

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



“IMPLEMENTACIÓN DE UN CAMPO DE HELIOSTATOS CON SEGUIMIENTO SOLAR EN DOS EJES A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE LAZO ABIERTO”

ALONSO NICOLÁS FERNÁNDEZ CÁRCAMO

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

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. RODRIGO BARRAZA V.

JULIO – 2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, debo agradecer a mis padres María Angélica y Orlando, quienes estuvieron directamente presentes durante todo mi desarrollo universitario en conjunto de mis hermanas Josefa y Sofía. Fueron quienes me acompañaron en las etapas más difíciles y en donde más necesité palabras de aliento y motivación para seguir adelante. Definitivamente fueron siete años de trabajo y dedicación en donde logré sacar adelante mi carrera universitaria gracias a ellos, que a pesar de que muchas veces no tenían una mínima idea de cómo poder apoyarme académicamente siempre estuvieron dándome mucho cariño y apoyo.

Por otro lado, debo agradecer a cada profesor que formó parte de mi desarrollo universitario y por sobre todo con quienes pude formar lazos más importantes ya sea realizando diferentes ayudantías o simplemente en conversaciones de pasillo en donde siempre estuvieron pendientes para saber un poco más de uno. Dentro de ellos debo destacar al profesor Juan Pablo Castro con quién desarrollé diversas ayudantías y al profesor Mario Toledo, quien me ayudó a orientar y estabilizar el desarrollo de mi trabajo de título. Así también a los profesores Miguel Cubillos y Francisco Vargas del Laboratorio de Energías Renovables en donde se llevó a cabo gran parte de mi trabajo. Además, reconocer a Nicolás Ripoll y Esteban Arriagada con quienes mantuve contacto frecuente, aún en época de pandemia y cuarentena, donde Nicolás abrió las puertas de su propia casa para poder terminar mi trabajo.

Agradezco profundamente el apoyo incondicional a Valentina Cortés, quien siempre ha demostrado preocupación y cariño por mi bienestar y crecimiento personal, ayudando y aconsejando cada vez que lo necesito. A mis amigos, amigas y personas que conocí durante mi época universitaria tanto dentro como fuera de la universidad, aquellos que son realmente cercanos y con quienes compartí muchas experiencias dentro de todo ámbito. Con quienes aprendí a estudiar, madurar y crecer como persona, aquellas personas que conocí en diferentes oportunidades laborales mientras continuaban mis estudios y que ahora son realmente importantes en mi vida, les agradezco muchísimo su apoyo y lealtad que siempre han destacado.

Sin duda este es el término de una etapa muy importante en mi vida y que espero que sea el inicio de un próspero futuro personal y profesional. Realmente me faltarán páginas para agradecer a cada persona que recuerdo con mucho cariño dentro de todo este periodo, pero sé que en cada reencuentro ya sea con profesores, amigos y futuros colegas será realmente emocionante recordar esta época.

Estoy y estaré siempre agradecido de la bondad de todas las personas que formaron y me ayudaron a sacar mi carrera adelante, ya que este logro no es sólo mío, sino que también ellos fueron un pilar fundamental para lograrlo.

RESUMEN EJECUTIVO

La implementación de un campo de heliostatos con seguimiento solar en dos ejes busca, principalmente, la capacidad de alimentar con radiación solar directa un reactor termoquímico para obtener gas de síntesis a través de energía solar concentrada. Para comprender de mejor manera las tecnologías empleadas en el mundo con respecto a este tipo de energía solar se entrega un estudio y detalle sobre los sistemas más utilizados hoy en día, dentro de los cuales se evidencia el uso de heliostatos.

Inicialmente, para la construcción de los componentes estructurales principales de los heliostatos se plantea un diseño a través de Autodesk Inventor para la fabricación, implementación y puesta en marcha de los equipos. Luego se plantea la oportunidad de reestablecer el funcionamiento de un conjunto de heliostatos que formaron parte de un proyecto de energía solar para una empresa de galvanizado en la ciudad de Santiago, y que fueron entregados para llevar a cabo este trabajo. Tanto el diseño propuesto como los nuevos equipos en cuestión se basan en ecuaciones de cálculo de posicionamiento solar para realizar el seguimiento solar en dos ejes. Estas ecuaciones se rigen en función de la ubicación geográfica, hora local, latitud, longitud y día del año en el que se realizan las pruebas. Además, para lograr el redireccionamiento de la radiación solar incidente hacia un objetivo específico se establecen dos ecuaciones en base al principio óptico de reflexión, las cuales a partir de los ángulos de altitud solar y ángulo azimutal obtienen una descomposición vectorial que permite conseguir los ángulos de redireccionamiento solar hacia un objetivo.

Finalmente, se habilitan e implementan dos de los equipos entregados para conformar el campo de heliostatos. Para llevar a cabo esto, se aplica un proceso de estudio y análisis de sus partes y subconjuntos funcionales para generar nuevamente la puesta en marcha y realizar pruebas piloto de ambos heliostatos. También, se establece cuáles son los niveles de operación óptimos para sus motores paso a paso que son controlados mediante la plataforma de hardware de Arduino. Con esto, se obtienen los parámetros más importantes de funcionamiento estableciendo sus límites físicos y un adecuado código programable. En suma, se consigue poner a prueba en tres ocasiones distintas ambos equipos con láminas reflectantes y posicionándolos en dirección Norte. Se logran resultados satisfactorios y concluyentes con respecto a la veracidad y exactitud que posee un sistema de control de lazo abierto para realizar el seguimiento solar en dos ejes. En particular se logra reflejar la radiación incidente hacia un objetivo fijo por un periodo cercano a 3 horas durante el día solar, sin variaciones considerables en la imagen reflejada. Como trabajo futuro se deben desarrollar pruebas con los espejos reales que cada uno de los heliostatos tendrán implementados, donde se pueda verificar la potencia y capacidad de reflexión según sus características físicas.

ABSTRACT

The equipment of the camp of heliostats with solar tracking on two axes seeks, mainly, the ability to feed a thermochemical reactor with direct solar radiation to obtain gas synthesis through concentrated solar energy. To better understand the way these kinds of technologies used nowadays around the world related to this type of solar energy a study and detailed information is handed in about the systems currently in use, in which proof is given about the use of heliostats.

Initially, for the construction of the main structural components of the heliostats, a design is proposed through Autodesk Inventor for the manufacturing, implementing and commissioning of the equipment. Later on, the opportunity is obtained to re-establish the operation of a set of heliostats that were part of a solar energy project for a galvanizing company in the city of Santiago and that were delivered to carry out this work. Both, the proposed design and the new equipment are based on solar positioning calculation equations to perform solar tracking on two axes. These equations are governed by the geographic location, local time, latitude, longitude, and the days of the year in which the tests are performed. In addition, to achieve the redirection of incident solar radiation to a specific objective, two equations are established based on the principle of optical reflection, which obtain a vector decomposition from the angles of solar altitude and azimuth angle that allows the angles of solar redirection to the specific objective.

Finally, the decision is made to enable and implement two of the equipment delivered to make up the camp of heliostats. To carry out this work, a process of study and analysis of its functional parts and subsets is applied to generate the start-up again and carry out pilot tests of both heliostats. Also, it establishes step by step what are the optimal operating levels for the engines that are controlled by the Arduino hardware platform. With this, the most important operating parameters are obtained establishing their physical limits and an adequate programmable code for each of the heliostats. For short, it is possible to test both equipment on three different occasions with reflective sheets and positioning them in a northerly direction, achieving satisfactory and conclusive results with respect to the veracity and accuracy of an open-loop control system for solar tracking on two axes where it was possible to reflect the incident radiation towards a fixed target for a period of near to 3 hours during daylight without considerable variations in the reflected image. As future work, there are pending trials remaining with real mirrors, which each heliostats would be implemented with, where the potential and capacity of reflexion could be verified according to its physical characteristics.

GLOSARIO

ER	Energías renovables.
GEI	Gases de efecto invernadero.
CO₂	Dióxido de carbono.
CH₄	Metano.
NO₂	Dióxido de Nitrógeno.
HFC_s	Hidrofluorocarbonos.
PFC_s	Perfluorocarbonos.
SF₆	Hexafluoruro de Azufre.
H₂	Dihidrógeno.
CO	Monóxido de carbono.
SYNGAS	Gas de síntesis.
<i>l</i>	Constante de radiación solar.
PV	<i>Photovoltaics</i> , paneles fotovoltaicos.
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i> , Energía solar concentrada.
PDC	<i>Parabolic Dish Collector</i> , Plato parabólico solar.
SPT	<i>Solar Power Tower</i> , Torre de energía solar.
PTC	<i>Parabolic Trough Collector</i> , Colector cilíndrico parabólico.
LFR	<i>Lineal Fresnel Reflector</i> , Colector Lineal Fresnel.
φ	Latitud.
λ	Longitud.
ET	Ecuación de tiempo.
LSTM	<i>Local Solar Time Meridian</i> , Tiempo solar medio.
TC	<i>Time Correction</i> , Factor de corrección de tiempo.
LST	<i>Local Solar Time</i> , Tiempo solar aparente.
<i>h</i>	Hora solar.
δ	Declinación solar.
α	Ángulo de elevación solar.
Φ	Ángulo de cenit.
<i>z</i>	Ángulo azimutal.
α_{st}	Bisectriz azimutal.
z_{st}	Bisectriz cenital.
i_1, i_2, i_3	Relaciones de transmisión 1, 2 y 3.
PETG	Polietileno tereftalato glicol, material utilizado para impresiones 3D.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN EJECUTIVO	ii
ABSTRACT	iv
GLOSARIO	v
ÍNDICE	vi
INDICE DE IMÁGENES	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
OBJETIVOS	xix
1. Objetivos generales	xix
2. Objetivos específicos	xix
INTRODUCCIÓN	xx
DESARROLLO DEL TEMA	1
I) MARCO TEÓRICO	1
1. Energía solar.....	2
1.1. Radiación directa.....	4
1.2. Radiación difusa.....	4
1.3. Radiación reflejada.....	5
2. Energía solar fotovoltaica (PV).....	5
3. Energía solar térmica.....	6
3.1. Colectores térmicos o no concentradores.....	6
3.2. Colector concentrador	7
3.2.A.- Plato parabólico solar (PDC).....	7
3.2.B.- Torre de energía solar (SPT)	8
3.2.C.- Colector cilíndrico parabólico (PTC)	10
3.2.D.- Colector lineal fresnel (LFR)	11
4. Seguimiento solar y sus parámetros.....	11
4.1. Localización geográfica	12
4.1.A.- Latitud (φ).....	14

4.1.B.- Longitud (λ)	15
4.2. Ecuación de tiempo (ET o EoT).....	16
4.3. Tiempo solar medio ($LSTM$)	17
4.4. Factor de corrección de tiempo (TC)	18
4.5. Tiempo solar local o aparente (LST)	18
4.6. Hora solar o ángulo horario (h)	19
4.7. Coordenadas solares.....	19
4.7.A.- Declinación solar (δ).....	19
4.7.B.- Ángulo de elevación (α).....	20
4.7.C.- Zenit (Φ).....	21
4.7.D.- Azimut solar o ángulo azimutal (z)	22
II) ESTADO DEL ARTE: HELIOSTATOS	24
1. Principio de funcionamiento	24
2. Componentes y subconjuntos característicos.....	25
2.1. Espejos reflectantes	26
2.2. Estructura de soporte del espejo.....	27
2.2.A.- Ensamblaje del espejo con marcos de acero	27
2.2.B.- Panel tipo sandwich.....	28
2.2.C.- Espejos estampados	29
2.3. Pedestal y cimientos.....	29
2.4. Sensores y control de posición.....	30
2.4.A.- Lazo abierto (Open Loop)	31
2.4.B.- Lazo cerrado (Close Loop).....	31
2.4.C.- Calibración	32
2.5. Sistema mecánico.....	33
3. Efectos ambientales para considerar	34
4. Primer prototipo de heliostato construido	36
4.1. Espejo reflectante	36
4.2. Soporte estructural	37
4.3. Sistema mecánico.....	39
4.4. Sistema de seguimiento y control	39

4.5. Montaje completo del primer prototipo fabricado	39
III) PRIMER PROTOTIPO PARA IMPLEMENTAR	41
1. Panel reflector y soporte estructural.....	42
2. Pedestal y cimientos.....	44
2.1. Sección móvil.....	44
2.2. Sección fija o pedestal base.....	49
3. Sistema mecánico.....	50
4. Sistema de control y posición	53
4.1. Principio óptico de funcionamiento aplicado a los equipos.....	55
4.1.A.- Reflexión de radiación cenital.....	56
4.1.B.- Reflexión de radiación azimutal	57
5. Cálculo de fuerzas que soporta el equipo.....	59
IV) SEGUNDO PROTOTIPO PARA IMPLEMENTAR	61
1. Primer heliostato en implementación.....	63
1.1. Panel reflector y soporte estructural.....	64
1.2. Pedestal y cimientos.....	65
1.2.A.- Sección móvil.....	65
1.2.B.- Sección fija o pedestal base.....	68
1.3. Sistema mecánico.....	69
1.4. Sistema de control y posición	73
1.5. Cálculo de fuerzas que soporta el equipo.....	73
2. Segundo heliostato a implementación.....	75
2.1. Panel reflector y soporte estructural.....	75
2.2. Pedestal y cimientos.....	76
2.2.A.- Sección Móvil	76
2.2.B.- Sección Fija	77
2.3. Sistema mecánico.....	78
2.4. Sistema de control y posición	80
2.5. Cálculo de fuerzas que soporta el equipo.....	80
V) PUESTA EN MARCHA Y ANÁLISIS DE SISTEMAS	83
1. Puesta en marcha del primer heliostato.....	83

2.	Puesta en marcha del segundo heliostato	91
3.	Implementación de Arduino IDE	96
VI)	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES	105
1.	Resultados primer día de pruebas	105
2.	Resultados segundo día de pruebas	108
2.1.	Primera ubicación.....	109
2.2.	Segunda Ubicación.....	110
2.3.	Tercera Ubicación	112
3.	Resultados tercer día de pruebas	113
4.	Consideraciones generales	115
	CONCLUSIONES	117
	REFERENCIAS	119
	ANEXOS	121
1.	Código programado para primer heliostato implementado.....	121
2.	Código programado para segundo heliostato implementado	129
3.	Planos de primero prototipo propuesto	137
3.1.	Soporte rodamiento cenital	137
3.2.	Soporte trasero stepper azimuth	138
3.3.	Soporte fijación de rueda dentada cenit	139
3.4.	Soporte/Guía lateral	140
3.5.	Soporte frontal stepper azimuth	141
3.6.	Soporte de fijación stepper cenit	142
3.7.	Copla de rodamiento para rueda dentada azimuth	143
3.8.	Copla de rodamiento azimuth	144
3.9.	Placa base de sistema azimuthal	145
3.10.	Placa base de sistema cenital	146
3.11.	Espaciador	147
3.12.	Cabezal PVC	148
3.13.	Soporte interior PVC	149
4.	Planos de conjunto para ensamblaje de motor stepper del primer heliostato implementado.....	150

