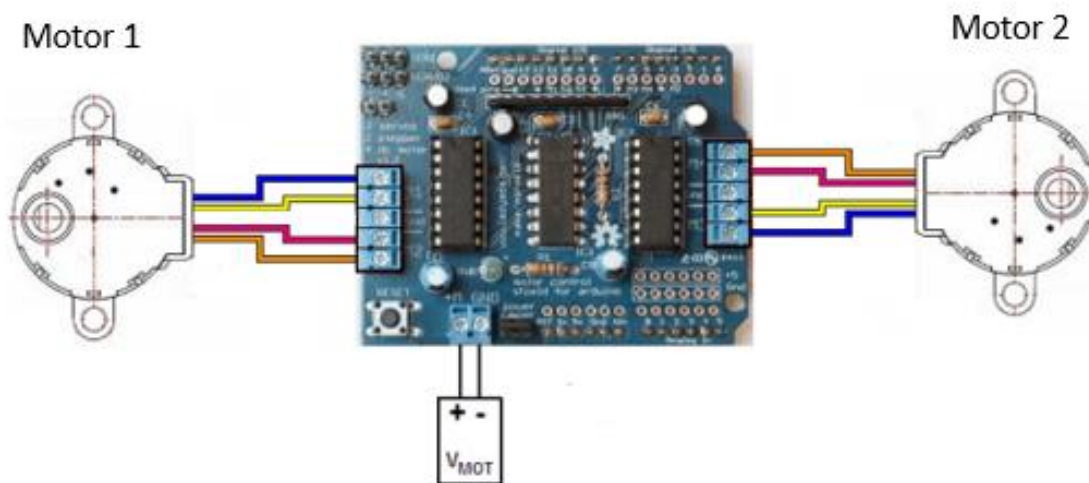


Figura 76: Esquema de conexiones de RTC a Arduino UNO.

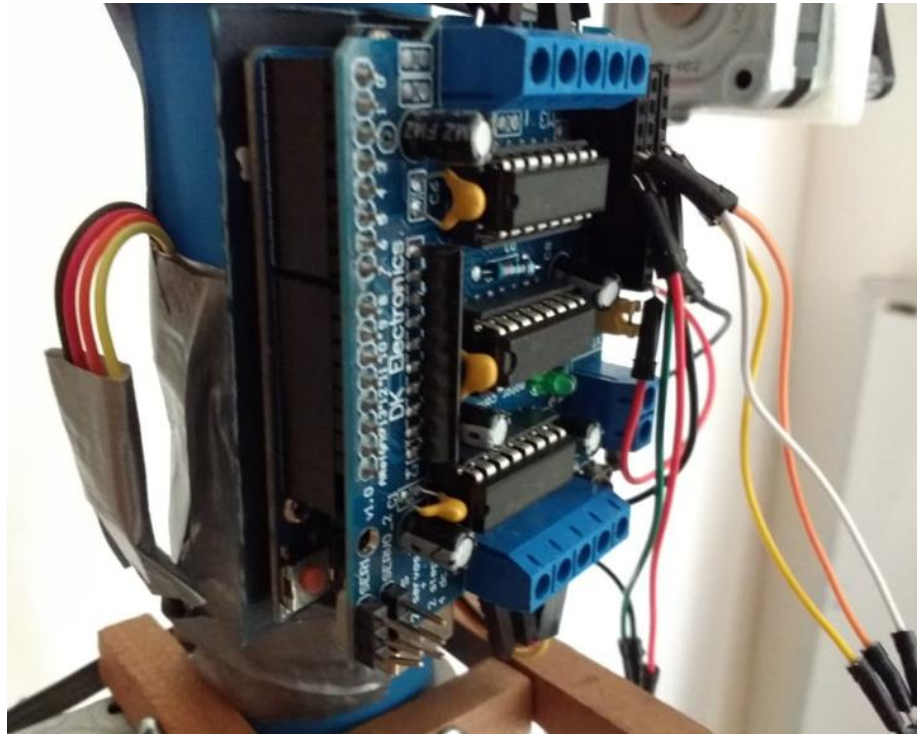
Luego se conectan los motores al Motorshield L293D, de acuerdo con el esquema de la Figura 77.



*Figura 77: Esquema de conexión del Motorshield con los motores.*

Como se ve en la última imagen, los motores poseen cuatro cables. Estos se dividen en dos pares, y cada par corresponde a una bobina. Para cablear de manera correcta los motores se debe determinar los pares de cables que representan a cada bobina; esto se hace midiendo las resistencias entre los pares de cables de conexión del motor, y se sabe que un par corresponde a una bobina cuando la medición marca cero. Luego que ya se tienen identificados los pares de bobina, se conectan al Motorshield de manera tal que los pares queden juntos. Una vez que se tiene esto conectado, se puede determinar la polaridad del motor haciéndolo girar, y si se desea revertir el sentido de giro, basta con revertir la polaridad. Para medir estas resistencias se utilizó un equipo de testeo digital llamado Digital Multimeter DT830B.

Luego de haber hecho esto, así es como se ve el Arduino UNO con el Motorshield sobre la estructura tipo T.



*Figura 78: Arduino UNO y Motorshield montados sobre el soporte.*

Y por el lado trasero del soporte se observa cómo queda el RTC con la Breadboard.



*Figura 79: RTC y Breadboard montados sobre estructura en T.*

Luego de esto, se construyen los soportes de anclaje (Figura 80) que unen el panel reflector con la estructura móvil superior. Para esto se conectan dos codos de PVC eléctrico de 16 [mm] en los bordes de una Tee de PVC hidráulico de 21 [mm]. Después se acopla uno de estos soportes de anclaje en cada borde del eje cenital.



*Figura 80: Soportes de anclaje panel-estructura móvil.*

Después se monta el anclaje inferior de eje azimutal en la base de dicho eje, y se procede a montar la estructura tipo T sobre el tubo de PVC sanitario.

Ya teniendo construida la mayor parte de la estructura superior móvil, se arma la guía de contra-torque con palos de maqueta y se fija sobre la estructura tipo T con la ayuda de pernos M3. Posteriormente, se usa ese mismo material para construir los soportes de los interruptores de fin de carrera, de forma tal que el interruptor cenital quede posicionado a 135 [mm] del eje azimutal (que es la distancia requerida para que el panel toque el interruptor cuando llega a la posición vertical), y que el interruptor azimutal esté a la misma altura que el extremo de la tapa con soporte motriz azimutal.

Los interruptores van conectados al Motorshield, y cada uno posee tres pines de conexión: S (“Signal”, de color verde), GND (“Ground”, de color negro) y 5V (“5 Volts”, de color rojo), los cuales se conectan a los pines A1 (Analog 1), GND y +5 del Motorshield respectivamente. El interruptor 1 va conectado a la entrada analógica A1 y el interruptor 2 a A2.

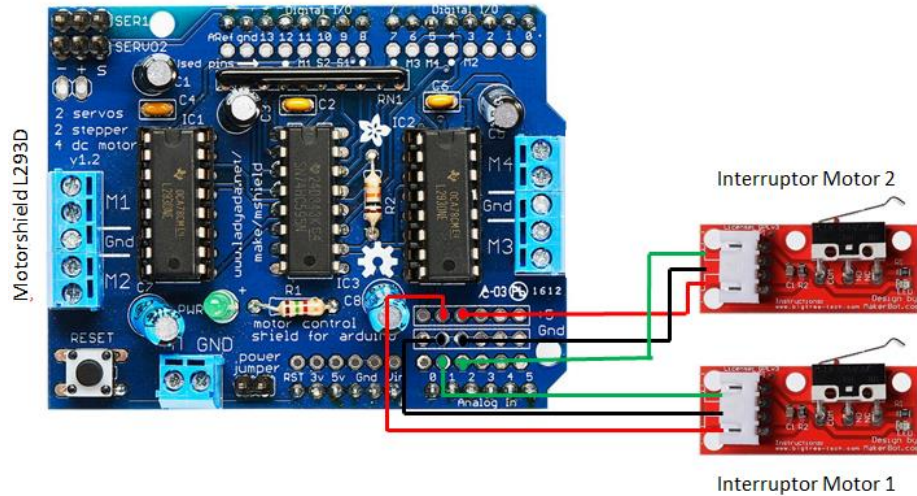


Figura 81: Esquema de conexión entre interruptores y Motorshield.