4.1.	Fusible mecánico.....	150
4.2.	Soporte caja reductora.....	151
4.3.	Soporte de motor Stepper.....	2

INDICE DE IMÁGENES

Figura 1: Variación porcentual de la participación energética mediante ER. Fuente: ACERA	xx
Figura 2: Capacidad Energética Instalada a septiembre de 2019 en Chile. Fuente: ACERA.	xxi
Figura 3: Impactos globales y locales de la producción y distribución de energía eléctrica.	1
Figura 4: Distribución de radiación solar en la superficie terrestre.	2
Figura 5: Espectro electromagnético de la radiación térmica, identificando rango Infrarrojo, Visible y Ultravioleta.	3
Figura 6: Energía radiante dentro y fuera de la superficie terrestre.....	4
Figura 7: Tipos de radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.....	5
Figura 8: Esquema explicativo de un PDC.	7
Figura 9: Planta de concentración solar (PDC) en Utah, Estados Unidos.	8
Figura 10: Esquema explicativo de SPT.	9
Figura 11: Planta SP-10 de 10 MW en Sevilla, España.	9
Figura 12: Esquema explicativo de PTC.....	10
Figura 13: Planta AS-1, España.	10
Figura 14: Esquema explicativo de LFR y Planta LFR de 1,4 MW, España.....	11
Figura 15: Trayectoria aparente del Sol en el cielo del hemisferio sur.....	12
Figura 16: Paralelos del globo terrestre.	13
Figura 17: Meridianos del globo terrestre.	13
Figura 18: Latitud terrestre, positiva hacia el norte y negativa hacia el sur.....	14
Figura 19: Ejemplo de latitud de un punto P.....	14
Figura 20: Longitud terrestre, positiva hacia el Este y negativa al Oeste.	15
Figura 21: Ejemplo de longitud “b” de un punto P.....	15
Figura 22: Huso horario.	16
Figura 23: Ecuación de tiempo según días del año.	17
Figura 24: Esquema declinación solar según equinoccios y solsticios para el hemisferio norte.....	20
Figura 25: Esquema explicativo para obtener el Zenit (Φ).	22
Figura 26: Esquema explicativo de una referencia para la variación del ángulo azimutal.	23
Figura 27: Principio de reflexión de la luz.	25
Figura 28: Vigas de acero unidas para estructura de heliostato.	27
Figura 29: Conexión de vidrio espejado y estructura de acero mediante pasadores flexibles.	28
Figura 30: Esquema explicativo de panel tipo sándwich.	28
Figura 31: Heliostato con panel tipo sándwich en construcción.	29

Figura 32: Vidrio espejado unido con adhesivo directamente a la estructura.....	29
Figura 33: Cimientos de hormigón para heliostatos.	30
Figura 34: Esquema explicativo para unión de más de un heliostato mediante tubos de acero.	30
Figura 35: Esquema explicativo de principio de sistema de Lazo Cerrado.	32
Figura 36: Representación de la calibración de un heliostato.....	32
Figura 37 : Central ASUP 140, Abengoa. Heliostatos con accionamiento hidráulico.	33
Figura 38: Esquema de heliostato con accionamiento lineal en ambos ejes.....	34
Figura 39: Daño en superficies. a) Zona desértica, b) Zona Oceánica, c) Estudio de laboratorio.	35
Figura 40: Espejo reflectante del primer prototipo.	37
Figura 41: Diseño 3D de estructura móvil superior del primer prototipo.....	37
Figura 42: Diseño 3D en corte de estructura móvil superior del primer prototipo.	38
Figura 43: Diseño 3D del ensamblaje de la estructura superior móvil a pedestal base del primer prototipo.....	38
Figura 44: Ensamblaje de sistema motriz del primer prototipo.	39
Figura 45: Estructura móvil superior del primero prototipo ensamblada en conjunto del sistema mecánico y sistema de seguimiento.	40
Figura 46: Ensamblaje total del primer prototipo, previo a la puesta en marcha.....	40
Figura 47: Disposición general de funcionamiento.	41
Figura 48: Soporte de aluminio tipo T para fijación de panel reflectante.....	42
Figura 49: Acople entre ejes para sujeción de rueda dentada del sistema motriz cenital.	42
Figura 50: Representación 3D de soporte estructural de panel reflector.	43
Figura 51: Representación 3D del beneficio que genera utilizar un espaciador para no limitar el rango de movimiento cenital.	43
Figura 52: Representación 3D de soporte para sujetar rodamiento a estructura (verde) y soporte original con el que viene el rodamiento (negro).....	45
Figura 53: Representación 3D de ensamblaje entre sistema rodamiento-estructura...	46
Figura 54: Representación 3D de ensamblaje piezas guía para rodamientos que permiten la sujeción cenital.....	46
Figura 55: Representación 3D de ensamblaje piezas que sujetan el sistema motriz cenital, ambas se destacan con color naranja.	47
Figura 56: Representación 3D de ensamblaje subsistema que genera el movimiento azimutal del heliostato.....	47
Figura 57: Representación 3D de ensamblaje de eje y rodamiento inferior para generar movimiento aimutal.	48
Figura 58: Representación 3D de placa media descrita.	48
Figura 59: Representación 3D de pedestal base.....	49

Figura 60: Representación 3D de piezas de soporte para ensamblaje de heliostato a su estructura pedestal. En rojo se presenta la guía y en gris el descanso del eje.	50
Figura 61: Referencia de un motor paso a paso nema 17.	51
Figura 62: Sistema de transmisión sinfín-corona.	51
Figura 63: Controlador “Arduino UNO”.	53
Figura 64: Esquema de conexión e imagen referencial de RTC.	54
Figura 65: Esquema de conexión de Motor Shield y dos motores stepper.	54
Figura 66: Interruptor final de carrera.	55
Figura 67: Esquema de conexión de Breadboard y Arduino.	55
Figura 68: Esquema para obtener bisectriz cenital αst . a) Caso en que el sol se encuentra debajo del objetivo, b) Caso en que el sol se encuentra sobre el objetivo..	56
Figura 69: Esquema para obtener bisectriz azimutal.	58
Figura 70: Daños de corrosión y fatiga estructural de heliostatos, equipo indisponible.	62
Figura 71: Heliostato con cuatro espejos reflectantes con fenómeno de pandeo.	62
Figura 72: Husillo y eje central de heliostato descrito.	63
Figura 73: Estado inicial de heliostato.	63
Figura 74: Cinta adhesiva doble contacto que permite adherencia entre cuadro de acero y espejo reflectante.	64
Figura 75: Primera parte de soporte estructural de espejo reflectante.	64
Figura 76: Segunda parte de soporte estructural de espejo reflectante.	65
Figura 77: Presentación de sección móvil del heliostato. A la izquierda se evidencia sistema cenital y a la derecha sistema azimutal.	66
Figura 78: Identificación de ejes mencionados en estructura de movimiento cenital.	67
Figura 79: Sistema estructural que mantiene estable todo el mecanismo de movimiento cenital.	67
Figura 80: Sistema de ensamblaje entre eje 4.	68
Figura 81: Identificación de ejes mencionados en estructura de movimiento azimutal.	68
Figura 82: Subsistema de cimientos de heliostato.	69
Figura 83: Motor paso a paso nema 23. Imagen corresponde a un motor defectuoso que se extrajo del heliostato de trabajo.	69
Figura 84: Cableado de salida stepper nema 23.	70
Figura 85: Diagrama de conexión del controlador (HSS57) y cableado del motor.	71
Figura 86: Motor paso a paso ensamblado a caja reductora mediante piezas impresas en impresora 3D.	71
Figura 87: Sistema de transmisión para ejes cenital (izquierda) y azimutal (derecha).	72
Figura 88: Referencia para cálculo de fuerzas. Izquierda: Cenital. Derecha: Azimutal.	74
Figura 89: Soporte estructural inicial del panel reflector.	75

Figura 90: Sección móvil. A la izquierda se observa la estructura cenital y a la derecha el cabezal móvil azimutal.....	76
Figura 91: Sistemas de ensamblaje para sección móvil cenital y azimutal.....	77
Figura 92: Sistema de cimientos de heliostato.....	77
Figura 93: Sistema motriz idéntico para cada uno de los ejes de movimiento.	78
Figura 94: Diagrama de conexión del controlador TB6600 y motor paso a paso.....	79
Figura 95: Curva de torque para motor Nema 17 con caja reductora con rodamientos planetarios.	81
Figura 96: Puntos en donde las fuerzas aplicadas son más críticas para la operación del heliostato.	82
Figura 97: Antes y después de mantenimiento a sistema de transmisión del heliostato.	84
Figura 98: Camisa y chaveta que se extrajeron de los motores y caja reductora.....	84
Figura 99: Piezas diseñadas en 3D para ensamblaje de motor Nema 23 y caja reductora.	85
Figura 100: Montaje de piezas fabricadas en impresora 3D para ensamblaje de motor paso a paso y caja reductora.....	86
Figura 101: Espaciador de eje central que genera inestabilidad en el equipo.....	86
Figura 102: Problema en tensión de sistema de transmisión de eje de movimiento cenital.	87
Figura 103: Posición máxima de inclinación para el eje cenital del heliostato.	87
Figura 104: Posición de absoluto colapso del heliostato en su sistema de movimiento cenital.	88
Figura 105: Posición máximo de movimiento para el eje azimutal del heliostato.	89
Figura 106: Dispositivos de final de carrera dispuestos en sistema de movimiento azimutal.	89
Figura 107: Gráfica de ecuación de la recta cenital para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (1° Heliostato).	90
Figura 108: Gráfica de ecuación de la recta azimutal para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (1° Heliostato).	90
Figura 109: Estado inicial de los sistemas motrices.....	92
Figura 110: Estado inicial y reparación de rodamientos de bolas de husillos motrices.	92
Figura 111: Ensamblaje de ambos sistemas motrices a heliostato. Izquierda, sistema cenital. Derecha, sistema azimutal.	93
Figura 112: Máximos movimientos de sistema azimutal.....	93
Figura 113: Límite inferior de altitud cenital para segundo heliostato.	94
Figura 114: Dispositivos de final de carrera instalados.	95
Figura 115: Gráfica de ecuación de la recta cenital para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (2° Heliostato).	95

Figura 116: Gráfica de ecuación de la recta azimutal para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (2° Heliostato).	96
Figura 117: Diagrama de estados para autómata finito.....	100
Figura 118: Diagrama de conexión a microcontrolador Arduino UNO.	104
Figura 119: Heliostatos con lámina adhesiva reflectante.....	106
Figura 120: Comienzo de pruebas de primer heliostato, post proceso de calibración. Hora: 11:30 aproximadamente.....	106
Figura 121: Continuación de pruebas, primer heliostato.	107
Figura 122: Continuación de pruebas, primer heliostato. Mediodía solar aproximadamente.	107
Figura 123: Continuación de pruebas, primer heliostato. Post mediodía solar.....	107
Figura 124: Fin de pruebas, primer heliostato. Hora: 14:30 aproximadamente.....	108
Figura 125: Comienzo de segunda prueba para primer heliostato antes de calibrar equipo.....	109
Figura 126: Segunda prueba para primer heliostato una vez puesto en marcha.	110
Figura 127: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la izquierda.	111
Figura 128: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la izquierda.	111
Figura 129: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la derecha.	112
Figura 130: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la derecha.	112
Figura 131: Disposición de ambos heliostatos operando, tercer día de pruebas.....	113
Figura 132: Tercer día de pruebas. Ambos heliostatos en funcionamiento.	114
Figura 133: Tercer día de pruebas. Continuación del funcionamiento de ambos equipos.	114
Figura 134: Tercer día de pruebas. Ambos heliostatos funcionando con cambio de posición para recibir radiación solar.	115

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Constante solar de radiación solar.....	3
Ecuación 2: Ecuación de tiempo (EoT)	16
Ecuación 3: Parámetro B en grados, n corresponde al número del día del año	16
Ecuación 4: Tiempo solar medio (LSTM).	18
Ecuación 5: Factor de corrección (TC).	18
Ecuación 6: Tiempo solar local o aparente (LST).	18
Ecuación 7: Hora solar (h).	19
Ecuación 8: Declinación sola (δ), con n representando el día del año en el que se realiza la medición.	20
Ecuación 9: Altitud solar máxima en el hemisferio norte.....	21
Ecuación 10: Altitud solar máxima en el hemisferio sur	21
Ecuación 11: Expresión de altitud o zenit en función de latitud, declinación y hora solares.....	22
Ecuación 12: Altitud solar en grados.	22
Ecuación 13: Azimut solar en grados.	23
Ecuación 14: Potencia neta para ejemplo de un campo de heliostatos de 4 [m ²].	41
Ecuación 15: Relación de transmisión 1, tornillo sinfín y corona.	52
Ecuación 16: Resolución stepper nema 17.....	52
Ecuación 17: ast para caso a)	57
Ecuación 18: ast para caso b)	57
Ecuación 19: ast para caso en que heliostato se direcciona hacia el Sur.	57
Ecuación 20: zst , bisectriz azimutal.....	58
Ecuación 21: zst , bisectriz azimutal para los casos en que el objetivo se encuentre desviado hacia la derecha o izquierda del heliostato y el Sol se encuentre con un ángulo $z > zst$	58
Ecuación 22: zst , bisectriz azimutal para los casos en que el objetivo se encuentre desviado hacia la derecha o izquierda del heliostato y el Sol se encuentre con un ángulo opuesto a ztarget con respecto de la vertical.....	58
Ecuación 23: Par de torsión máximo que pueden ejercer los motores (Nema 17).	59
Ecuación 24: Balance de momento para obtener carga azimutal a soportar.....	60
Ecuación 25: Resolución de stepper Nema 23.....	70
Ecuación 26: Relación de transmisión 2, tornillo sinfín y corona.	72
Ecuación 27: Par de torsión máximo que pueden ejercer los motores (Nema 23).	73
Ecuación 28: Balance de momento para obtener carga cenital que puede soportar. ..	74
Ecuación 29: Balance de momento para obtener carga azimutal que puede soportar.74	
Ecuación 30: Relación de transmisión 3, motor stepper-reductora.....	79
Ecuación 31: Resolución final de movimiento para husillo conectado a motor stepper Nema 17 con caja reductora de 1:100.	80

Ecuación 32: Balance de momento para obtener carga cenital que puede soportar. ..82
Ecuación 33: Balance de momento para obtener carga azimutal que puede soportar.82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cálculo de n según mes y condición de año	17
Tabla 2: Componentes, funciones y porcentaje de costos de un heliostato	26
Tabla 3: Listado de piezas para construcción de panel reflector y su soporte estructural.	44
Tabla 4: Listado de piezas para construcción de estructura que permite movimiento del heliostato	49
Tabla 5: Listado de piezas para pedestal base del heliostato	50
Tabla 6: Listado de piezas para sistema mecánico.....	52
Tabla 7: Conjunto de variables definidas para ejecutar los estados y transiciones de la máquina de estados.	100
Tabla 8: Paso a paso generalizado de cada función que debe ejecutar el programa del microcontrolador Arduino UNO.	101

OBJETIVOS

1. Objetivos generales

En el marco del proyecto FONDAP SERC se encuentra en desarrollo la implementación de un campo de concentración solar para la investigación de procesos termoquímicos solares. En este contexto, el objetivo general de este trabajo es diseñar e implementar un campo de heliostatos, con seguimiento solar en dos ejes a través de un sistema de lazo abierto, con capacidad de redirigir la radiación solar incidente a un concentrador parabólico tipo “cassegrain”. Los objetivos específicos son:

2. Objetivos específicos

1. Definir el Estado del Arte de la aplicación de los heliostatos y sus componentes de control en la industria de la energía solar concentrada actual.
2. Implementar un campo de heliostato en base a los requerimientos exigidos para cumplir los objetivos del proyecto.
3. Puesta en marcha de los elementos necesarios para la operación del campo de heliostatos.
4. Analizar los resultados del funcionamiento del campo de heliostatos y su desempeño.

INTRODUCCIÓN

Un sistema de Energía Renovable (ER) comprende la generación de energía a través de recursos que no provengan de los combustibles fósiles como lo son el petróleo, gas natural, gas licuado de petróleo y carbón. La producción y distribución de Energía Eléctrica genera un gran impacto de alcance local y con escalamiento global al entorno y medio ambiente en que se desarrolla la humanidad. Uno de los efectos negativos, y de gran preocupación, dentro del uso de combustibles fósiles para la obtención de energía es la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI)¹, tales como CO_2 , CH_4 , NO_2 , HFC_s , PFC_s , SF_6 .

Los sistemas de ER, a diciembre de 2018, en Chile abarcan entre el 18%-20% de la producción energética del país, como se puede observar en la Figura 1. Dicha cifra es totalmente favorable para lograr los objetivos planteados para el año 2025, en donde se requiere como mínimo un aporte efectivo del 20% de la producción energética del país provenga de ER. A pesar de que estos porcentajes han ido en aumento año a año, no significa que haya sido fácil, se ha invertido mucho dinero en estudios y nuevas tecnologías para distintos tipos de proyectos, de los cuales, siempre existen algunos que aún están en proceso de admisión a calificación.

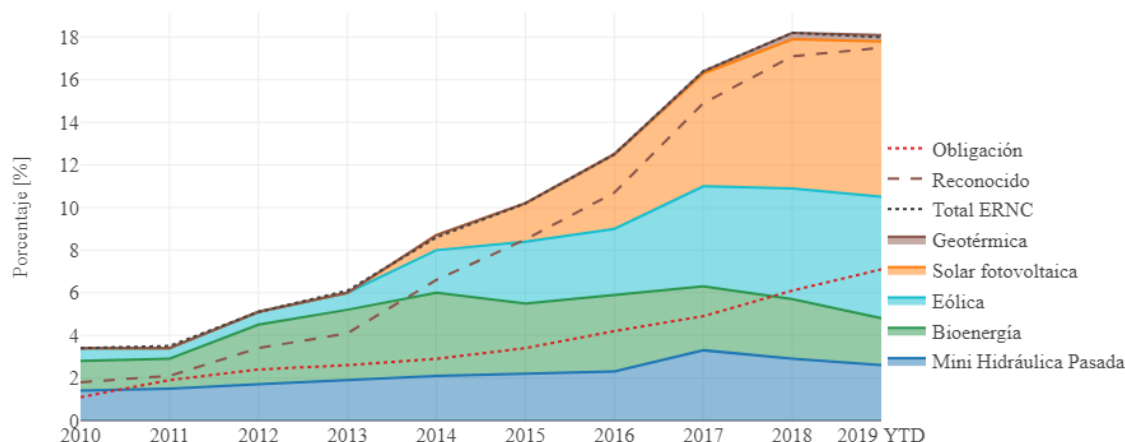


Figura 1: Variación porcentual de la participación energética mediante ER. Fuente: ACERA

A la fecha de septiembre de 2019, en Chile existe una capacidad instalada de ERNC de 5.659 [MW]² de los cuales 2.659 [MW] provienen de tecnología solar fotovoltaica y

¹ Iberdrola, 'Efectos Ambientales de La Producción Y Distribución de Energía Eléctrica : Acciones Para Su Control y Corrección', Iberdrola, 2013.

² Sector D E Generaci, D E Energ, and Ctrica Renovable Agosto, 'Sector de Generación de Energía Eléctrica Renovable Agosto 2019', 2019.

sitúa un 10,6% de la potencia neta. En la Figura 2 se puede evidenciar la capacidad energética instalada total en Chile.

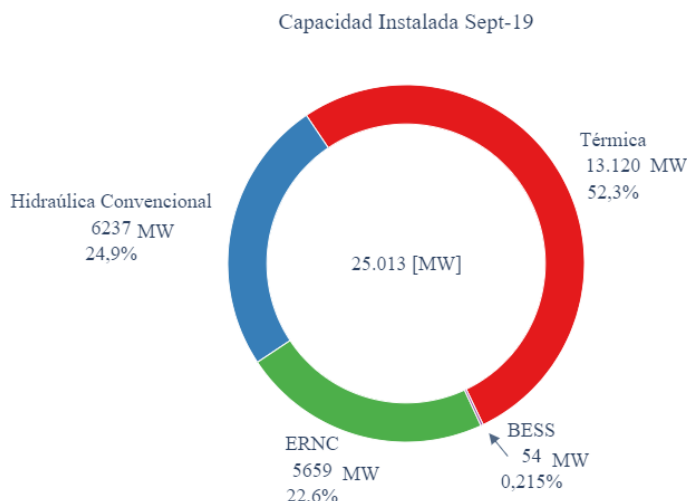


Figura 2: Capacidad Energética Instalada a septiembre de 2019 en Chile. Fuente: ACERA.

Sin embargo, 13.120 [MW] provienen de Energía Térmica en donde la mayor participación de ésta es a través de carbón con 4.973 [MW] y gas natural con 4.910 [MW] ³.

Cómo se refleja, es de gran dificultad que hoy en día la matriz energética dependa en su totalidad de ER y se hace necesario trabajar en tecnologías que optimicen y hagan más eficientes los procesos con combustibles fósiles. El proyecto dentro del cual se desarrolla la implementación del campo de heliostatos tiene como fin gasificar combustibles sólidos carbonosos. En donde por medio de un reactor solar termoquímico bajo un régimen de radiación solar concentrada se busca producir gas de síntesis (SYNGAS), el cual contiene principalmente H_2 y CO y conlleva un proceso energético más limpio que los métodos convencionales.

Desde el porcentaje altamente representativo que la energía solar abarca dentro de las ER y además teniendo en cuenta que Chile es el país con mayor índice de radiación solar incidente y particularmente en la zona del Desierto de Atacama, es que este proyecto se hace atractivo y de interés sobre sus potenciales beneficios. El desarrollo y fabricación del campo de heliostatos con seguimiento solar para redireccionar la radiación incidente sobre un disco concentrador para alimentar un gasificador solar rotatorio y obtener gas de síntesis puede desencadenar una serie de proyectos con gran eficiencia energética y de gran aplicabilidad en Chile. Además, se debe tener en cuenta

³ Sector D E Generaci, D E Energ, and Ctrica Renovable Agosto, 'Sector de Generación de Energía Eléctrica Renovable Agosto 2019', 2019.

que la Energía Solar resultante de las ER en Chile se obtiene a través de paneles fotovoltaicos, lo cual no resulta directamente similar con la obtención de energía renovable a través de radiación directa que define este proyecto, por lo que se presenta una gran oportunidad de desarrollo de diversas aplicaciones en base a energía solar concentrada dentro del país.

DESARROLLO DEL TEMA

I) MARCO TEÓRICO

La alta demanda energética mundial hace realmente imprescindible la aplicación de nuevas tecnologías que sean capaces de eficientizar los procesos de producción energética, ya sea por motivos de que el consumo energético va cada vez en aumento o simplemente por el hecho de que la utilización de combustibles fósiles genera una gran cantidad de problemas. Durante el año 2018 se mantuvo una demanda mundial sólo de energía eléctrica de 23 TWh. Utilizar estos combustibles para la producción de energía eléctrica significa incurrir en una serie de problemáticas para el planeta y todos los que lo habitan, dentro del esquema de la Figura 3 se entrega un punteo general de los impactos globales y locales que se pueden generar.

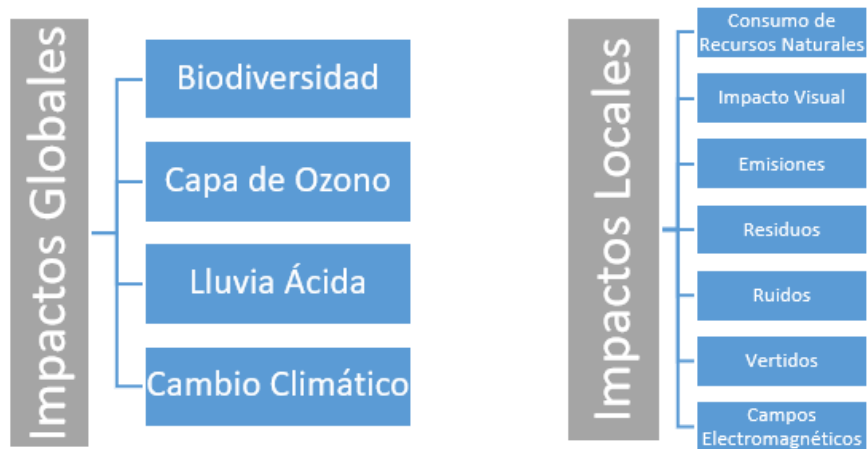


Figura 3: Impactos globales y locales de la producción y distribución de energía eléctrica.

Principalmente, las centrales térmicas son las que se encargan de suministrar la mayor parte de la energía eléctrica a través de la quema de combustibles fósiles, y dentro de este proceso son emitidos cinco gases de efecto invernadero (GEI)⁴, los cuales son:

- Dióxido de Carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido Nitroso (N_2O)

⁴ Iberdrola, 'Efectos Ambientales de La Producción Y Distribución de Energía Eléctrica : Acciones Para Su Control y Corrección', Iberdrola, 2013.

- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Hexafluoruro de Azufre (SF_6)

La energía eléctrica en realidad es una energía limpia si se considera su uso final, ya que no genera residuos y genera beneficios ambientales. Por lo tanto, la problemática está en el proceso de cómo obtenerla, ya que se necesitan optimizar sus sistemas productivos y minimizar la emisión de contaminantes, lo cual se puede conseguir utilizando combustibles con mayor poder energético. He aquí la relevancia de la ER cómo la energía hidráulica, solar, geotérmica y eólica, para estudiar los alcances que puede tener este tipo de energía renovable.

1. Energía solar

Como fue mencionado, la Energía Solar es la ER con más índices de explotación hoy en día. Para el año 2013 la potencia instalada de la energía solar había aumentado un 35% a nivel mundial, mientras que la energía eólica, geotérmica e hidráulica presentaron un crecimiento inferior al 12%.

Chile, Australia, Norte de África, mesetas de Asia y parte de Estados Unidos son los lugares dentro del planeta que reciben mayor cantidad de radiación solar y se encuentran altamente beneficiados para llevar a cabo la implementación de nuevas tecnologías (ver Figura 4). Aprovechar este recurso que se provee ilimitadamente y de manera abundante significa inyectar energía limpia y no contaminante. Sin embargo, tiene puntos en desventaja, como es la intermitencia en que es entregada y esto significa que se debe tener en cuenta un sistema de almacenamiento o acumulación.

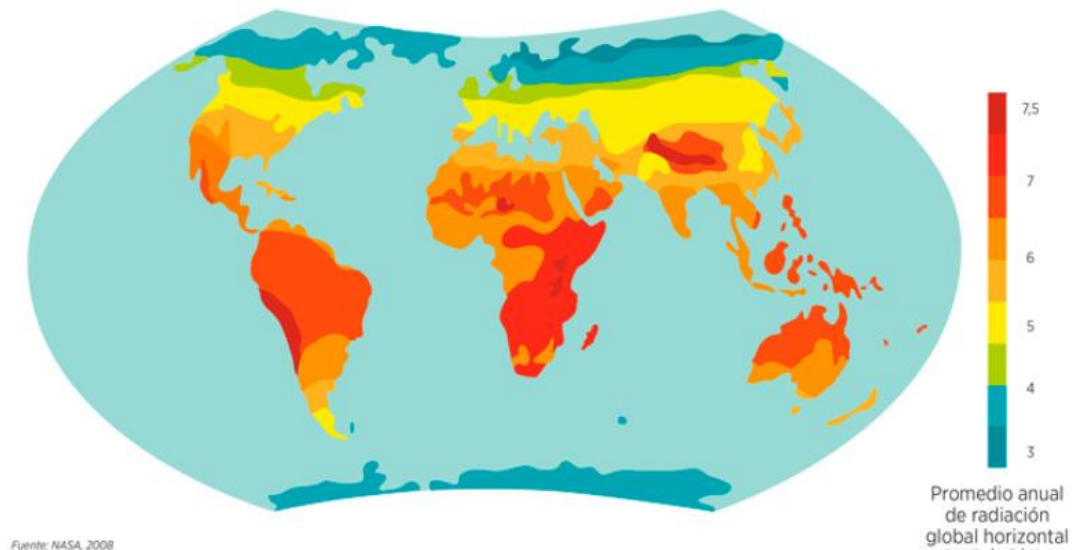


Figura 4: Distribución de radiación solar en la superficie terrestre.

Los métodos de captar energía solar dependen de la cantidad y tipo de radiación solar que se perciba. La radiación es un tipo de transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas que dependen de su longitud de onda (λ), frecuencia (f) y velocidad de propagación de la luz (c). A su vez, también existen las variables de Absorbencia (α_β), Reflexividad (ρ) y Transmisividad (τ), donde, por ejemplo, un cuerpo brillante posee un índice de reflexividad cercano a uno. La diferencia de cada una de estas variables en un cuerpo depende directamente de su temperatura, material y longitud de onda de emisión (ver Figura 5).

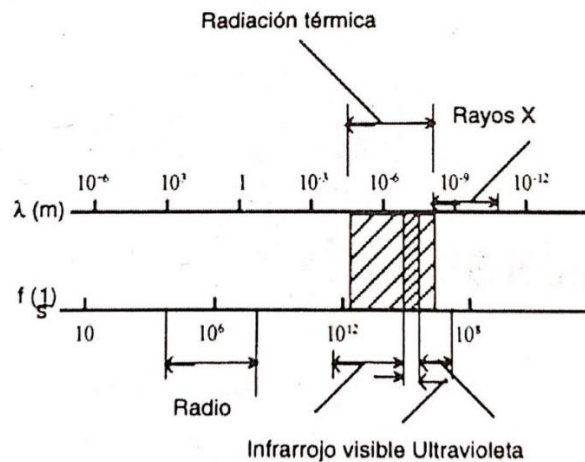


Figura 5: Espectro electromagnético de la radiación térmica, identificando rango Infrarrojo, Visible y Ultravioleta⁵.

El Sol es una estrella que posee un diámetro de aproximadamente $1,4 \times 10^6$ (km) y el planeta Tierra gira en torno a ella mediante una órbita elíptica a una distancia de $1,5 \times 10^8$ (km). Es capaz de emitir $3,73 \times 10^{23}$ (kW) y posee una temperatura cercana a los 5700 K en su capa exterior. Toda su energía emitida es producto de diversas reacciones nucleares que ocurren en él. Además, posee una constante solar (I) de radiación la cual es medida en una superficie perpendicular a los rayos del sol y fuera de la atmósfera terrestre, la cual tiene un valor estandarizado:

$$I = 1353 \left(\frac{W}{m^2} \right) = 1,94 \left(\frac{\text{langley}}{\text{min}} \right) = 4871 \left(\frac{Kj}{m^2 hr} \right)$$

Ecuación 1: Constante solar de radiación solar.

La radiación incidente sobre la superficie terrestre siempre diferirá de la constante solar, es decir, será menor, ver Figura 6, y depende de variables cómo la ubicación geográfica, estación del año, hora del día y longitud de onda.

⁵ Ing Pedro Sarmiento M, 'Energía Solar, Aplicaciones e Ingeniería.', 2008.

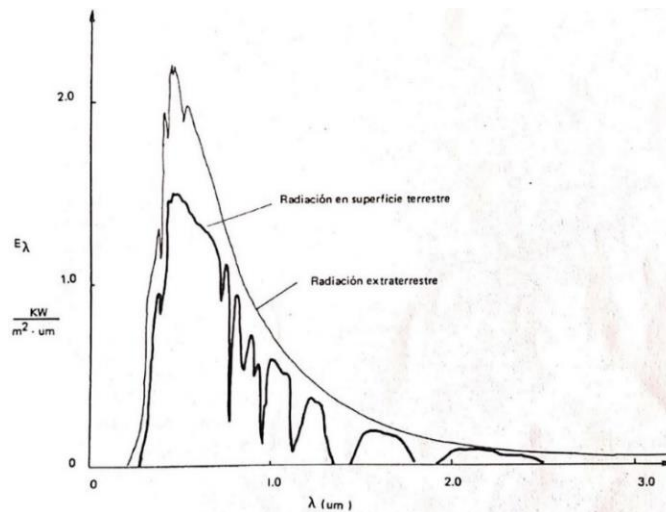


Figura 6: Energía radiante dentro y fuera de la superficie terrestre

La forma en que la radiación solar incide sobre un cuerpo también posee diferencias, ya que esta radiación propagada directamente desde el sol puede ser intervenida por diferentes fenómenos y su capacidad de incidencia se verá afectada. Por consiguiente, en los siguientes puntos se entrega una reseña de los tipos de radiación que se pueden presentar.