Además, como medida de precaución para que el panel no se vaya para atrás a causa del contrapeso cuando el helióstato esté apagado, se instalan dos topes que limitan al panel a no pasar más allá de su posición horizontal ( $90^\circ$ ), lo que es más que suficiente para los propósitos del sistema ya que la mayor altitud alcanzada por el sol durante el año en el LER es de  $80.4^\circ$ .

Con todas estas construcciones, la estructura superior móvil queda de la siguiente manera.



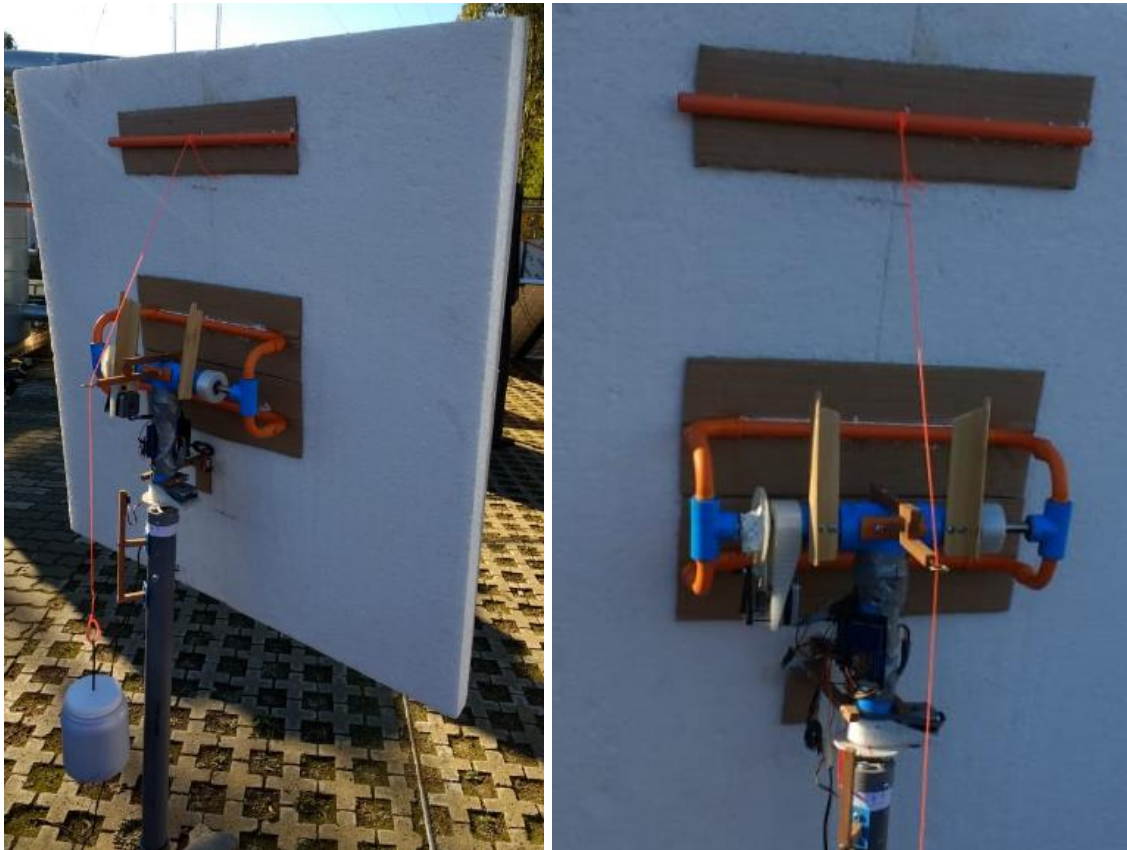
Figura 82: Estructura superior móvil en vista izquierda y derecha.

## 5.2 Ensamblaje estructural completo

El ensamble final consta de dos simples pasos: primero se monta la estructura superior móvil sobre el pedestal base, y después se acopla el panel reflector a la estructura superior móvil.



*Figura 83: Helióstato en vista frontal derecha e izquierda.*



*Figura 84: Vista trasera del heliostato y detalle de acople con el panel.*

## **6. Implementación y puesta en marcha del ensayo**

La puesta en marcha se realizó el martes 12 de junio entre las 12:30 y las 15:00 en el LER, y el objetivo de este ensayo es verificar mediante registro videográfico, si efectivamente, el heliostato construido es capaz de proyectar la radiación solar en un punto fijo durante un lapsus de tiempo dentro del día solar.

Para esto primero se establece un área de pruebas a la cual no le llegue sombra durante la duración de la prueba, posteriormente, se monta dentro de esa zona un objetivo grande al cual apuntar, el cual consiste en una plancha cuadrada de madera de 1.6 [m] por lado, parada verticalmente de espalda hacia el norte (es decir, mirando hacia el sur), a una altura de 40 [cm] del suelo. A esta se le cubre con una tela de color negro en su superficie, como se aprecia en la Figura 85.



*Figura 85: Objetivo a irradiar durante el ensayo.*

Después de ello, se procede a montar el heliostato dentro de la zona de pruebas de manera tal que éste quede mirando hacia el norte, frente al objetivo a irradiar, a una distancia de 4 [m] de este último, y así evitar posibles sombreadamientos al panel reflector durante el ensayo.

De esta manera, queda que el ángulo cenital entre el heliostato y el objetivo con respecto al horizonte es de cero grados ( $\alpha_{target} = 0^\circ$ ), y que el ángulo azimutal entre el heliostato y el objetivo con respecto al norte también ( $z_{target} = 0^\circ$ ).

Ya con esto armado, se ubica una cámara fotográfica Nikon Coolpix L340 al costado derecho del heliostato y mirando hacia el objetivo, para así poder registrar cómo se comporta la reflexión de los rayos solares a través del tiempo.

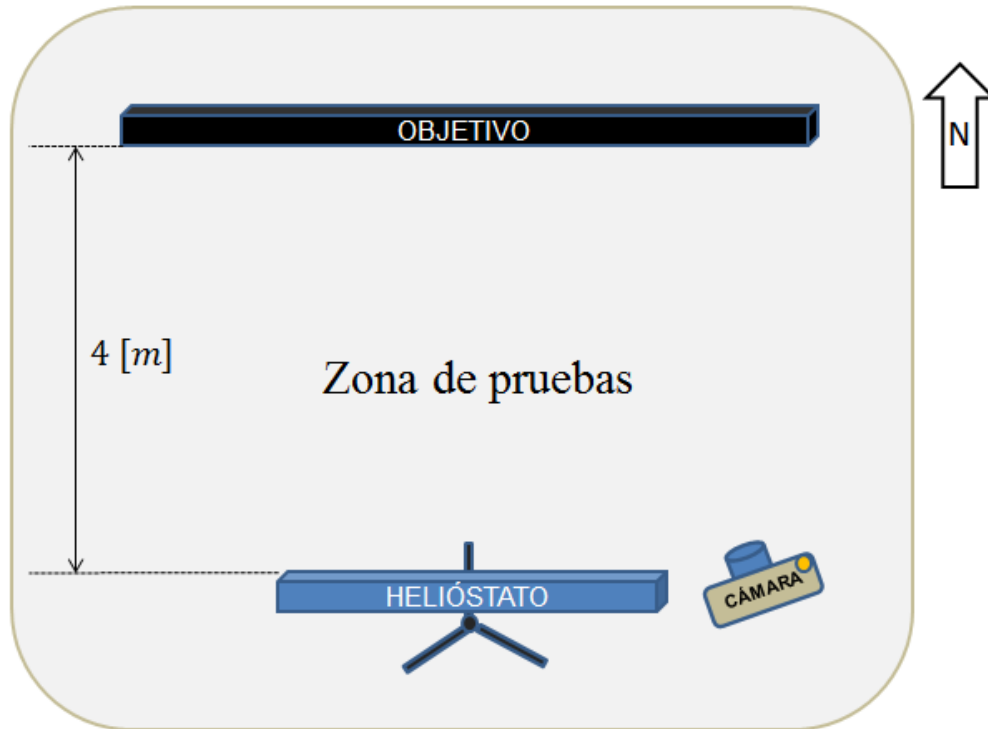


Figura 86: Layout esquemático del ensayo.