1.1. Radiación directa

Es aquella radiación que proviene directamente del Sol y que no es intervenida por algún fenómeno o parámetro físico una vez que se encuentra con la atmósfera de la Tierra, por lo que no sufre cambios de dirección.

1.2. Radiación difusa

Es aquella radiación que se ve afectada por algún fenómeno dentro de la atmósfera terrestre, por lo que su dirección cambia debido a reflexión y dispersión. Algunos de estos factores que generan dispersión de la radiación incidente son las moléculas en la atmósfera, esto se conoce precisamente como dispersión de Rayleigh. También existe la dispersión conocida como dispersión de Mie, que es la generada por los aerosoles y partículas de polvo. En fin, la radiación solar incidente en un día normal depende mucho de las variaciones atmosféricas que presente la localidad en estudio, y por lo general, la tasa de radiación difusa dentro de un día habitual es cerca del 10% de la radiación total incidente.

1.3. Radiación reflejada

Esta radiación no se indica previamente debido a que no es radiación emitida directamente desde el Sol hacia los cuerpos en estudio. Corresponde a la radiación que incide sobre el cuerpo pero que fue reflejada por alguna otra superficie física dentro de la superficie terrestre (ver Figura 7).

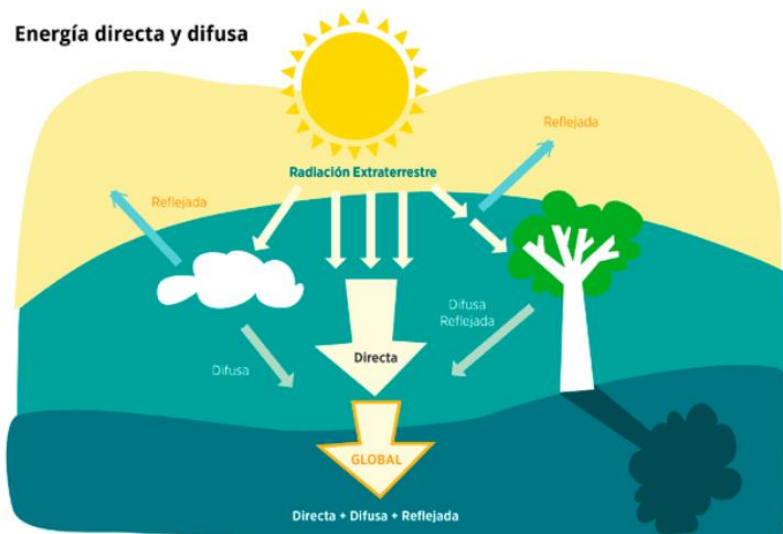


Figura 7: Tipos de radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.

Para desarrollar un sistema de Energía Solar se debe tener en cuenta que existen dos tipos diferentes de ésta. Que corresponde a la energía solar fotovoltaica y energía solar térmica. En los siguientes puntos se proceden a explicar cada una de ellas.

2. Energía solar fotovoltaica (PV)

Este tipo de energía corresponde al método más rápido de convertir radiación solar en energía eléctrica y se basa en el efecto fotovoltaico, en donde celdas solares captan la radiación incidente y cuando esta energía sobrepasa los niveles críticos genera electricidad a través de materiales semiconductores y se mantiene un flujo de corriente eléctrica. La energía eléctrica puede ser almacenada en baterías o enviada directamente a una red eléctrica. No obstante, la gran mayoría de instalaciones con PV requieren y aplican un sistema de acumulación de energía ya que así disponen de ésta cuando no se está produciendo electricidad debido a la intermitencia de la radiación solar, por

ejemplo, durante la noche es cuando la energía almacenada puede ser utilizada para no incurrir en el uso del suministro eléctrico convencional.

A pesar de que el trabajo en desarrollo no trata específicamente del uso de PV para la generación de energía, cabe destacar que realmente es una buena alternativa para generación de electricidad. Posee aplicaciones en sistemas de comunicaciones, bombeo, iluminación, protección catódica, refrigeración, entre otros. En su mayoría se plantean para suministrar potencia media o moderada ya que de esta manera no son necesarios la extensión de cableados, motores o implementar sistemas de mantenimiento.

3. Energía solar térmica

En este caso se transforma la energía solar incidente en calor, el cual a través de diferentes procesos convencionales puede obtener energía eléctrica. Existen dos tipos de procesos, los cuales están ligados directamente a la temperatura de operación a la que trabajan.

3.1. Colectores térmicos o no concentradores

Corresponden a colectores en donde el área de incidencia de radiación está limitada directamente al área de captación del equipo. Utilizan normalmente un fluido como agua, aceite o gases para ser calentados y con esto mediante un proceso termodinámico convencional producir energía.

Principalmente, poseen características cómo:

- Bajas temperaturas
- Tecnología simple
- Bajo costo

Su campo de aplicación normalmente es el calentamiento de agua, piscinas, calefacción, destiladores y uso industrial y agrícola. Uno de los ejemplos para este tipo de colectores son los colectores planos, que se utilizan desde hace muchos años y se les puede ver, por ejemplo, en edificios para calentar agua y de esta manera limitar el uso de gas para este fin. Su temperatura de operación es aproximadamente de 90 °C.

3.2. Colector concentrador

Esto trata más bien de Energía Solar Concentrada “CSP: Concentrated Solar Power”⁶ y se caracterizan porque la energía eléctrica es generada al concentrar la radiación solar que se transforma en calor y éste permite impulsar un motor térmico convencional. Poseen diversos equipos y configuraciones para llevar a cabo su función, estos son concentradores solares, receptores, turbinas de vapor y generadores eléctricos, entre otros. La ventaja de la energía solar concentrada por sobre la no concentrada es que es capaz de captar mayor cantidad de Watts (potencia) por cada metro cuadrado del equipo concentrador. Sin embargo, por la gran variedad de equipos que se necesitan y la alta tecnología es un proceso mucho más costoso.

Hoy en día existen cuatro tipos diferentes de plantas para la generación de energía solar concentrada y en los siguientes puntos se entrega un detalle de sus características⁷.

3.2.A.- Plato parabólico solar (PDC)

Sus siglas en inglés se refieren a “Parabolic Dish Collector” y trata de un concentrador parabólico que posee un foco puntual y refleja la radiación solar hacia un receptor justamente en este punto focal. Poseen un sistema de seguimiento solar en dos ejes lo que lo hace más eficiente. Para comprender esto se puede ver la Figura 8 que muestra un esquema simple de este tipo de concentrador.



Figura 8: Esquema explicativo de un PDC.

El calor concentrado en el receptor es transformado en energía mediante un motor Stirling o Brayton con un generador eléctrico. Posee un rango de temperatura de operación entre 1200–1500 °C, una relación de concentración solar entre 100-1500 y

⁶ A. Peinado Gonzalo, A. Pliego Marugán, and F.P. García Márquez, ‘A Review of the Application Performances of Concentrated Solar Power Systems’, *Applied Energy*, 255.March (2019).

⁷ Alessandro Gallo and others, ‘High Flux Solar Simulators for Concentrated Solar Thermal Research: A Review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77.April (2017).

una alta eficiencia que lo caracteriza. Frecuentemente, sus diámetros varían entre 5 a 10 (m) y tienen una superficie efectiva de 40 a 120 (m^2). En la actualidad existe una única planta operativa de PDC en Estados Unidos y es capaz de producir 1,5 (MW)⁸. Esta planta está representada en la Figura 9.



Figura 9: Planta de concentración solar (PDC) en Utah, Estados Unidos.

Para el proyecto a desarrollar, el concentrador parabólico tipo cassegrain estará basado en este tipo de concentradores y sus dimensiones diferirán de lo mencionado ya que está centrado en los objetivos específicos del proyecto.

3.2.B.- Torre de energía solar (SPT)

La Torre de Energía Solar o “Solar Power Tower” es un sistema de generación de energía limpia que utiliza un amplio número de espejos, llamados heliostatos, que reflejan directamente la radiación solar percibida sobre un solo punto ubicado por sobre ellos en una torre ubicada en el centro, ver Figura 10. El rango de temperatura de operación de este sistema es entre 300-500°C por lo que el material del receptor es normalmente de cerámica o metal con propiedades estables cuando se someten a altas temperaturas, su concentración solar es entre 150-1500, presentan una eficiencia solar máxima del 20% y una eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica entre el 20-35%.

El fluido que circula dentro del receptor aumenta lo suficientemente su temperatura como para cambiar a estado gaseoso, el cual hace trabajar una turbina que genera electricidad de manera convencional.

⁸ Md Tasbirul Islam and others, ‘A Comprehensive Review of State-of-the-Art Concentrating Solar Power (CSP) Technologies: Current Status and Research Trends’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91.April (2018).

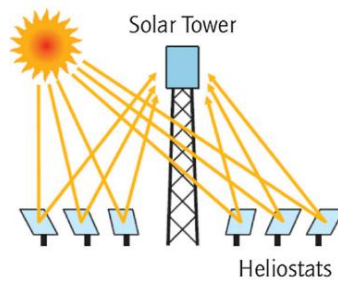


Figura 10: Esquema explicativo de SPT.

Hoy en día este es uno de los campos de concentración solar más utilizados en conjunto de los PTC y es pertinente mencionar que los heliostatos corresponden a la mayor inversión de capital en una planta de concentración. Existen sistemas SPT en el desierto de Mojave (EE.UU.) que alimenta con energía a más de 5000 hogares, en Sevilla existe la planta PS-10 de 10 (MW), ver Figura 11. Y a su vez, en 2010 comenzó la construcción de un sistema compuesto de tres torres con capacidad de generar 392 (MW) en California, USA⁹.



Figura 11: Planta SP-10 de 10 MW en Sevilla, España.

Es precisamente en este modelo del cual se centrará el desarrollo de este trabajo en específico. Que consta de llevar a cabo la implementación de mínimo dos heliostatos con seguimiento solar en dos ejes. El fin de replicar este diseño es generar un campo de heliostatos que sean capaces de redirigir la radiación solar incidente.

⁹ Md Tasbirul Islam and others, 'A Comprehensive Review of State-of-the-Art Concentrating Solar Power (CSP) Technologies: Current Status and Research Trends', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91.April (2018).

3.2.C.- Colector cilíndrico parabólico (PTC)

Conocido también en inglés como “Parabolic Trough Collector” se compone por una serie de cilindros parabólicos en donde su sección transversal es muy parecida a la de un disco parabólico. Sin embargo, esta vez la radiación solar incidente sobre el cilindro se centrará sobre una línea focal y no sobre un punto focal, ver Figura 12. A través de este eje focal se sitúa un tubo que contiene un fluido de trabajo a calentar. Los factores importantes para tener en cuenta son el coeficiente de absorción del tubo por el cual circula el fluido para captar la máxima radiación reflejada posible y que este mismo se encuentre bien centrado sobre el eje focal de los cilindros parabólicos. Su rango de temperatura de trabajo puede variar entre los 20-400 °C y su concentración solar de 15-45.

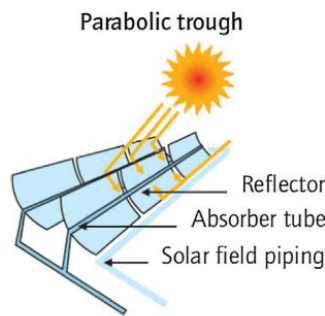


Figura 12: Esquema explicativo de PTC.

Sólo en España existen 39 plantas PTC, durante el año 2008 se instaló el primer sistema en Granada y tomó el nombre de AS-1 y su capacidad fue de 49,9 (MW) con un recurso solar por año de $2136 \left(\frac{kWh}{m^2} \right)^{10}$, ver Figura 13.



Figura 13: Planta AS-1, España.

¹⁰ Md Tasbirul Islam and others, ‘A Comprehensive Review of State-of-the-Art Concentrating Solar Power (CSP) Technologies: Current Status and Research Trends’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91.April (2018).

3.2.D.- Colector lineal fresnel (LFR)

Por último, está el llamado “Lineal Fresnel Reflector”, que utiliza tecnología similar a la de los sistemas PTC para redirigir la radiación solar a un foco lineal, pero esta vez el receptor no está ubicado dentro de los espejos, sino que se ubica en una torre separada de ellos como un sistema SPT, ver Figura 14. Además, también se usan espejo planos y no parabólicos, estos mismos se instalan cada uno con una inclinación (ángulo único) predeterminada para que así reflejen toda la luz solar en el foco lineal.

Esta es una de las configuraciones más económicas debido a los elementos que utiliza y la disposición en la que se configura el sistema.

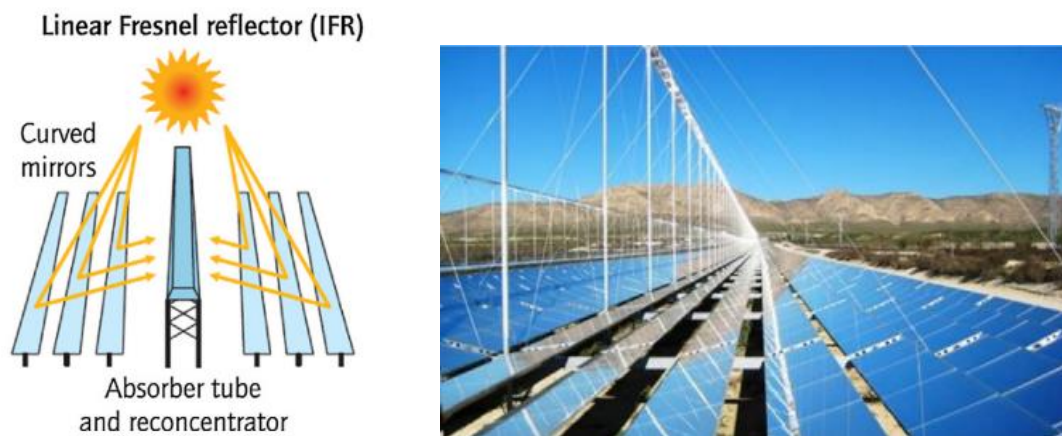


Figura 14: Esquema explicativo de LFR y planta LFR de 1,4 MW, España¹¹.

4. Seguimiento solar y sus parámetros

Este corresponde a uno de los puntos más importantes de este trabajo, donde el estudio del movimiento aparente del Sol a lo largo del año será un factor clave para el desarrollo de los heliostatos con seguimiento solar en dos ejes. Dentro de esta misma sección se explicará más adelante por qué son dos ejes de movimiento y por qué se llama movimiento aparente. A lo largo del tiempo y a través de diferentes estudios se puede afirmar que el movimiento del sol puede predecirse durante todo el año. Sin embargo, esto depende directamente de muchas variables como, por ejemplo, el lugar geográfico en dónde se disponga el proyecto.

¹¹ Md Tasbirul Islam and others, ‘A Comprehensive Review of State-of-the-Art Concentrating Solar Power (CSP) Technologies: Current Status and Research Trends’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91.April (2018).

El movimiento solar que se percibe en la Tierra es causado por el efecto de rotación que tiene ésta a través de su eje. Cuando se observa desde un lugar fijo durante todo el día, se ve como si el sol cruzara todo el largo del cielo y siempre de la misma manera. Pero claramente no es así, esta trayectoria varía, aun así, en el mismo lugar geográfico. En la Figura 15 se muestra un recorrido aparente del sol observado desde el hemisferio sur, es decir, todos los lugares desde el Ecuador Celeste hacia el Sur.

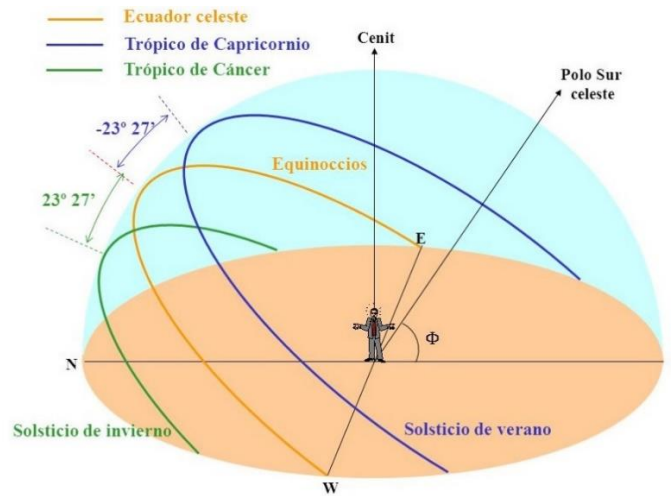


Figura 15: Trayectoria aparente del Sol en el cielo del hemisferio sur.

Como se puede apreciar en la imagen de la Figura 15, la localización en particular es una de las variables más importantes, así también la época del año en la que se encuentre y sin duda la hora del día. Para obtener una estimación completa y concreta del movimiento del sol para una localización fija, se necesitarán la latitud, longitud, día del año y su hora^{12, 13}.

4.1. Localización geográfica

Como fue mencionado, la posición geográfica desde donde se observa el movimiento del sol es uno de los factores más importantes, esto entregará todo un despliegue de mucha más información que se requiere posteriormente para cada una de las variables que calculan la posición del sol a lo largo de todo el día.

La localización geográfica se plantea principalmente en base a dos conceptos claves, latitud y longitud geográfica¹⁴. Con estos dos conceptos se logra identificar un punto en la esfera terrestre y a la vez diferenciarlo de otros lugares.

¹² Ing Pedro Sarmiento M, 'Energía Solar, Aplicaciones e Ingeniería.', 2008.

¹³ Robert Walraven, 'Calculating the Position of the Sun', *Solar Energy*, 20.5 (1978).

¹⁴ Víctor Freixanet, 'Geometría Solar', *Heliodon*, 2015, 16.

Para comprender de mejor manera lo que es y significa latitud y longitud, se deben tener claros los conceptos de paralelos y meridianos.

- **Paralelos:**

Los paralelos dividen, de forma imaginaria, el globo terrestre de manera transversal a su eje de rotación. En donde el paralelo más importante es el ecuador o también conocido como ecuador celeste. Éste representa una línea cero (0°), la cual separa la Tierra en hemisferio norte y hemisferio sur. Los polos representan los puntos más alejados del ecuador y limítrofes de cada hemisferio. Ahora, en la Figura 16 se puede apreciar un esquema de cómo se trazan estos paralelos y están especificados cuatro de ellos que tiene mayor importancia: Círculo Polar Ártico, Trópico de Cáncer, Trópico de Capricornio y Círculo Polar Antártico.

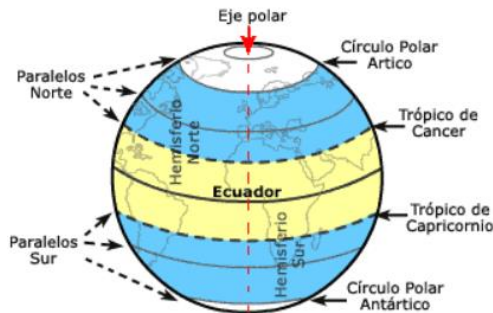


Figura 16: Paralelos del globo terrestre.

- **Meridianos:**

Ahora, los meridianos comprenden un trazado imaginario transversal al ecuador y donde cada uno de ellos pasa por ambos polos. Así como en el caso de los paralelos, también existe un meridiano que representa una línea cero (0°). Éste es el meridiano de Greenwich y divide la Tierra en hemisferio este u oriental y hemisferio oeste u occidental. En la Figura 17 se aprecia un esquema explicativo sobre el trazado de los meridianos.

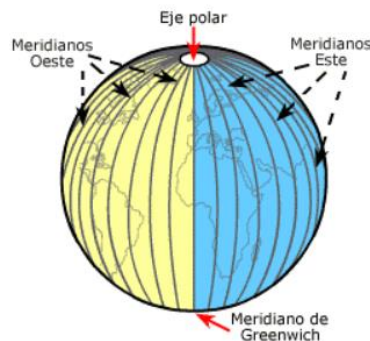


Figura 17: Meridianos del globo terrestre.

Una vez comprendidos estos conceptos, se puede comenzar a explicar de mejor manera la latitud y longitud que serán los parámetros influyentes para el posicionamiento localizado, ya que proviene de la intersección de un paralelo y un meridiano, obteniendo un movimiento solar aparente concreto.

4.1.A.- Latitud (φ)

Esta variable entrega la localización de un punto en la Tierra dentro del hemisferio norte o el hemisferio sur. En otras palabras, es la distancia desde el ecuador hasta el punto en cuestión medido en grados, que va desde 0° en el ecuador y 90° en cada polo. Es necesario mencionar que todas las medidas desde el ecuador hacia el norte corresponden a ángulos positivos y hacia el sur ángulos negativos, cómo se representa en la Figura 18.

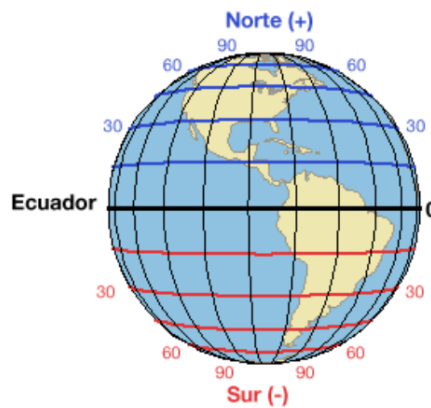


Figura 18: Latitud terrestre, positiva hacia el norte y negativa hacia el sur.

A continuación, a modo de ejemplo, se entrega la Figura 19, que expresa de mejor manera el esquema de cómo se mide la latitud de un lugar. En donde “P” representa el punto a localizar y “O” es el centro del globo terrestre, trazando una recta entre O y P se forma un ángulo “a” con respecto al plano ecuatorial, dicho ángulo es la latitud del punto P.

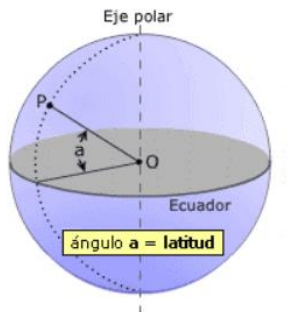


Figura 19: Ejemplo de latitud de un punto P.

4.1.B.- Longitud (λ)

La longitud entrega la localización de un punto en la Tierra dentro del hemisferio Este o el hemisferio Oeste. Es decir, entrega la distancia angular que existe entre un lugar con respecto al meridiano 0° (Greenwich). Sus medidas van desde 0° a 180° , las cuales se tornan positivas hacia el Este y negativas al Oeste, ver Figura 20.

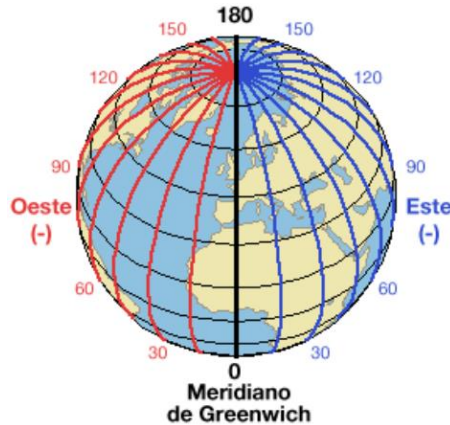


Figura 20: Longitud terrestre, positiva hacia el Este y negativa al Oeste.

Para este caso, en la Figura 21 también se entrega un esquema con un ejemplo en donde se toma el mismo punto “P” anterior. Esta vez se mide su distancia angular con respecto al meridiano de Greenwich. Como P se encuentra hacia el Oeste de Greenwich su valor angular “b” debe ser negativo.

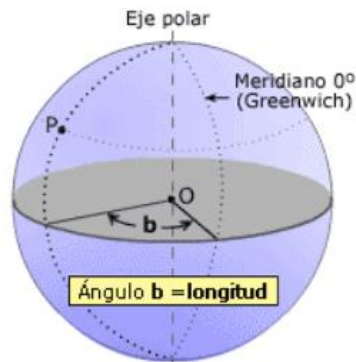


Figura 21: Ejemplo de longitud “b” de un punto P

Un punto para destacar es que los meridianos también sirven para expresar las zonas horarias de un lugar. En donde entran la definición de huso horario, los cuales representan cada uno de los meridianos en los que se divide la Tierra (en total 24, 15° por cada uno), ver Figura 22. Por ello, se entiende que el huso horario hacia el Este es positivo y negativo hacia el Oeste. Cada uno de ellos representa finalmente la diferencia horaria que existe entre un lugar específico versus la hora local de Greenwich.

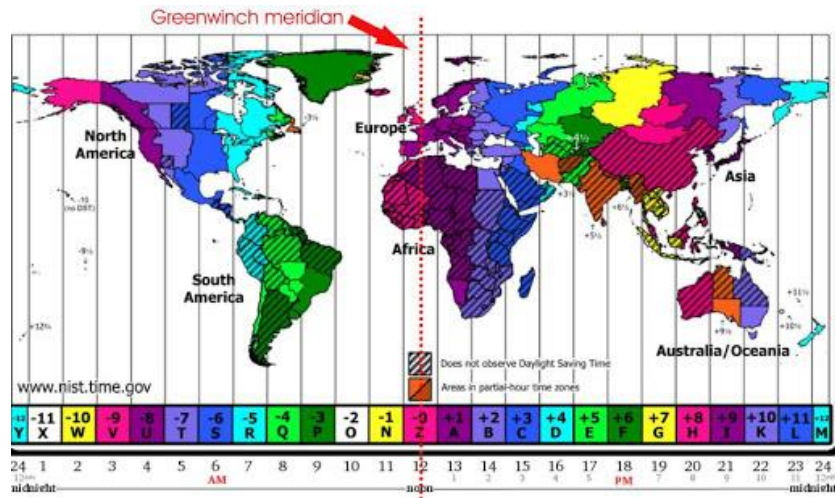


Figura 22: Huso horario.

4.2. Ecuación de tiempo (*ET* o *EoT*)

La Ecuación de Tiempo o “Equation of Time” toma en consideración el día del año en que se encuentra al momento del cálculo. Se utiliza para obtener el Tiempo Solar Aparente (LST), el cual se explicará en detalle más adelante. El fin de esto es corregir la inclinación del eje de la Tierra y la excentricidad de su órbita. En la Ecuación 2 queda expresado cómo determinar la ecuación de tiempo y sus unidades se expresan en minutos.

$$ET = 9,87\sin(2B) - 7,53\cos(B) - 1,5\sin(B) \quad [min]$$

Ecuación 2: Ecuación de tiempo (EoT)

Donde B , se obtiene mediante la Ecuación 3.

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

Ecuación 3: Parámetro B en grados, n corresponde al número del día del año

Para un cálculo rápido y fácil de n se entrega la Tabla 1 que representa el día exacto del año según el mes en el que se encuentra.

Tabla 1: Cálculo de n según mes y condición de año

Año Normal				Año Bisiesto			
	MES	Día n			MES	Día n	
	Enero	i			Enero	i	
	Febrero	$i+31$			Febrero	$i+31$	
	Marzo	$i+59$			Marzo	$i+60$	
	Abril	$i+90$			Abril	$i+91$	
	Mayo	$i+120$			Mayo	$i+121$	
	Junio	$i+151$			Junio	$i+152$	
	Julio	$i+181$			Julio	$i+182$	
	Agosto	$i+212$			Agosto	$i+213$	
	Septiembre	$i+243$			Septiembre	$i+244$	
	Octubre	$i+273$			Octubre	$i+274$	
	Noviembre	$i+304$			Noviembre	$i+305$	
	Diciembre	$i+334$			Diciembre	$i+335$	

Finalmente, se entrega la gráfica de la ecuación de tiempo, eje ordenadas, en función de los días del año, eje abscisas, ver Figura 23.



Figura 23: Ecuación de tiempo según días del año.

4.3. Tiempo solar medio (*LSTM*)

El Tiempo Solar Medio o “Local Standar Time Meridian” corresponde a fijar un meridiano de referencia para una zona horaria. Un día completo, idealizado, como

se sabe posee 24 horas y así mismo el globo terrestre se divide en 24 meridianos, de esto se desprende que por cada hora la Tierra realiza una rotación de 15° .

El tiempo solar medio se obtiene a través de la Ecuación 4. Donde se estima una variación de 15° por las horas de diferencia que indique el UTC o GMT (Universal Time Cordinated o Greenwich Mean Time). En el caso de Chile se tiene que en horario de verano hay un UTC-3. Sin embargo, el estándar es de UTC-4, el cual rige en invierno.

$$LSTM = 15^\circ \cdot \Delta T_{UTC} \quad [^\circ]$$

Ecuación 4: Tiempo solar medio (LSTM).

4.4. Factor de corrección de tiempo (TC)

Este factor lo que busca es entregar una corrección para la hora local estándar (LST) de una zona horaria. Según la Ecuación 5, se puede ver que toma la ecuación de tiempo ya calculada (en minutos) y le aplica una adición que representa las variaciones de longitud en el lugar de estudio.

$$TC = ET + 4 \cdot (\lambda - LSTM) \quad [min]$$

Ecuación 5: Factor de corrección (TC).

El multiplicador 4 se aplica para transformar a minutos los grados obtenidos en la resta de $(\lambda - LSTM)$, debido a que se hace una regla de tres simple en donde se expresa que la Tierra puede girar 1° cada 4 minutos.

4.5. Tiempo solar local o aparente (LST)

El Tiempo Solar Aparente o Local Solar Time (LST) es el tiempo que realmente sirve para localizar la posición en la que se encuentra el Sol en un momento determinado y se sirve de todas las variables ya descritas. En la Ecuación 6, se refleja la expresión para calcular el LST y aparece la variable LT que corresponde a la Hora Local (Local Time) que es la que entrega un reloj de cualquier dispositivo. El LST toma en cuenta el factor de corrección (TC) y se lo aplica a la hora local, para compensar los ajustes y manipulaciones humanas además de las variaciones de la excentricidad de la órbita de la Tierra.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad [horas]$$

Ecuación 6: Tiempo solar local o aparente (LST).

Gracias a esta variable es posible que posteriormente se obtengan las coordenadas solares que serán descritas en los siguientes puntos.

4.6. Hora solar o ángulo horario (h)

La hora solar o ángulo horario es la última conversión que se le aplica al LST, esto es debido a que el cálculo de la ecuación anterior lleva a un valor en horas. Con la expresión de la Ecuación 7 se obtiene la variación en grados del movimiento solar.

$$h = 15^\circ \cdot (LST - 12) \text{ } [^\circ]$$

Ecuación 7: Hora solar (h).

Cuando se reemplaza $LST = 12 \text{ horas}$, se puede ver que $h = 0^\circ$. Lo que significa que cuando el tiempo solar aparente indica las 12 horas del día solar, el Sol se encuentra justo en los 0° , es decir, el mediodía solar. Hay que recordar que el mediodía solar no corresponde a $LT = 12 \text{ horas}$ cómo muchos pueden pensar, el movimiento solar aparente indica una posición variada del sol en cada día y por cada zona geográfica y esto implica que no siempre el sol se encontrará a los 0° en el mismo valor de LST .

4.7. Coordenadas solares

Las coordenadas solares son las cuales describen los movimientos solares y utilizan como base la serie de variables descritas previamente en base a la localización geográfica. Ahora, se puede hablar directamente de una variación angular tangible del sol según: Declinación solar, Altitud, Zenit y Azimut.

4.7.A.- Declinación solar (δ)

La Tierra posee cierta inclinación con respecto a su eje de rotación que va variando su valor y también su posición a lo largo de todo el movimiento de la Tierra con respecto del Sol. La declinación solar (δ) es el valor que toma la posición del Sol según la inclinación presente en la Tierra.

A modo de explicación, para medir la declinación solar se traza una línea imaginaria desde el centro de la Tierra hacia el Sol, y el ángulo que se forma entre una horizontal trazada a la altura de la ubicación del ecuador con la línea trazada hacia el Sol es la declinación Solar.