Teniendo esto listo, se da inicio al ensayo de funcionamiento del helióstato. Para esto se conecta el sistema a la toma de corriente del laboratorio, mediante un adaptador universal de corriente alterna a corriente directa con voltaje de salida regulable, el cual le entrega energía al Motorshield L293D (como se especifica en la Figura 77), que es quién distribuye el voltaje a todos los dispositivos del sistema de control. Se regula el adaptador para que su voltaje de salida sea de 7.5 [V] con 1200 [mA] de corriente, como aparece en la figura 87.



Figura 87: Adaptador universal con voltaje de salida configurado en 7.5 [V].

Una vez conectado el heliostato, los motores comienzan a girar hasta sus respectivas posiciones iniciales ( $PM1 = -267$  y  $PM2 = 0$ ), dejando así al panel reflectante en posición vertical y con un azimut de  $-120^\circ$ . Inmediatamente a continuación, los motores giran hasta posicionar el reflejo del sol sobre la superficie del objetivo. Una vez ahí, el panel reflector mantiene su posición, la cual se va reajustando cada cinco minutos para hacer coincidir la bisectriz cenital y azimutal con la normal del panel, de acuerdo con los cálculos que el algoritmo programado va obteniendo.



*Figura 88: Vista frontal del objetivo antes del ensayo*

Y de acuerdo con los registrado por la cámara a cada 30 minutos, se obtuvo la siguiente evolución del reflejo de la radiación.

i) A las 12:30 PM:



*Figura 89: Prueba de reflexión a las 12:30 PM.*

ii) A las 13:00:



*Figura 90: Prueba de reflexión a las 13:00.*

iii) A las 13:30:



*Figura 91: Prueba de reflexión a las 13:30.*

iv) A las 14:00:



*Figura 92: Prueba de reflexión a las 14:00.*

v) A las 14:30:



*Figura 93: Prueba de reflexión a las 14:30.*

vi) A las 15:00:



*Figura 94: Prueba de reflexión a las 15:00.*

Y de acuerdo a lo evidenciado por estas imágenes, se puede comprobar que el helióstato sí logra reflejar la radiación incidente sobre un punto fijo de forma constante a lo largo del día solar, demostrando que los subsistemas de soporte, motriz, y de seguimiento, sí desempeñan sus funciones y cumplen con sus objetivos de diseño.

Se debe destacar que todas las imágenes del ensayo muestran un patrón lumínico irregular sobre el objetivo, lo que se debe a que la radiación reflejada por el panel sufre un fenómeno de dispersión en la etapa de reflexión. Esto se debe a que la superficie de plumavit (sobre la cual fue adherida la película reflectante) no es totalmente regular, lo que ocasiona que la imagen proyectada del sol se distorsione.

A través del tiempo es posible observar como los rayos reflejados se van deformando ligeramente al llegar al objetivo, lo que se debe a una alteración natural generada por el movimiento del sol, que es lo mismo que pasa con la sombra de un objeto a lo largo del día: esta se va agrandando a medida que el sol se acerca al horizonte.

Otro fenómeno que quedó en evidencia al realizar el ensayo fue que el leve viento que había en el laboratorio a veces ocasionaba pequeñas vibraciones en el panel reflector, lo cual alteraba milimétricamente la imagen proyectada sobre el objetivo en ciertos momentos. Estos episodios eran muy breves y no se alcanzaban a generar pérdidas lumínicas significativas.

En la Figura 94 se aprecia que la intensidad reflejada baja considerablemente, y esto se debe a que, en ese momento, el helióstato comienza a ser sombreado por la cresta de un árbol muy alto ubicado en las cercanías del laboratorio.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados finales obtenidos durante el ensayo, y teniendo presente los objetivos planteados al comienzo de ese trabajo, es posible concluir que:

- Se logra construir e implementar un heliostato con sistema de redireccionamiento solar de manera exitosa, demostrando que el diseño elaborado funciona de correctamente y cumple con las expectativas del proyecto.
- Tomando en cuenta el valor económico y la facilidad de obtención de todos los componentes y materiales involucrados en la construcción del sistema, queda en evidencia que es posible fabricar heliostatos de bajo costo ( $< 100$  [USD/m<sup>2</sup>]) siempre y cuando la carga eólica en el lugar de implementación sea baja.
- Si bien el contrapeso cumple su función y genera un contra-torque que le permite al motor cenital levantar el panel hasta la altura deseada, constituye una solución funcional condicionada por las circunstancias, las cuales estaban restringidas a un motor con poca capacidad de torque. Esto limita la precisión del seguimiento cenital ya que una vez que el sistema se encuentra en marcha, el giro del motor queda condicionado por la magnitud del momento generado por el contrapeso, siendo que, en un escenario ideal, el motor sería el único responsable de mover el panel. Es por esto que, en caso de ser posible, sería interesante utilizar un motor cenital de mayor potencia que sí sea capaz de levantar el panel por su propia cuenta.
- Tomando en cuenta los patrones de reflexión irregulares causados por la dispersión lumínica ocasionada por el panel reflector, queda en evidencia que la reflectividad del sistema podría mejorarse, para lo cual se propone como mejora a futuro, trabajar la superficie del plumavit antes de pegarle la película reflectante, para que esta quede más lisa, sin irregularidades, y pueda reflejar una imagen más centrada y menos difusa, lo que permitiría aprovechar de mejor manera la radiación solar incidente.
- Considerando los resultados positivos que tuvo la puesta en marcha, se abren nuevas posibilidades, que invitan a explorar la implementación de este tipo de sistemas en aplicaciones a escala que requieran de energía térmica, tanto de alta como de baja entalpía, y con el valor agregado de operar de forma económica y ecológica.