Cabe destacar que la declinación solar varía según un rango de valores, ya que se afirma que la inclinación máxima de la Tierra es de $23,45^\circ$ y la declinación varía entre los $-23,45^\circ$ y $23,45^\circ$. Se puede calcular su valor de acuerdo con la Ecuación 8.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + n)\right) \quad [^\circ]$$

Ecuación 8: Declinación sola (δ), con n representando el día del año en el que se realiza la medición.

Bajo el supuesto de que la Tierra no estuviese inclinada sobre el eje de rotación, significaría que la declinación solar siempre sería igual a 0° . La única excepción de esto es durante los equinoccios, en donde la duración de un día solar completo es equivalente a 12 horas y el sol está en su punto máximo justo en el Zenit, en el ecuador, y el cual coincide directamente con la declinación solar. Mientras que, durante los solsticios de invierno y verano la declinación alcanza su máximo valor, $23,45^\circ$ en el solsticio de verano y $-23,45^\circ$ en el solsticio de invierno. Estos valores son iguales para cada hemisferio y para sus solsticios correspondientemente. En la Figura 24, se puede observar lo explicado, pero está expresado para el hemisferio norte.



Figura 24: Esquema declinación solar según equinoccios y solsticios para el hemisferio norte.

4.7.B.- Ángulo de elevación (α)

El Sol siempre presenta cierta altura con respecto a la Tierra, este valor angular se denomina ángulo elevación o altitud (α), se mide entre la horizontal o superficie de la Tierra y los rayos solares que inciden desde la posición del Sol.

Este ángulo varía a lo largo del día ya que evidentemente se puede ver que el Sol posee un inicio y un fin en cada día, se podría decir, que el Sol presenta una altitud de 0° al

inicio del día y de 90° al final de éste. Esto no es estrictamente correcto, pero sirve para entender el concepto de la altitud solar.

El ángulo de elevación varía según la zona geográfica, ya que toma en cuenta la latitud del lugar, la declinación solar y el día del año.

Así como la declinación solar, este ángulo también posee un valor máximo. Sin embargo, no está comprendido entre unos valores específicos ya que todos los días puede obtenerse un valor distinto cómo máxima elevación del Sol. Dicho esto, si se puede calcular su valor en función de la Ecuación 9 y 10. Esto es de real importancia cuando se desea implementar, por ejemplo, un sistema de paneles fotovoltaicos que necesiten saber de la máxima altitud solar en un momento específico, esta altitud máxima siempre se produce en el mediodía solar ($h = 0^\circ$).

$$\alpha = 90^\circ - \varphi + \delta \quad [^\circ]$$

Ecuación 9: Altitud solar máxima en el hemisferio norte

$$\alpha = 90^\circ + \varphi - \delta \quad [^\circ]$$

Ecuación 10: Altitud solar máxima en el hemisferio sur

En esta ecuación, φ corresponde a la latitud de la zona geográfica y δ a la declinación solar, que muy bien se sabe, depende también del día del año.

4.7.C.- Zenit (Φ)

En particular, tener conocimiento de la altitud máxima que pueda presentar el Sol en un momento y lugar determinados es muy importante. No obstante, para el trabajo de instalaciones solares que necesiten retroalimentarse constantemente cómo lo son el uso de los heliostatos es imprescindible conocer el ángulo de elevación en cualquier momento del día.

El ángulo cenital o Zenit, es el ángulo complementario de la altitud solar, ya que, en vez de medirse entre el sol y la superficie terrestre, se mide entre el Sol y la vertical o zenit, ver Figura 25.

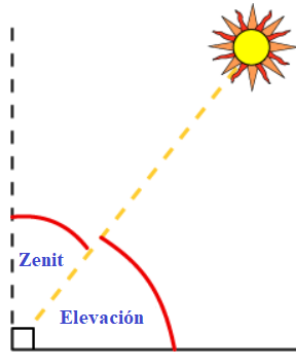


Figura 25: Esquema explicativo para obtener el Zenit (Φ).

Entonces, con estos conceptos dados a conocer y mediante la Ecuación 11, se obtiene un cálculo más preciso de cómo puede variar la altitud solar dentro del día.

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

Ecuación 11: Expresión de altitud o zenit en función de latitud, declinación y hora solares.

Finalmente, aplicando la función inversa de las funciones Seno o Coseno, se obtiene la variación angular del Sol, ver Ecuación 12.

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(h)] \quad [^\circ]$$

Ecuación 12: Altitud solar en grados.

4.7.D.- Azimut solar o ángulo azimutal (z)

Así como la altitud solar varía a lo largo de todo un día, también se puede expresar la variación horizontal que presenta el Sol, ya que muy bien se sabe que el Sol aparece cada mañana por el Este y se esconde cada tarde por el Oeste.

Entonces, esta variación angular se puede definir en cómo se mueve la posición solar con respecto al plano terrestre, en donde se puede plantear un plano en el cual estén indicados los cuatro puntos cardinales, Norte, Sur, Este y Oeste. El ángulo azimutal es la diferencia angular de la ubicación del Sol con respecto a una referencia dada en este plano. Ver Figura 26 para comprender de mejor manera esta variación.

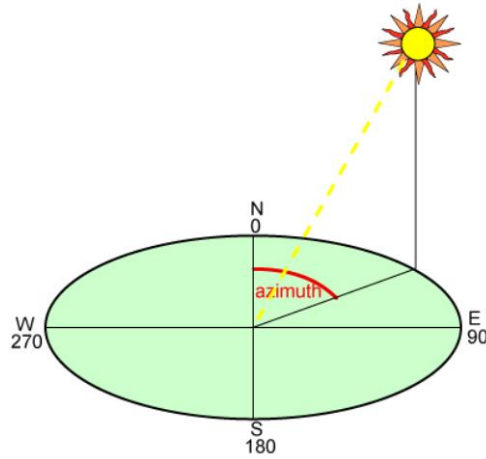


Figura 26: Esquema explicativo de una referencia para la variación del ángulo azimutal.

Para el hemisferio sur, el ángulo azimutal varía con respecto al norte, ya que al mediodía solar ($h = 0^\circ$) el Sol se encuentra directamente en este punto cardinal. Y por esto es por lo que cada equipo que utilice energía proveniente de la radiación solar incidente dentro del hemisferio sur se debe instalar mirando en dirección norte. A continuación, en la Ecuación 13 se entrega la expresión para calcular el ángulo azimutal.

$$z = \cos^{-1} \left[\frac{\sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(h)}{\cos(\alpha)} \right] \quad [^\circ]$$

$$z = z ; h < 0^\circ \text{ o } LST < 12$$

$$z = -z ; h > 0^\circ \text{ o } LST > 12$$

Ecuación 13: Azimut solar en grados.

Ahora, finalmente se han expresado todos los conceptos y ecuaciones necesarias para saber exactamente en qué posición se encuentra el Sol en cualquier zona geográfica, día del año y hora.

II) ESTADO DEL ARTE: HELIOSTATOS

Una vez interiorizados los temas y conceptos generales de Energía Solar dentro del cual se desarrolla el proyecto de la implementación de un Campo de Concentración Solar (CCS) para la generación de SYNGAS, es posible, ahora, desarrollar el tema en específico de este trabajo, el cual trata de la construcción de un campo de heliostatos con seguimiento solar en dos ejes.

Tal como fue mencionado, los heliostatos dentro de un sistema SPT son los elementos más costosos, llevándose cerca de una 40% de la inversión total de la planta. Por lo tanto, un buen diseño y dimensionamiento en base a los requerimientos es esencial para cumplir con los desafíos y objetivos que plantea un proyecto de producción de energía solar térmica, de esta manera es que se busca que sea viable una instalación de este tipo para generar energía a través de las energías renovables¹⁵.

El enfoque principal de este proyecto es lograr un redireccionamiento de la radiación solar incidente sobre el disco concentrador parabólico, y esto implica el estudio de las funciones que cumple cada elemento que compone un heliostato y tomar en cuenta cuales son las deficiencias, desventajas y desafíos que hoy en día afecta a los campos de CSP con sistemas de SPT. Además, se tomará como base un primer prototipo de heliostato desarrollado en el trabajo de título de un Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad Técnica Federico Santa María, llamado Esteban Carvajal¹⁶.

1. Principio de funcionamiento

En general, un heliostato tiene la función de reflejar toda la radiación solar incidente sobre él hacia un punto fijo durante todo el día solar mediante un sistema de seguimiento de dos ejes. Como es en el caso de los SPT, la radiación es proyectada sobre un punto más elevado ubicado en la parte más alta de la torre la cual tiene el rol de receptor y que contiene un fluido de trabajo. A medida que este receptor recibe radiación solar comienza a subir su temperatura y con esto el fluido cambia su fase a estado gaseoso e impulsa una turbina para generar energía eléctrica de manera convencional.

Principalmente, el principio base de los heliostatos es la de reflexión óptica, en donde se establece el cambio de dirección de un rayo de luz cuando éste no es capaz de atravesar la superficie de otro medio. La superficie del medio en donde choca el haz de

¹⁵ J. Coventry and J. Pye, 'Heliostat Cost Reduction - Where to Now?', *Energy Procedia*, 49 (2014).

¹⁶ Esteban Carvajal, “Diseño Y Construcción De Un Heliostato Con Seguimiento Solar En Dos Ejes Para Re-Direccionar Radiación Incidente Hacia Un Disco Concentrador Parabólico”, 2018.

luz posee un vector normal. Además, dentro del mismo plano se genera el ángulo de incidencia y ángulo de reflexión. El de incidencia corresponde al ángulo formado por el vector de incidencia de la luz con el plano, mientras que el de reflexión es el ángulo que genera la luz cuando su vector de reflexión es rechazado en otra dirección. En la Figura 27 se puede observar que ambos ángulos, de incidencia y reflexión, son iguales debido a que el vector normal al plano de choque bisecta entre el vector incidente y reflector.

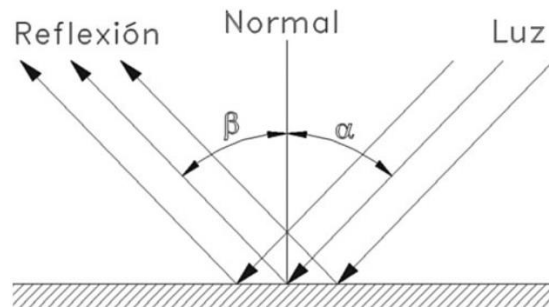


Figura 27: Principio de reflexión de la luz.

Dicho esto, el funcionamiento de los equipos a implementar se regirá por el mismo principio. Un heliostato debe redirigir, en este caso, toda la radiación incidente a un disco concentrador parabólico. Analizando esta problemática, se logra dar cuenta de que el vector de reflexión de la luz siempre será el mismo, es decir, los únicos vectores que varían durante todo el día solar en que el equipo se encuentra operativo son el vector de radiación incidente y el vector normal al plano. A modo de explicativo, el vector normal del plano (espejo) varía todo el día ya que presenta un sistema de seguimiento solar, así mismo el vector de radiación incidente también permanecerá variando con respecto al movimiento aparente del sol. En cambio, sólo el vector de reflexión de radiación será el que con certeza se conocerá, ya que el concentrador parabólico se mantendrá fijo siempre y se puede expresar de manera precisa su posición.

2. Componentes y subconjuntos característicos

Los componentes de un heliostato, sus funciones y su porcentaje de costo asociado se detallan en la Tabla 2¹⁷.

¹⁷ Andreas Pfahl, 'Survey of Heliostat Concepts for Cost Reduction', *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 136.1 (2014).

Tabla 2: Componentes, funciones y porcentaje de costos de un heliostato

Componente	Función	Porcentaje de Costo
1.- Espejos	Reflexión solar	25%
2.- Soporte Estructural del Espejo	Fijación de espejos con base del heliostato	15%
3.- Pedestal y Cimientos	Fijación del sistema a superficie terrestre y pedestal para elevarlo respecto del suelo	15%
4.- Sensores y Control de Posición	Determinar desfase de la orientación del espejo	5%
5.- Sistema Mecánico	Dar movimiento al espejo en dos ejes (Azimut y Elevación)	30%
6.- Instalación y Puesta en Marcha	(-)	10%

Ahora, se procede a describir en mayor profundidad sobre lo que hasta hoy en día existe en cuanto a cada uno de estos componentes de heliostatos convencionales que se utilizan en las plantas de CSP en el mundo^{18, 19}.

2.1. Espejos reflectantes

Hoy en día a través de diversos estudios, es de carácter general que el vidrio espejado y la película reflectante son las mejores opciones para utilizar como elemento reflectante para heliostatos en un periodo a corto plazo. A su vez, existen las opciones de utilizar metal pulido o espejos plásticos. Sin embargo, estos no presentan una buena capacidad de reflectancia.

¹⁸ Andreas Pfahl and others, 'Progress in Heliostat Development', *Solar Energy*, 152 (2017).

¹⁹ Joe Coventry and others, 'Heliostat Cost Down Scoping Study - Final Report', *Technical Report*, January 2017.

El vidrio espejado con bajo contenido de hierro es el que se presenta con mayor frecuencia para aplicaciones solares, debido a que es económico, tiene muy buen índice de reflectancia, es duradero y dentro de la industria está bien catalogado. Se encuentra normalmente con dimensiones de 3 – 4 (*mm*) de espesor y también hay algunos casos de productores que suministran vidrio espejado de 1 (*mm*) de espesor.

Para el caso de la película reflectante, la marca 3M es la que se ha encargado de encabezar los estudios para verificar su aplicabilidad dentro de la industria. Está en evidencia que posee un alto índice de reflectancia y además corresponde a un material mucho más liviano que un vidrio espejado por lo que su uso realmente puede significar amplias ventajas en la aplicabilidad con heliostatos.

2.2. Estructura de soporte del espejo

Para el caso de la fijación del elemento reflectante (espejos) a algún tipo de base, se tienen 3 posibilidades:

- Ensamblaje del espejo con marcos de acero.
- Panel tipo sándwich.
- Espejo estampado a estructura de soporte.

2.2.A.- Ensamblaje del espejo con marcos de acero

Este tipo de ensamblaje también es conocido como estructuras tipo “T” y son los más utilizados en la industria moderna de SPT. Consiste en la unión de varias vigas de acero transversales que se montan sobre un tubo horizontal, este tubo cumple la función de suministrar el torque a toda la estructura de vigas unidas y es éste el que se conecta con el pilar principal del heliostato a través de un sistema motriz para dar el movimiento azimutal y de elevación al equipo, en la Figura 28 se puede observar un ejemplo de esto.



Figura 28: Vigas de acero unidas para estructura de heliostato.

Como las vigas de acero y el vidrio espejado poseen distinto índice de expansión térmica, los espejos son fijados normalmente con pasadores flexibles (ver Figura 29) que hacen que el movimiento sea un poco más flexible en ambas direcciones del plano del espejo. De esta manera se limita que haya lugar a grandes tensiones en el vidrio espejado.



Figura 29: Conexión de vidrio espejado y estructura de acero mediante pasadores flexibles.

2.2.B.- Panel tipo sandwich

Su estructura de soporte consiste en un tablero tipo “sándwich” que lo componen el vidrio espejado (se utiliza de 1 (*mm*) de espesor), una placa de espuma rígida y una placa de acero, ver Figura 30. La espuma está pegada entre el vidrio reflectante y la base metálica.



Figura 30: Esquema explicativo de panel tipo sándwich.

El uso de este tipo de paneles para la instalación de heliostatos posee ventajas por sobre los otros, ya que alcanza un 5% más de eficiencia debido a que el vidrio espejado de 1 (*mm*) de espesor posee mayor índice de reflectancia que los comúnmente usados de 4 (*mm*), hace más liviano el conjunto del heliostato, la rigidez de este tipo de paneles es muy fuerte y si se elabora un buen diseño previo puede llegar a reducir notablemente los costos de fabricación. En la Figura 31 se muestra un panel tipo sándwich en proceso de construcción.

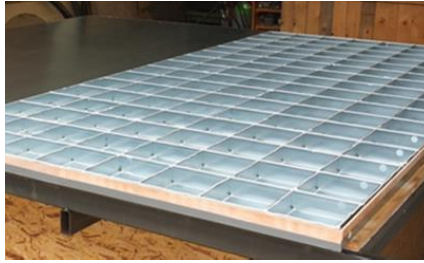


Figura 31: Heliostato con panel tipo sándwich en construcción.

2.2.C.- Espejos estampados

En este caso los espejos de vidrio van estampados sobre una estructura de soporte metálica mediante un material adhesivo. La flexibilidad que entrega este mismo hace que los diferentes coeficientes de expansión térmica entre el vidrio y el metal sean compensados, ver Figura 32. La estructura de metal muchas veces es mecanizada y posee variadas aberturas que conllevan a una notable disminución del peso total del equipo, también, se utilizan vidrios espejados de 3 (*mm*) de espesor que poseen mejor reflectancia que los de 4 (*mm*). Al ser pegados el vidrio con la estructura se utilizan menos piezas, lo que hace mucho más simple el proceso de montaje y colabora con la disminución del peso.



Figura 32: Vidrio espejado unido con adhesivo directamente a la estructura.

2.3. Pedestal y cimientos

Los cimientos de los heliostatos dependerán directamente de su tamaño y condiciones a las que estará afecto. Muchos heliostatos de gran tamaño utilizan cimientos de hormigón para brindar gran rigidez y a menor costo comparándolo con un cimiento de estructura metálica (Figura 33).

Frecuentemente se utiliza un cimiento de hormigón, una base sólida prefabricada para anclarlo al suelo o tornillos de conexión a tierra. También, se incluyen soportes para mejorar la estabilidad y que no se vea afectada su capacidad de seguimiento en condiciones desfavorables de viento.



Figura 33: Cimientos de hormigón para heliostatos.

Otro tipo de sujeción es cuando se unen más de un heliostato entre sí. Esto se hace con barras metálicas, pero para heliostatos que no presenten gran tamaño, de esta manera se asegura un movimiento uniforme para el conjunto completo del campo de heliostatos, ver Figura 34.

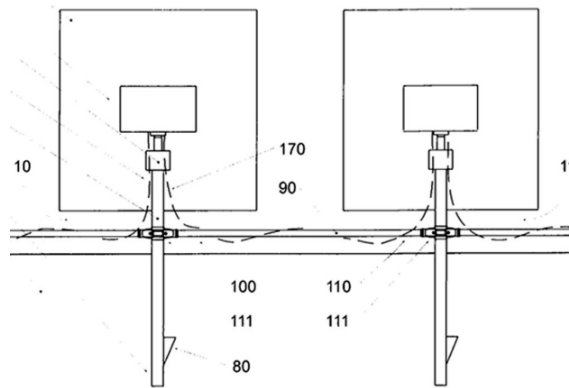


Figura 34: Esquema explicativo para unión de más de un heliostato mediante tubos de acero.

2.4. Sensores y control de posición

El objetivo fundamental de un heliostato es redirigir la radiación solar sobre un punto fijo y localizado durante todo el día solar. Por consiguiente, el sistema de control de éste necesita saber con exactitud la orientación y posición de sí mismo y con esto

determinar las desviaciones y controlar a precisión su movimiento para reducir al mínimo el desfase. Para realizar el sistema de seguimiento de un heliostato se puede llevar a cabo de dos formas distintas, ya sea con un sistema de lazo abierto o lazo cerrado. A continuación, se describe un poco más acerca de estos sistemas de seguimiento²⁰.

2.4.A.- Lazo abierto (Open Loop)

Un dispositivo con rastreador solar de lazo abierto utiliza el controlador en base a los datos de su estado actual y su algoritmo del sistema, es decir, va leyendo información propia de parámetros predeterminados. Este tipo de bucle es utilizado para predecir por completo el movimiento del sol por lo que necesita de un algoritmo que sea cargado en su memoria con los parámetros que se requieran para saber la posición exacta del sol, como lo son la ubicación geográfica, hora del día, estación del año, entre otros que se explicarán más adelante.

Tiene como ventaja que es un tipo de seguimiento solar más simple en temas económicos para ser implementado en sistemas con seguimiento solar. Sin embargo, requiere de un extenso y arduo trabajo para crear un algoritmo correcto. A su vez, tiene la desventaja de que no toma los datos de salida del proceso que controla, por lo que no es capaz de corregirse a sí mismo mientras el sistema está en funcionamiento y conlleva a que este tipo de programación no sea recomendable para su aplicación en sistemas que estén propensos a errores ya que implicaría un gran esfuerzo sólo para volver a calibrar.

2.4.B.- Lazo cerrado (Close Loop)

A diferencia de su contraparte, es un sistema que se basa en principios de control con retroalimentación, reciben señales de entrada a través de sensores (por ejemplo, fotorreceptores) que detectan la posición solar. Es decir, se debe instalar un sistema que pueda captar la intensidad de los rayos solares para que el equipo pueda recibir información en su controlador como señales de entrada, las cuales una vez procesadas producen señales de salida para reorientar el heliostato hacia la nueva posición del sol.

En la industria se utiliza comúnmente sistemas de lazo cerrado ya que estos sistemas tienen menos margen de error y se limitan sólo a las dificultades que puedan presentar el juego o desfase que presente el ensamblaje del heliostato, la precisión de medición de sus sensores retroalimentadores y el control del mecanismo motriz.

²⁰ Walter Nsengiyumva and others, 'Recent Advancements and Challenges in Solar Tracking Systems (STS): A Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, April 2017 (2018).

Estos sensores ópticos cuando están muy bien alineados hacen que el heliostato dirija sus movimientos de forma que su punto central, que también es representado por el vector normal del heliostato [N], coincida con el punto central entre el receptor [R] y el Sol [S], cómo se muestra en la Figura 35.

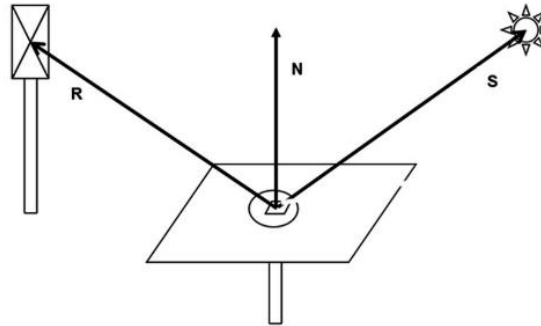


Figura 35: Esquema explicativo de principio de sistema de Lazo Cerrado.

Existe otro proceso que no toma en cuenta si el sistema de seguimiento solar que se emplea en los heliostatos corresponde a lazo abierto o lazo cerrado. Pero es de igual manera muy importante para el correcto desempeño de los equipos y corresponde a la calibración de los heliostatos.

2.4.C.- Calibración

El estado del arte de los métodos de calibración de un heliostato es la técnica de medir el perfil de flujo de radiación reflejada por este mismo. Para ello se utiliza un objetivo de calibración, el cual consiste en una cámara y un objeto blanco y plano para medir la distribución de irradiancia. Con esto es posible determinar la orientación del heliostato y la calidad del espejo utilizado, a continuación, se presenta la Figura 36 en donde se puede apreciar los patrones de irradiancia que entrega un heliostato.

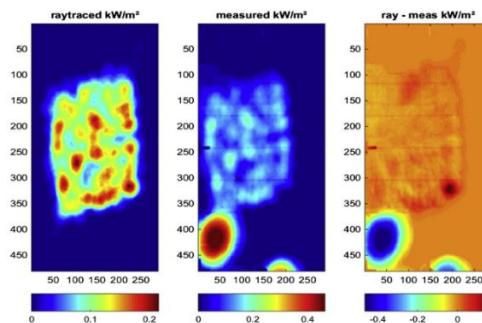


Figura 36: Representación de la calibración de un heliostato²¹.

²¹ Andreas Pfahl and others, 'Progress in Heliostat Development', *Solar Energy*, 152 (2017).

2.5. Sistema mecánico

Una de las subfunciones que más costos genera en el diseño, producción y puesta en marcha de los heliostatos que hoy en día se presentan en la industria, corresponde al sistema mecánico o motriz encargado de ejecutar la acción de dar el movimiento al panel reflector y que su sistema de seguimiento solar funcione correctamente. Ahora, este sistema se compone de dos elementos importantes:

- Sistema de fuente de alimentación.
- Sistema de transmisión mecánico.

Los sistemas de fuente de alimentación también se componen por dos distintos tipos:

- Motores electromagnéticos rotativos.
- Actuadores hidráulicos.

Para estos casos, los motores electromagnéticos son un tanto más económico y con mayor rango de aplicabilidad, ya que normalmente sirven tanto para accionar bajas y altas cargas. Sin embargo, cuando se trata de proyectos con campos de heliostato de gran envergadura, lo más común es encontrarse con sistemas de actuadores hidráulicos. Por ejemplo, la planta de SPT en España que posee heliostatos de $138,7 (m^2)^{22}$, presenta accionamiento con actuadores hidráulicos en cada uno de ellos, como se puede observar en la Figura 37.

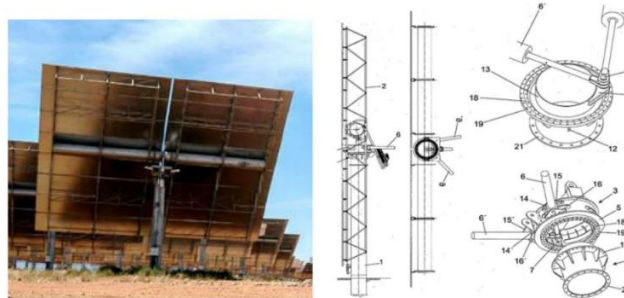


Figura 37 : Central ASUP 140, Abengoa. Heliostatos con accionamiento hidráulico.

Por otra parte, para los sistemas de transmisión se tienen diferentes opciones, a continuación, se nombrarán algunas de ellas:

- Engranaje helicoidal.
- Engranaje recto.
- Husillo.
- Engranaje de cadena.
- Accionamiento de cabrestante.

²² Andreas Pfahl and others, 'Progress in Heliostat Development', *Solar Energy*, 152 (2017).

➤ Piñón y ruedas de fricción.

Actualmente, algunos desarrolladores apuntan a que incorporar sistemas de accionamiento lineal en sus dos ejes pueden ser potencialmente más económicos y sin perder capacidad de movilidad del heliostato en su proceso de seguimiento solar (Figura 38).

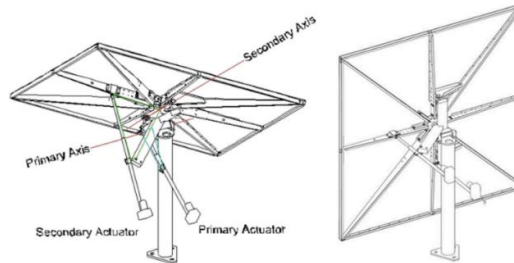


Figura 38: Esquema de heliostato con accionamiento lineal en ambos ejes.

3. Efectos ambientales para considerar

Chile presenta una de las áreas dentro del planeta Tierra con mayor índice de radiación solar, por lo que se hace altamente interesante la instalación de proyectos en base a energía limpia obtenida a través de la energía solar. Principalmente, es el norte de Chile donde se podría hallar el mayor beneficio en la explotación de plantas de energía solar concentrada. Sin embargo, es en su mayor parte una zona árida y desértica que está siempre afectada por eventos naturales particulares de estas zonas. Por ejemplo, las tormentas de arena y la alta presencia de partículas de arena y polvo en el aire.

Estos eventos pueden producir efectos secundarios no deseados sobre las instalaciones de energía solar y reducir notablemente su rendimiento. Para el caso aplicado de la utilización de heliostatos, estos efectos ambientales provocan suciedad y abrasión en los espejos del equipo²³.

La suciedad en equipos solares como paneles y espejos corresponde a cuando se deposita sobre su superficie arena y polvo. Algunos estudios plantean que las variables que contribuyen a la acumulación de polvo son las siguientes:

- Temperatura
- Velocidad del viento

²³ A. Peinado Gonzalo, A. Pliego Marugán, and F.P. García Márquez, 'A Review of the Application Performances of Concentrated Solar Power Systems', *Applied Energy*, 255.March (2019).

- Dirección del viento

También, se plantea una clasificación para estos parámetros influyentes en la degradación de un espejo. Esta clasificación corresponde a parámetros:

- Climáticos: Velocidad del viento, Dirección del viento y Humedad.
- Geológicos: Tamaño de partícula, Distribución de formas y Dureza.

Dentro de esto se confirma que la velocidad del viento tiene una correlación con respecto a la cantidad de arena o polvo transportado y que el porcentaje de humedad también afecta directamente al porcentaje de partículas que se adhieren a la superficie de un equipo. Las mismas investigaciones que estudian la deposición de polvo en espejos solares y que realizaron sus estudios en plantas solares instaladas en desiertos y otras en lugares zonas costeras cercanas al mar, concluyen que la pérdida de reflectancia debido a la suciedad de un espejo puede variar entre el 15% y 30%, lo cual es efectivamente dañino para el rendimiento esperado.

La erosión corresponde a la falla mecánica de un material debido al efecto de abrasión debido a otro elemento que produce rozamiento y desgaste sobre la superficie. Por lo tanto, la abrasión en espejos de plantas de energía solar concentrada ocurre debido al impacto de partículas de arena o polvo abrasivas en su superficie, en la Figura 39 se muestra algunos ejemplos de estos problemas. Los investigadores mediante diversos estudios plantearon que finalmente la erosión de un espejo depende de:

- Velocidad del viento
- Ángulo de impacto de la partícula
- Masa de partícula que impacta

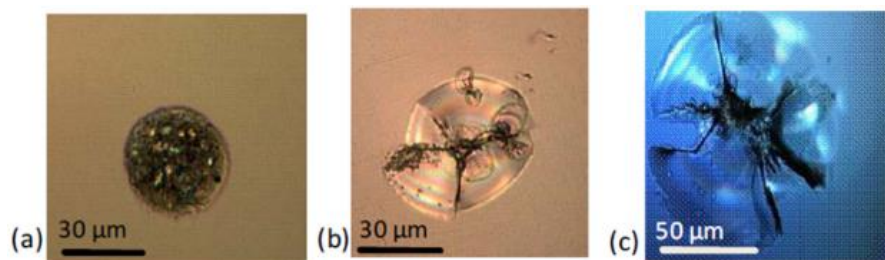


Figura 39: Daño en superficies. a) Zona desértica, b) Zona Oceánica, c) Estudio de laboratorio²⁴.

Resultando así una correlación entre la degradación de los espejos y las masas de arena que impactan, también que el área dañada y la reducción de la reflectancia del espejo

²⁴ A. Peinado Gonzalo, A. Pliego Marugán, and F.P. García Márquez, 'A Review of the Application Performances of Concentrated Solar Power Systems', *Applied Energy*, 255.March (2019).

dependen de la velocidad de las partículas al momento del impacto, mientras que el ángulo de impacto sólo afecta la morfología del daño.

En modo de síntesis de estas problemáticas, las fallas en los equipos de plantas de energía solar concentrada que estén ligadas a la aparición de polvo y erosión son una variable para considerar dependiendo de la ubicación en donde esté situado el proyecto. La diferencia principal entre la suciedad y la erosión es que la segunda presenta daños irreversibles en un espejo y provoca pérdidas de reflectancia que serán permanentes. Sin embargo, a pesar de la degradación irreversible provocada por la erosión, no hay medidas específicas para su mitigación.

Finalmente, se advierte que es mejor tener una consideración de estos efectos ambientales en el lugar de emplazamiento de un proyecto a gran escala ya que son los factores que tarde o temprano pueden provocar disminución del rendimiento esperado o calculado que plantean las bases técnicas de éste. En cuanto al efecto que puede producir el viento sobre los ejes mecánicos de un heliostato puede ser un estudio prescindible para este caso en particular, ya que el lugar de instalación del proyecto corresponde a un laboratorio ubicado en una zona que no representa un alto flujo de corrientes de viento y los mecanismos motrices utilizados son lo bastante robustos para soportarlas. De igual manera, más adelante se presenta la memoria de cálculo para comprender las cargas máximas que puede soportar un equipo en función de sus especificaciones y componentes mecánicas.