## REFERENCIAS

1. **Pfahl, A., Brucks, A., Holze, C.** *Wind load reduction for light-weight heliostats.* *Energy Procedia*, 2014. 49, 193–200.
2. **Pfahl A, Randt M, Holze C, Unterschütz S.** *Autonomous light-weight heliostat with rim drives.* *Solar Energy*.
3. **M. Puig-Arnavat, E.A. Tora, Bruno, A. Coronas.** *State of the art on reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock*, 2013.
4. **Wieckert, C., Meier, A., Steinfeld, A.** *On Indirectly Irradiated Solar Receiver-reactors for high thermochemical processes*, 2003.
5. **Schaffner, B., Meier, A., Willemin, D.** *Recycling of Hazardous Solid Waste Material Using High-Temperature Solar Process Heat. 2. Reactor Design and Experimentation*, 2003.
6. **Soteris A. Kalogirou** “*Solar thermal collectors and applications*”, 2004.
7. **Deepak, Yadav., Rangan, Banerjee.** *A review of Solar Thermochemical Processes* *Solar Thermochemical Process*, 2016.
8. **Steinfeld, A., Larson, C., Palumbo, R., Foley, M.** *Thermodynamic analysis of the co-production of zinc and synthesis gas using solar process heat.* *Energy* 1996; 21:205–22.
9. **Palumbo, R., Rouanet, A., Pichelin, G.** *Solar thermal decomposition of TiO<sub>2</sub> at temperatures above 2200 K and its use in the production of Zn and ZnO*, *Energy* 1995; 20:857–68.
10. **Piatkowski, N., Wieckert, C., Steinfeld, A.** *Experimental investigation of a packed-bed solar reactor for the steam-gasification of carbonaceous feedstocks.* *Fuel Processing Technology*, 2009.
11. **Seung-Kuk, Seo., Jae-Seung, Roh., Suk Hwan, Kim., Se-Hwan, Chi2. and Eung-Seon, Kim.,** *Thermal Emissivity of Nuclear Graphite as a Function of its Oxidation Degree(3): Structural Study using Scanning Electron Microscope and X-Ray Diffraction.* 2011.
12. **Ben-zvi, R.** *Numerical simulation and experimental validation of a solar metal oxide reduction system under vacuum.* *Sol Energy* 2013;98:181–9.
13. **Coventry, J., Pye, J.** *Heliostat cost reduction—where to now.* In: *Proceedings of the 19th international solar PACES symposium.* Perpignan, Las Vegas; 2013
14. **Guo, M., Sun, F., Wang, Z., Zhang, J.,** 2013. *Properties of a general azimuth-elevation tracking angle formula for a heliostat with a mirrorpivot offset and other angular errors.* *Sol. Energy* 96, 159–167
15. **Ho, C. K., Ghanbari, C. M., O’Neill, M. B., and Yuan, J. K.,** 2011, *On-Sun Testing of a Heliostat Using Facets With Metallized Polymer Films.* *SolarPACES 2011 Conference*, Granada, Spain, September 20–23
16. **Pfahl, A.** *Survey of Heliostat Concepts for Cost Reduction.* *Journal of Solar Energy Engineering.* 2013; 136.
17. **Pfahl, A., Brucks, A., Holze, C.,** 2014. *Wind load reduction for light-weight heliostats.* *Energy Procedia* 49, 193–200.
18. **Pfahl, A., Coventry, J., Röger, M., Wolfertstetter, F., Vásquez-Arango, J.F., Gross, F., Arjomandi, M., Schwarzbözl, P., Geiger, M. and Liedke, P.** *Progress in heliostat development’, Solar Energy*, 2017. p3-37.

19. **Pfahl, A., Randt, M., Holze, C., Unterschütz, S.** *Autonomous light-weight heliostat with rim drives*. Solar Energy.
20. **Chen, YT., Chong, KK., Bligh, TP., Chen LC, Yunus J, Kannan KS et al.** *Non-imaging, focusing heliostat*. Sol Energy 2001;71:155–64. 2013;92:230-240.
21. **Pfahl, A., Randt, M., Meier, F., Zschke, M., Geurts, C.P.W., Buselmeier, M.** *A holistic approach for low cost heliostat fields*. Energy Procedia. 2015.
22. **Z'Graggen, Andreas.** *Solar gasification of carbonaceous materials, Reactor Design, Modeling and Experimentation*. 2008.
23. **Piatkowski, N., Wieckert, C., Steinfeld, A.** *Experimental investigation of a packed-bed solar reactor for the steam-gasification of carbonaceous feedstocks*. 2009.
24. **Téllez, F., Burisch, M., Villasante, C., Sánchez, M., Sansom, C., Kirby, P., Turner, P., Caliot, C., Ferriere, A., Bonanos, C.A., Papanicolas, C., Montenon, A., Monterreal, R., Fernández, J.,** 2001. *State of the art in heliostats and definition of specifications – survey for a low cost heliostat development*. STAGE-STE EERA EU Project, Deliverable 12.1.
25. **Saldivia, D.** *Apuntes IWM-330 Heliotecnia*. Valparaíso: s.n., 2016.
26. **EKOenergía.** *La Eco-etiqueta de la Energía*. [En línea], 2013. <[www.ekoenergy.org](http://www.ekoenergy.org)>.
27. **ABENGOA.** *Complejo solar Atacama 1*. [En Línea], 2017. <[www.abengoa.cl](http://www.abengoa.cl)>.
28. **International Energy Agency.** *Hydrogen in the chemical industry*. [En línea], 2013. <[www.iea.org](http://www.iea.org)>.
29. **UNESA.** *Central solar térmica*. [En línea], 2015. <[www.unesa.es](http://www.unesa.es)>.
30. **Energy efficiency and renewable energy.** *CSP System Analysis*. [En línea], 2016. <[www.energy.gov](http://www.energy.gov)>.
31. **North American Clean Energy.** *Aimed at the sun: Solar tracking systems for CSP*. [En línea], 2013. <[www.nacleanenergy.com](http://www.nacleanenergy.com)>.

# ANEXOS

## 7. Código Fuente: “Helio Target”

```
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>
#include <DS1307RTC.h>
#include <math.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include <AFMotor.h>

float grados_altitud = 0;
float lat = -33.0483;
float lon = -71.4409;
float h = 0;
float b = 0;
float ET = 0;
float dec = 0;
float TSA = 0;
float RT1 = 0.45;
float RT2 = 0.142;
float factor = 0.989;
float factor2 = 0.986;
float factor3 = PI/180;
float factor4 = 180/PI;
float z = 0;
float z1 = 0;
float z2 = 0;
float altura_target = round(0/RT2); //Diferencia altura con
respecto a centro heliostato en grados
float azimut_target = round(0/RT1); //Diferencia azimutal con
respecto a centro heliostato en grados

AF_Stepper motor1(200, 1); //Motor inferior = AZIMUTAL
AF_Stepper motor2(200, 2); //Motor superior = CENITAL

int posicion_motor_a;
int posicion_motor_z;

uint8_t horas,minutos,segundos;
uint8_t dia,mes_RTC,dia_semana;
int anno;

void mover_motor_1(int pasos, bool direccion) {
  if (direccion == 1)
  {
    motor1.step(pasos, FORWARD, DOUBLE);
  }
  else
  {
    motor1.step(pasos, BACKWARD, DOUBLE);
  }
}
```

```

    }
}

void mover_motor_2(int pasos, bool direccion) {
    if (direccion == 1)
    {
        motor2.step(pasos, FORWARD, DOUBLE);
    }
    else
    {
        motor2.step(pasos, BACKWARD, DOUBLE);
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    motor1.setSpeed(5);
    motor2.setSpeed(5);

    //Poner ambos motores en posición inicial

    while (digitalRead(A1) == true)
    {
        motor1.step(1, BACKWARD, DOUBLE);
        delay(1);
    }
    if (digitalRead(A1) == false)
    {
        posicion_motor_z = -267;
    }
    while (digitalRead(A2) == true)
    {
        motor2.step(1, BACKWARD, DOUBLE);
        delay(1);
    }
    if (digitalRead(A1) == false)
    {
        posicion_motor_a = 0;
    }
}

boolean read_ds1307()
{
    // Iniciar el intercambio de información con el DS1307 (0xD0)
    Wire.beginTransmission(0x68);

    // Escribir la dirección del segundero
    Wire.write(0x00);

    // Terminamos la escritura y verificamos si el DS1307 respondió
    // Si la escritura se llevó a cabo el método endTransmission retorna 0
    if(Wire.endTransmission() != 0){
        return 0;
    }
    // Si el DS1307 está presente, comenzar la lectura de 8 bytes
    Wire.requestFrom(0x68, 8);
}

```

```

    // Recibimos el byte del registro 0x00 y lo convertimos a binario
    segundos = bcd2bin(Wire.read());
    minutos = bcd2bin(Wire.read()); // Continuamos recibiendo cada uno de
los registros
    horas = bcd2bin(Wire.read());
    dia_semana = bcd2bin(Wire.read());
    dia = bcd2bin(Wire.read());
    mes_RTC = bcd2bin(Wire.read());
    anno = bcd2bin(Wire.read());
    // Recibir los datos del registro de control en la dirección 0x07
    //ctrl = Wire.read();
    return 1;
}

uint8_t bcd2bin(uint8_t bcd)
{
    // Convertir decenas y luego unidades a un número binario
    return (bcd / 16 * 10) + (bcd % 16);
}

float TLE() {

read_ds1307();
    float minutos_convertidos = minutos;
    float segundos_convertidos = segundos;
    minutos_convertidos = minutos*0.0166666;
    segundos_convertidos = segundos*0.0002777;
    return horas + minutos_convertidos + segundos_convertidos;
}

float calcular_altitud() {

    int zona_horaria[2] = { -3 , -4 };
    uint8_t mes[13] = { 0,0,31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334 };
    if ((anno %4)==0){ //Condición año bisiesto
        uint8_t mes[13] = { 0,0,31,60,91,121,152,182,213,244,274,305,335 };
    }

    int dia_actual = mes[mes_RTC] + dia;
    int longitud_s;

    if (dia_actual > 133 && dia_actual < 233)
    {
        longitud_s = 15 * zona_horaria[1];
    }
    else
    {
        longitud_s = 15 * zona_horaria[0];
    }

    b = (dia_actual - 81) * factor;
    ET = 9.87*sin(2 * b * factor3) - 7.58*cos(b * factor3) - 1.5*sin(b *
factor3);
}

```

```

dec = 23.45 * sin(factor2 * (284 + dia_actual) * factor3);

if (!TLE()) return 0;

TSA = TLE() + ((ET - 4 * (longitud_s - lon)) / 60;
h = 15 * (TSA - 12);
float altitud_calculada = sin(lat * factor3)*sin(dec * factor3);
altitud_calculada += cos(lat * factor3)*cos(dec * factor3)*cos(h *
factor3);
altitud_calculada = asin(altitud_calculada) * factor4;

return altitud_calculada;
}

float calcular_azimut(float a) {
z1 = cos(dec * factor3)*sin(h * factor3);
z2 = z1/cos(a * factor3);
z = asin(z2) * factor4;
if (cos(h * factor3) > (tan(dec * factor3) / tan(lat * factor3)))
{
return z;
}
if (TSA < 12)
{
z = abs(z);
z -= 180;
return z;
}
else
{
z = 180 - z;
return z;
}
}

void loop() {

while (!read_ds1307()){//lee el RTC , el código no continua si el RTC
no responde
Serial.println("EROR DE RTC??");
delay (1000);
}
float a = calcular_altitud();

float z = calcular_azimut(a);

float vector_solar[2] = { a, z };

Serial.println("Ecuación de tiempo");
Serial.println(ET,4);
Serial.println("Declinación");
Serial.println(dec,4);
Serial.println("TLE es");
Serial.println(TLE(),4);
Serial.println("TSA es");
Serial.println(TSA,4);
Serial.println("hora civil es");

```

```

Serial.println(h,4);

float a_t=(round(a/RT2)+altura_target)*0.5 ;           //Cálculo de la
bisectriz cenital

Serial.println("La bisectriz cenital es");
Serial.println(a_t);

float dif_a_t = floor(a_t) - posicion_motor_a;

    if (dif_a_t >= 0)                                     //Diferencia de altura
mayor a 0, motor 2 avanza
    {
        mover_motor_2(dif_a_t, true);
        posicion_motor_a += dif_a_t;
    }
    else                                                 //Diferencia de altura menor
a 0 motor 2 retrocede
    {
        if (round(a/RT2) > 0 ) {                       //Retrocede si altura
mayor 0
            mover_motor_2(abs(dif_a_t), false);
            posicion_motor_a -= abs(dif_a_t); }

        else {                                         //Volver motor 2 posición
inicial
            while (digitalRead(A2) == true && posicion_motor_a > 0)
//Volver si boton no está apretado y si posición motor 2 mayor a 0
            {
                motor2.step(1,BACKWARD, DOUBLE);
                delay(1);
            }
            if (digitalRead(A1) == false)
            {
                posicion_motor_a = 0;
            }
        }
    }

Serial.println("ALTITUD");
Serial.println(a,4);
Serial.println("Altitud (en pasos)");
Serial.println(a/RT2,4);
Serial.println("Altitud (redondeada en pasos)");
Serial.println(round(a/RT2));
Serial.println("Posición motor A");
Serial.println(posicion_motor_a);
Serial.println("dif_a_t = a_t - posicion_motor_a");
Serial.println(dif_a_t);

float z_t = (round(z/RT1) + azimut_target)*0.5;       //Bisectriz azimutal

Serial.println("Bisectriz azimutal z_t");
Serial.println(z_t);

```

```

    float dif_z_t = floor(z_t) - posicion_motor_z;    //Diferencia de
bisectriz azimutal con la posición del motor

    Serial.println(dif_z_t);

    if (dif_z_t >= 0 && a >= 0) //Diferencia de azimut mayor a 0 y altura
mayor a 0
    {
        if (posicion_motor_z < 267){    //Si posición es menor a 120°, motor
avanza
            mover_motor_1(dif_z_t, true);
            posicion_motor_z += dif_z_t; }
        else                            //Regresar a -120°
        {
            while (digitalRead(A1) == true && posicion_motor_z > -267)
//Volver si botón no está apretado y si posición motor 1 mayor a -120°
            {
                motor1.step(1, BACKWARD, DOUBLE);
                delay(1);
            }
            if (digitalRead(A1) == false)
            {
                posicion_motor_z = -267;
            }
        }

        Serial.println("ZENIT");
        Serial.println(z,4);
        Serial.println("ZENIT (en pasos)");
        Serial.println(z/RT1,4);
        Serial.println("ZENIT (redondeado en pasos)");
        Serial.println(round(z/RT1));

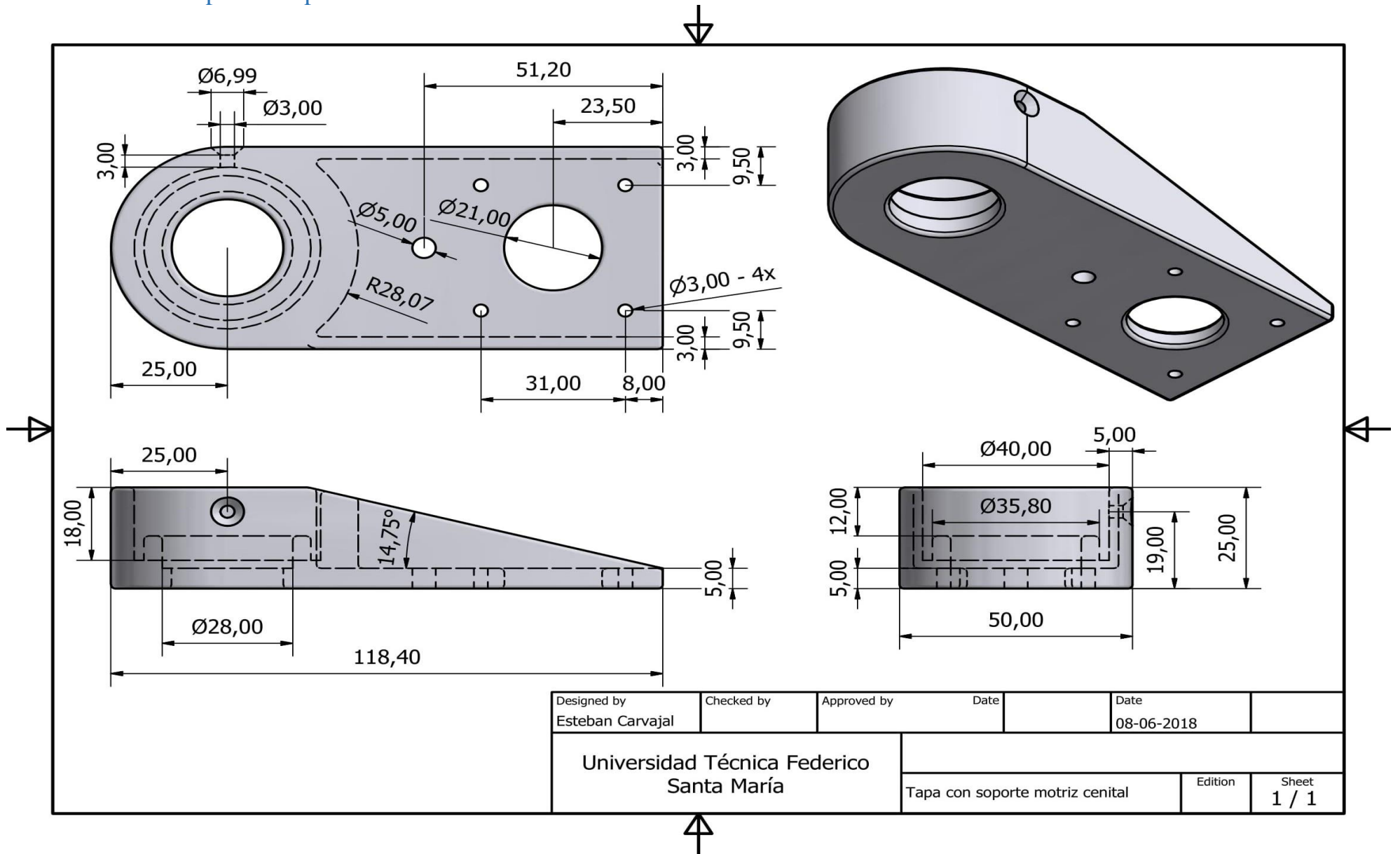
        Serial.println("dif_z_t = z_t - posición_motor_z");
        Serial.println(dif_z_t);
        Serial.println("posición motor Z");
        Serial.println(posicion_motor_z);
        for (int i = 0; i < 5; i++)
        {
            delay(60000);
        }
    }
}

```

## **8. Planos**

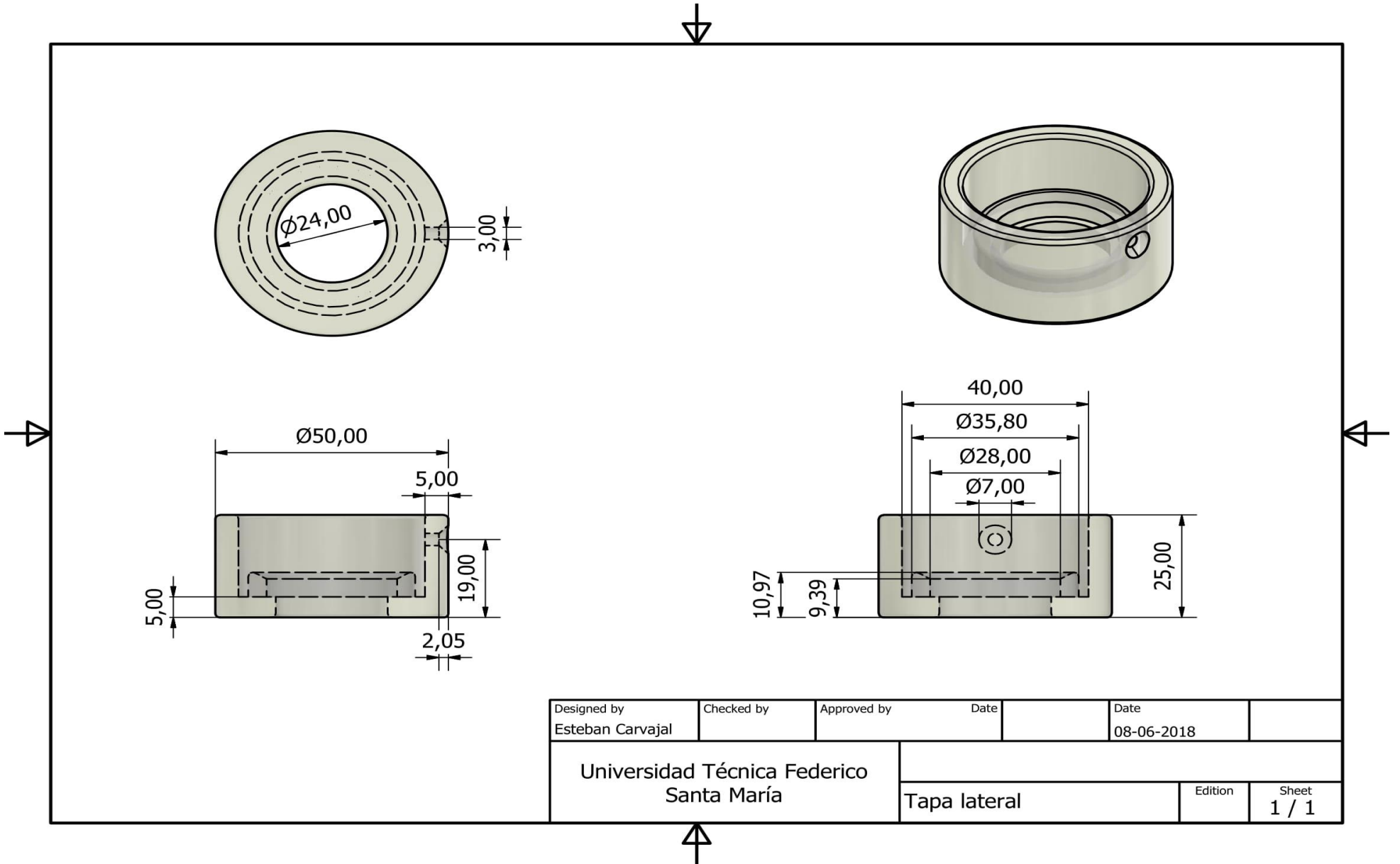
A continuación, se incluyen los planos de todas las piezas que fueron modeladas en Autodesk Inventor y fabricadas en impresora 3D con material PETG.

### 8.1 Tapa con soporte motriz cenital



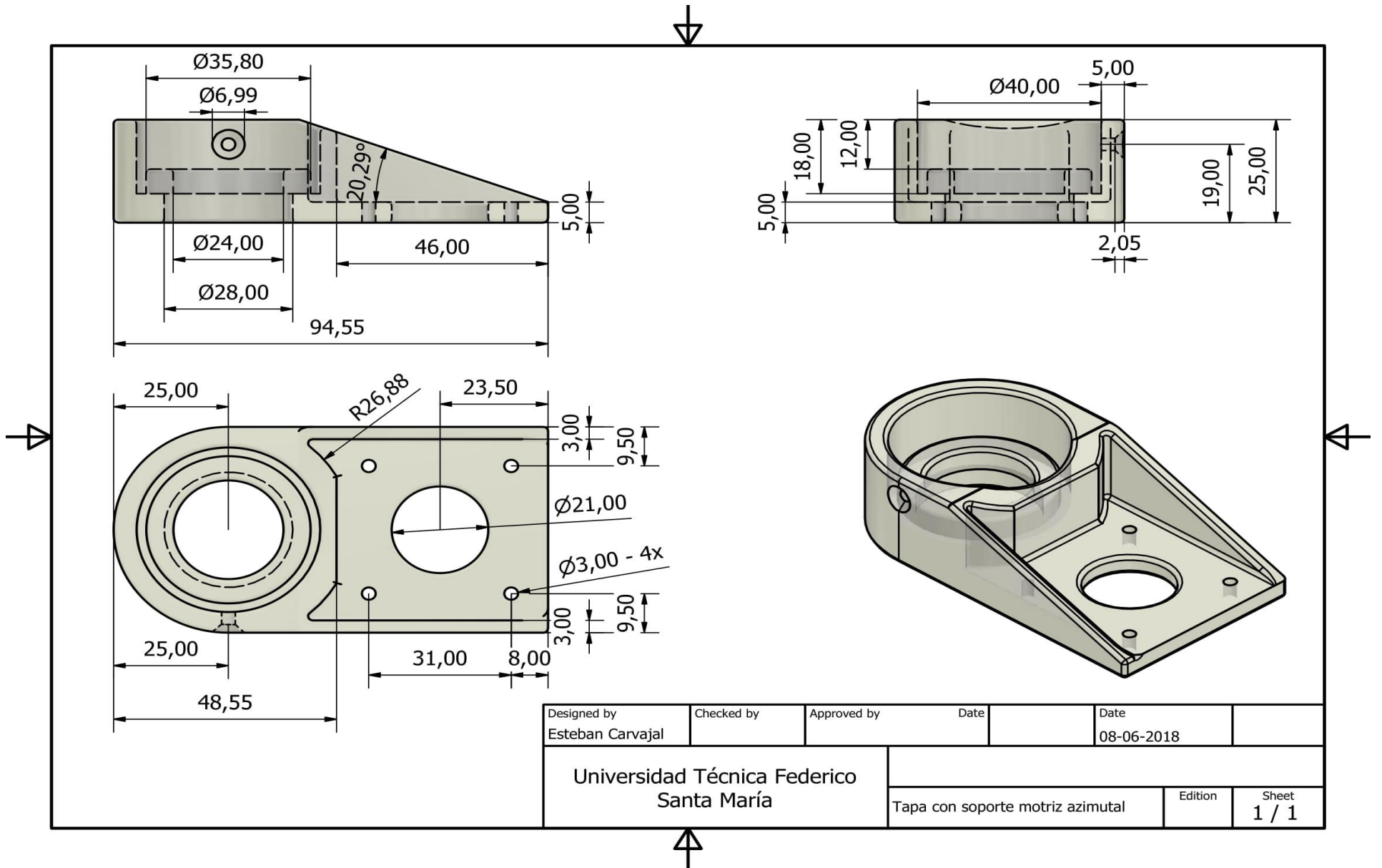
Designed by Esteban Carvajal	Checked by	Approved by	Date	Date 08-06-2018	
Universidad Técnica Federico Santa María			Tapa con soporte motriz cenital		Edition
					Sheet 1 / 1

## 8.2 Tapa lateral

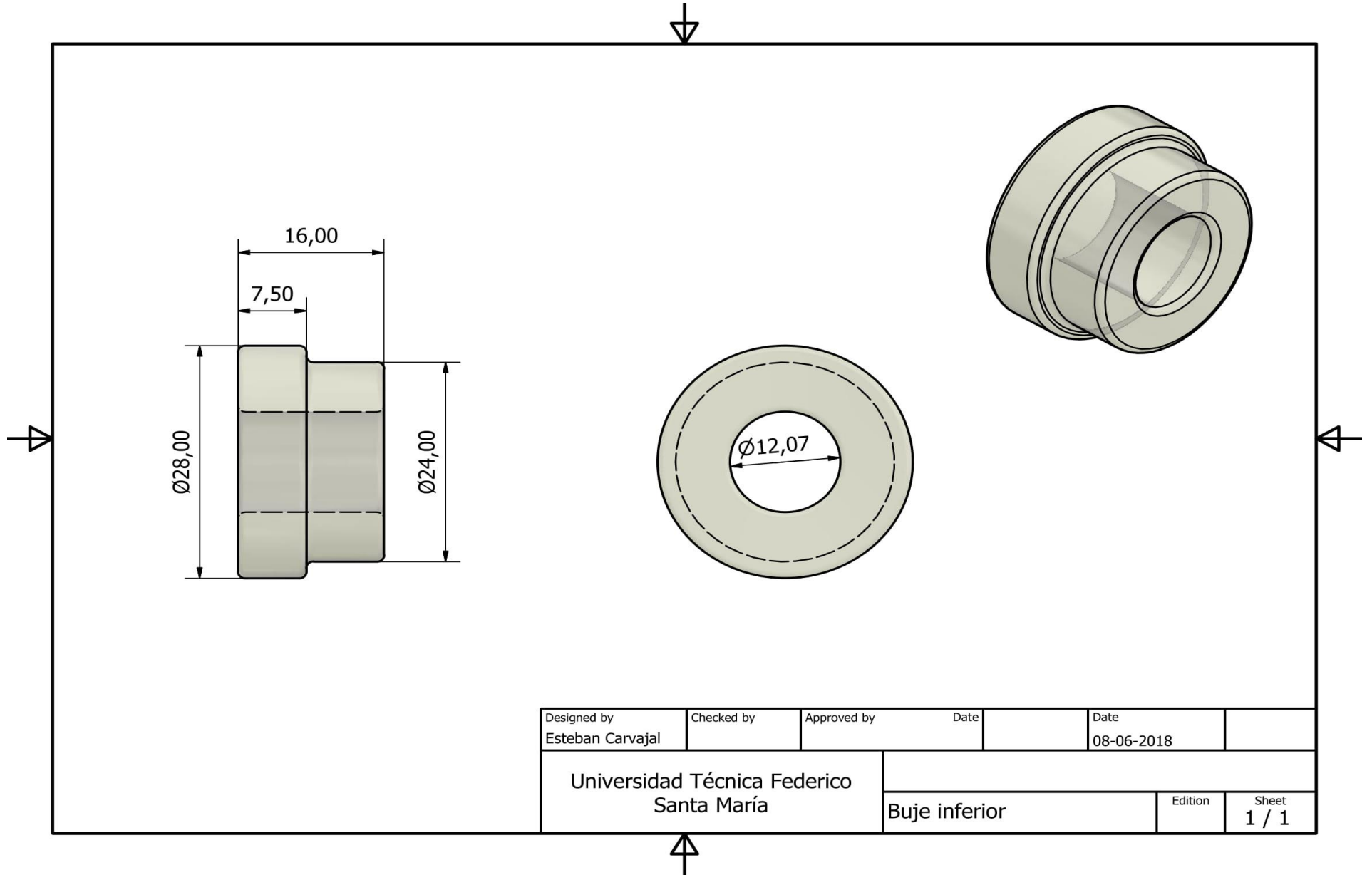


Designed by Esteban Carvajal	Checked by	Approved by	Date	Date 08-06-2018
Universidad Técnica Federico Santa María			Tapa lateral	
			Edition	Sheet 1 / 1

### 8.3 Tapa con soporte motriz azimuthal

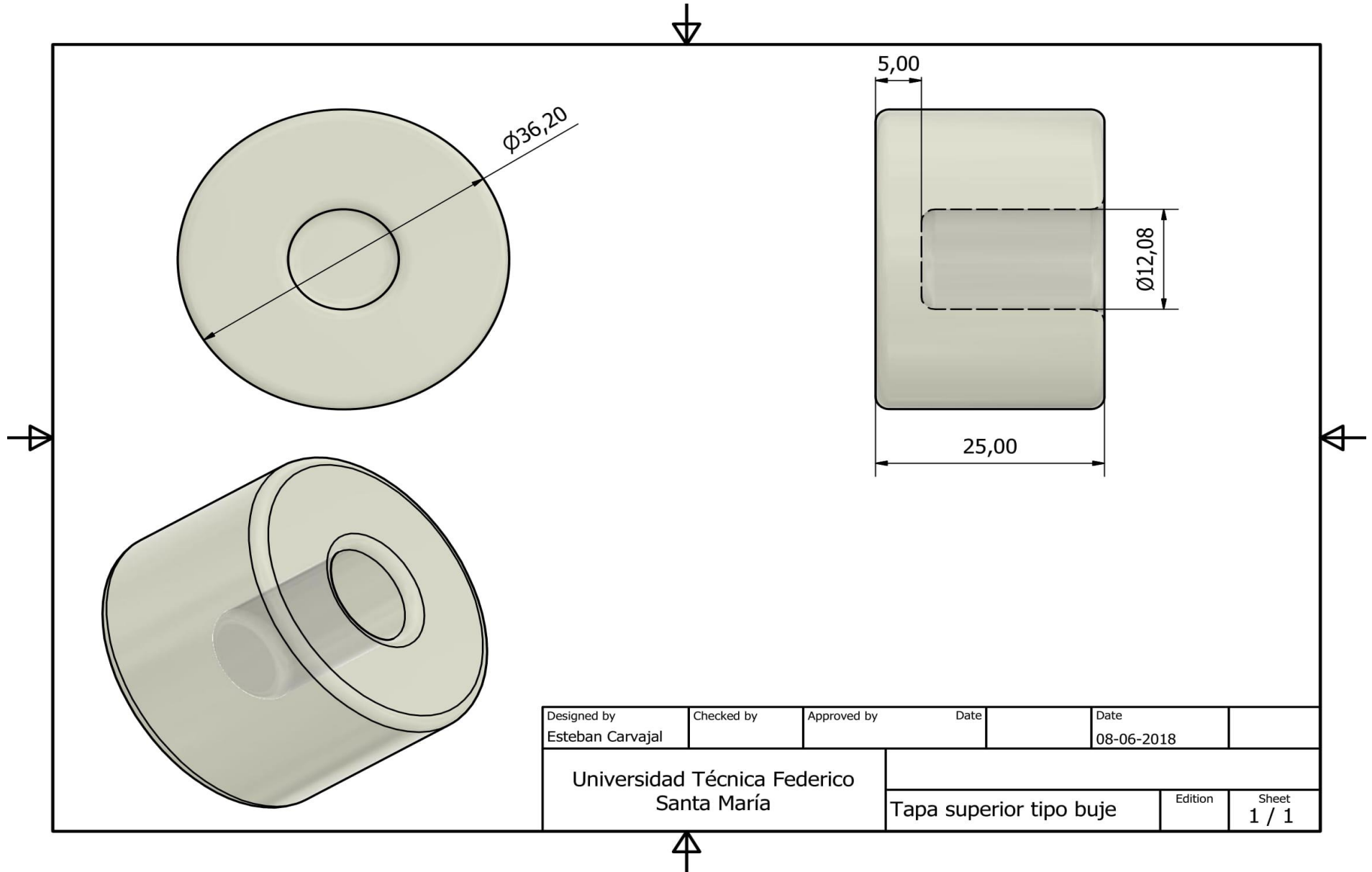


### 8.4 Buje inferior



Designed by Esteban Carvajal	Checked by	Approved by	Date	Date 08-06-2018	
Universidad Técnica Federico Santa María			Buje inferior		
			Edition	Sheet 1 / 1	

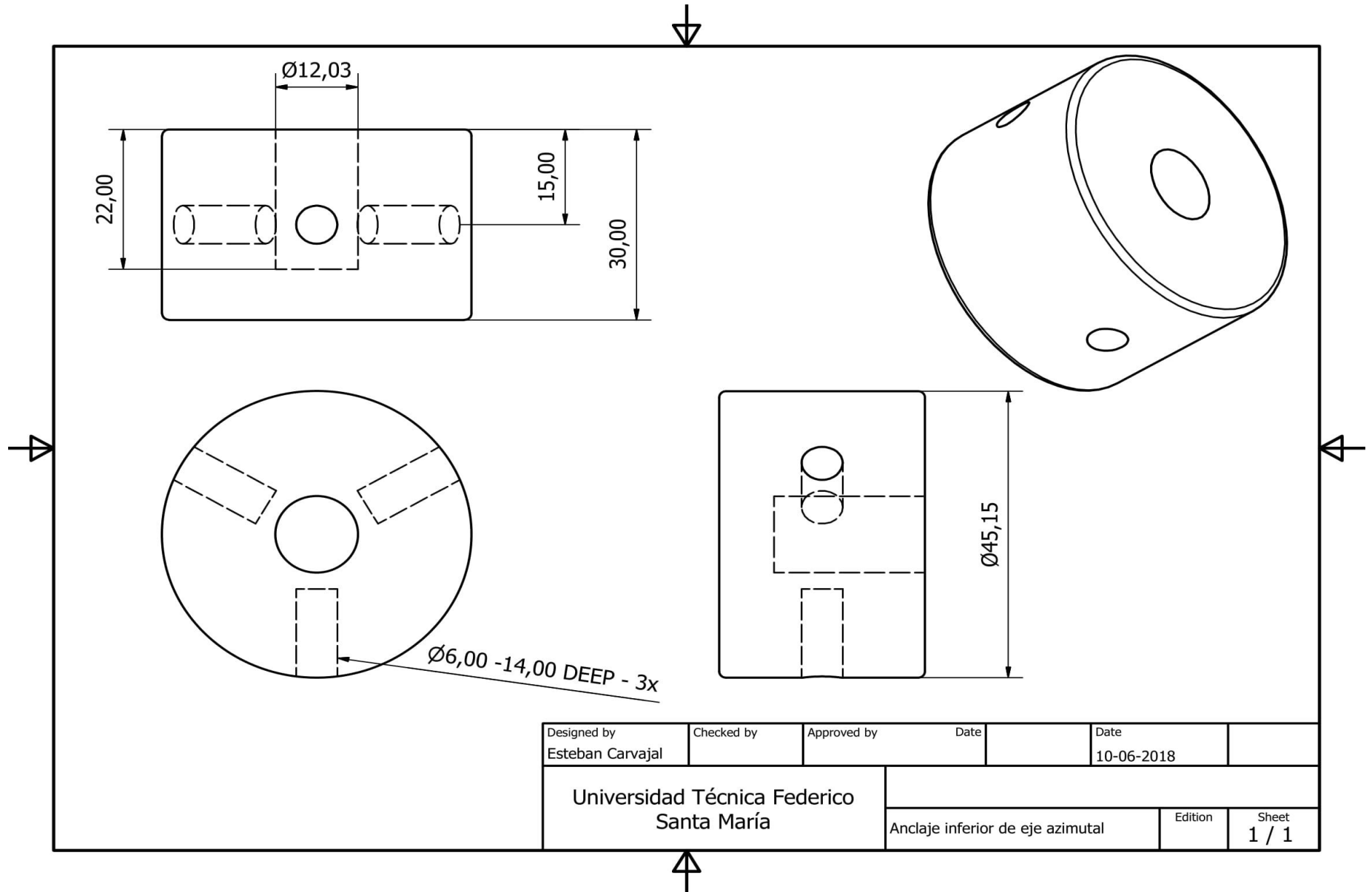
### 8.5 Tapa superior tipo buje



Designed by Esteban Carvajal	Checked by	Approved by	Date	Date 08-06-2018	
Universidad Técnica Federico Santa María			Tapa superior tipo buje		
			Edition	Sheet 1 / 1	



### 8.7 Anclaje inferior eje azimutal



Designed by Esteban Carvajal	Checked by	Approved by	Date	Date 10-06-2018	
Universidad Técnica Federico Santa María			Anclaje inferior de eje azimutal		Edition
					Sheet 1 / 1