4. Primer prototipo de heliostato construido

Existe un primero prototipo elaborado por un estudiante de la Universidad Técnica Federico Santa María que desarrolló su trabajo de título en base a la construcción de un primer heliostato con materiales de fácil adquisición y que pueda generar un sistema de seguimiento solar en dos ejes.

A continuación, se presenta cada una de los elementos y partes que compusieron este primer prototipo de un heliostato.

4.1. Espejo reflectante

El sistema reflectante de este prototipo consistió en la unión de paneles de plumavit para formar una plancha plana de 1 (m^2) a la cual mediante adhesivo se adhirió una lámina reflectante marca 3M, como se muestra en la Figura 40. Esta plancha lleva una serie de arreglos con tubos de PVC para ser ensamblados a la base estructural del heliostato.



Figura 40: Espejo reflectante del primer prototipo.

4.2. Soporte estructural

Esta parte fue fabricada con dos subsistemas, una estructura móvil superior y el pedestal base. A continuación, se detallarán brevemente.

- ***Estructura móvil superior:***

Corresponde a una estructura T formada por tubos PVC y partes de material plástico que fueron elaboradas mediante impresión 3D, en la Figura 41 se puede ver un diseño 3D. Donde la parte horizontal de esta estructura alberga un arreglo de eje y rodamiento, acoplado por un lado a un sistema de engranes, el cual será el encargado de suministrar el movimiento Cenital mediante el ensamblaje de un motor stepper (motor paso a paso), y por el otro lado, lleva incorporado una tapa de plástico impresa para entregar estabilidad y soporte al conjunto.

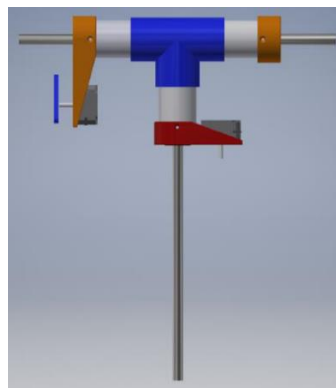


Figura 41: Diseño 3D de estructura móvil superior del primer prototipo.

Por otra parte, en posición vertical se acopla el sistema que suministra el movimiento Azimutal, conformada también por un arreglo de eje y rodamiento y un sistema de sujeción con bujes para centrar y dar buen encaje al sistema, a su vez, lleva acoplado una rueda dentada que será impulsada mediante el torque realizado por otro motor stepper. En la Figura 42 se puede evidenciar de mejor manera un diseño de esta estructura.

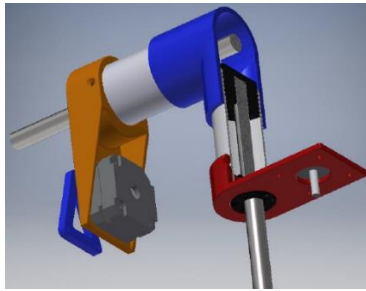


Figura 42: Diseño 3D en corte de estructura móvil superior del primer prototipo.

- **Pedestal base:**

Esta estructura es la encargada de dar el soporte a tierra de todo el heliostato, se construyó una base de acero tipo trípode con sus tres patas separadas en un ángulo de 120° cada una. En la punta de cada una de estas patas se insertó un nivelador compuesto por un perno y una tuerca para asegurar la estabilidad del heliostato. A la parte vertical de este trípode de acero se ensambla un tubo PVC que es parte de la estructura móvil superior y para corroborar la rigidez del sistema se incorpora un seguro mediante un perno que pasa a través de un agujero roscado en el trípode que aprieta y asegura el ensamblaje completo. En la Figura 43 se adjunta un diseño 3D explicativo.

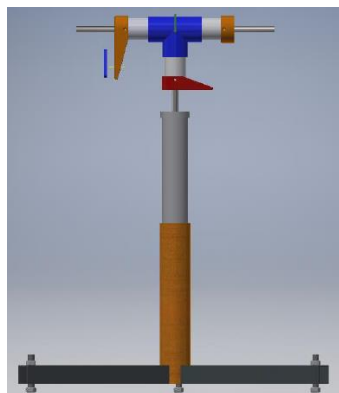


Figura 43: Diseño 3D del ensamblaje de la estructura superior móvil a pedestal base del primer prototipo.

4.3. Sistema mecánico

Para la construcción del sistema mecánico empleado en este primer prototipo, tanto para el movimiento Cenital y Azimutal, se utilizaron motores stepper (paso a paso) que son capaces de proporcionar un par motor de $1 \text{ (kgf} \cdot \text{cm)}$. Acoplado al eje de estos motores va inserto un engranaje de 46 dientes que mediante el torque del par motor impulsa un arreglo de engranajes distinto para cada eje de movimiento, como se muestra en la Figura 44.



Figura 44: Ensamblaje de sistema motriz del primer prototipo.

4.4. Sistema de seguimiento y control

El sistema empleado para realizar el seguimiento solar de este heliostato fue un sistema de lazo abierto, en donde el algoritmo se elaboró en función de fórmulas de heliotecnía, las cuales predicen la posición del sol y su vector de incidencia en base a la hora y ubicación geográfica en la que se encuentra instalado el heliostato.

Este sistema de seguimiento fue elaborado en el software de Arduino y se utilizaron los siguientes elementos para ser reproducido:

- Placa de desarrollo Arduino UNO: Controlador principal del sistema.
- Motorshield L293D: Placa que controla el movimiento de los motores.
- RTC DS1307: Dispositivo que entrega la hora al sistema (reloj digital)
- End/Stop Switch: Dispositivo de final de carrera.
- Breadboard: Placa utilizada para conectar el reloj a la placa de desarrollo.

4.5. Montaje completo del primer prototipo fabricado

Finalmente, el montaje de cada parte del primero prototipo del heliostato entregó la configuración que se muestra en las Figuras 45 y 46 a continuación:



Figura 45: Estructura móvil superior del primero prototipo ensamblada en conjunto del sistema mecánico y sistema de seguimiento.



Figura 46: Ensamblaje total del primer prototipo, previo a la puesta en marcha.

Una vez montado el equipo completo, se procede a realizar la puesta en marcha del heliostato en donde se obtuvieron los resultados esperados. El heliostato fue capaz de redirigir la radiación incidente del sol hacia un objetivo fijo durante todo un día solar de pruebas. Por consiguiente, cada uno de los subsistemas ejecutó su función como corresponde.

III) PRIMER PROTOTIPO PARA IMPLEMENTAR

Para esta nueva propuesta se establece que la disposición de los heliostatos será semejante a una planta de concentración solar con torre de energía solar (SPT) ya que de esta manera los heliostatos no requieren estar en altura. En la Figura 47 se muestra un esquema representativo de cómo se dispondrá de los equipos.

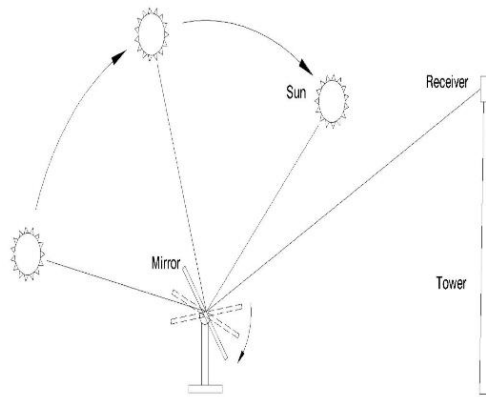


Figura 47: Disposición general de funcionamiento.

El receptor en este caso corresponde a un disco parabólico de 1,5 [m] de diámetro capaz de concentrar en su foco toda la radiación recibida por el campo de heliostatos para luego redireccionar esto a un reactor solar termoquímico. En particular, el objetivo final de este campo de concentración solar es que toda la radiación recibida en el reactor sea utilizada para gasificar combustibles sólidos.

Normalmente, se estima que la radiación incidente promedio es de $1.000 [W/m^2]$ y considerando, por ejemplo, un área efectiva de $4 [m^2]$ de un campo de heliostatos se considera que la potencia nominal es de $4.000 [W]$. No obstante, se debe tener en consideración la reflectancia del espejo a utilizar, usualmente esto es por sobre el 90%. Obteniendo así, una potencia neta que puede llegar a suministrar este campo de heliostatos de:

$$Potencia\ neta = 4.000 \cdot 0,9 = 3.600 [W]$$

Ecuación 14: Potencia neta para ejemplo de un campo de heliostatos de $4 [m^2]$.

Ahora, se entregan los detalles de cada uno de los componentes de la nueva alternativa de heliostato para conformar parte del campo de concentración solar.

1. Panel reflector y soporte estructural

Primeramente, se establece el uso de heliostatos con área superficial efectiva de reflexión de $1 [m^2]$ en donde cada uno de estos debe ser lo suficientemente estable y rígido. Sin embargo, no se puede descuidar el peso que presenten cada uno de sus componentes, y para este caso en particular se utilizarán planchas de acrílico de $5 [mm]$ de espesor marca *Induacril* y sobre ella será adherido minuciosamente una lámina reflectora marca *3M*. Con esto se puede asegurar que será un panel reflector liviano y con muy buen índice de reflectancia entregado por las láminas.

La fijación del panel corresponde a cuatro soportes T de aluminio que serán fijados en la parte posterior de éste mediante pernos M6. A continuación, en la Figura 48 se entrega un diseño 3D elaborado en Autodesk Inventor del soporte T para fijar el panel.

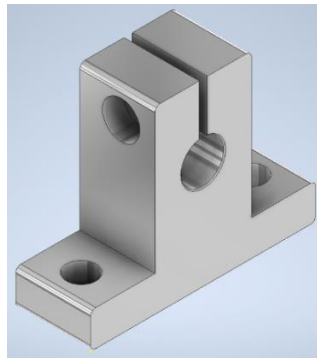


Figura 48: Soporte de aluminio tipo T para fijación de panel reflectante.

Además, por cada par de estos soportes se ensambla un eje de aluminio de $8 [mm]$ de diámetro y $230 [mm]$ de largo. Que, a su vez, cada uno de estos ejes lleva ensamblado en un solo extremo (interior) una copla de aluminio anodizado que permitirán la sujeción de la rueda dentada que forma parte del sistema mecánico de movimiento cenital. En la Figura 49 se observa el ensamblaje de estos ejes con las coplas de aluminio y una representación de la rueda dentada.

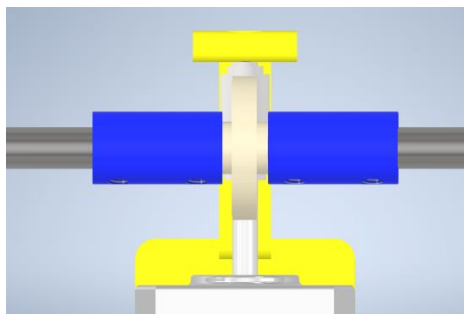


Figura 49: Acople entre ejes para sujeción de rueda dentada del sistema motriz cenital.

Además, en la Figura 50 se aprecia cómo se sujetarán los soportes T al panel reflector. Se entrega sólo una sección del panel diseñada en 3D para mejor visualización del diseño de dicho ensamblaje y sólo dos soportes T (interiores) en virtud de no entorpecer la representación.

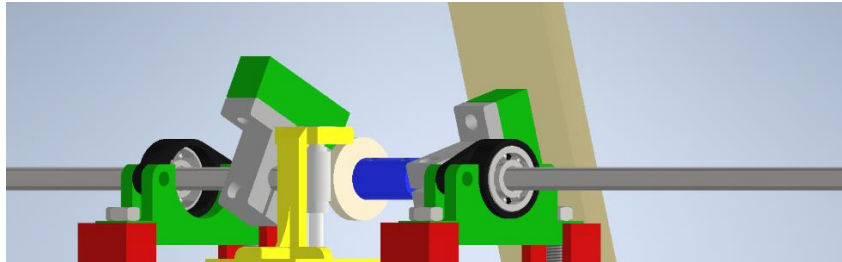


Figura 50: Representación 3D de soporte estructural de panel reflector.

Cabe mencionar que, para asegurar el correcto funcionamiento del movimiento cenital del heliostato, se incorporaron cuatro espaciadores impresos en 3D con material PETG, los cuales se logran evidenciar en la Figura 50 y están situados entre panel reflector y soportes T. De esta forma, al realizarle los rangos más extremos de movimiento en el eje cenital el panel reflectante no cause problemas de impacto con el conjunto que genera el movimiento y alberga al sistema mecánico, en la Figura 51 se puede visualizar el efecto que se quiere prevenir utilizando los espaciadores. Sin embargo, se debe tener en consideración que este diseño aún puede tener ciertos reparos futuros ya que no ha sido probado, y por esto es que con las dimensiones que ya posee el espaciador no permite que el panel durante su movimiento cenital inferior llegue completamente a la posición vertical.

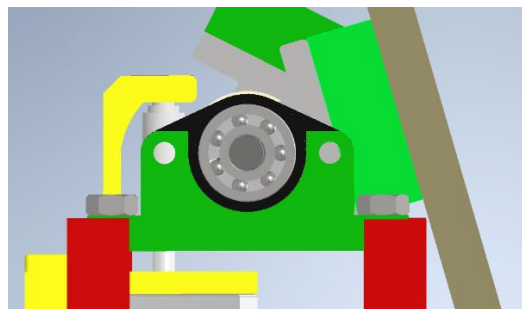


Figura 51: Representación 3D del beneficio que genera utilizar un espaciador para no limitar el rango de movimiento cenital.

Finalmente, la construcción de este subconjunto del heliostato conlleva la utilización de las piezas descritas en la Tabla 3:

Tabla 3: Listado de piezas para construcción de panel reflector y su soporte estructural.

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre de Pieza</i>	<i>Especificaciones</i>
1	Plancha acrílica	1 [m ²]
1	Lámina reflectante	1 [m ²]
4	Soportes T	-
2	Eje de aluminio	<i>Diámetro</i> = 8 [mm] <i>Largo</i> = 230 [mm]
2	Copla de aluminio	<i>Largo</i> = 25 [mm] <i>Diámetro</i> = 14 [mm]
2	Espaciador PETG	<i>Altura</i> = 15 [mm]
2	Rodamiento con soporte (negro)	<i>Diámetro_i</i> = 8 [mm] <i>Diámetro_e</i> = 22 [mm]

2. Pedestal y cimientos

Dentro del pedestal y sus cimientos se encuentran dos secciones:

- Sección móvil
- Sección fija o pedestal base

La diferencia de esto radica en que la sección móvil es la que se encarga de albergar cada uno de los componentes que cumplirán la función de realizar el movimiento cenital y azimutal del heliostato. Mientras tanto, la sección fija corresponde a la base que mantiene todo el heliostato estable con respecto al piso y se acopla mediante diferentes piezas a la sección móvil.

2.1. Sección móvil

Esta componente corresponde a un sistema estructural que se encarga de mantener el correcto funcionamiento del sistema mecánico, el cual permite el movimiento cenital y azimutal del heliostato. En grandes rasgos se trata de un subsistema que posee dos pisos, en donde el superior corresponde al que alberga los elementos del sistema de movimiento cenital, mientras que el piso inferior al sistema de movimiento azimutal. Cada una de estas piezas está previamente diseñada en consideración de las dimensiones de cada uno de los componentes del sistema mecánico.

En general, son 17 piezas las diseñadas para su próxima fabricación mediante impresión 3D con plástico PETG y la mayoría se ajustan entre ellas con pernos que

varían entre las medidas M4, M5 y M6. Además, se debe tener en cuenta que habrá otras piezas que se adquieren comercialmente como lo son los ejes de aluminio, rodamientos, soporte de rodamientos, entre otras.

El movimiento cenital del heliostato se ejecuta mediante la unión del panel reflector con la estructura a través de dos rodamientos que poseen un soporte para ser apernados, en la Figura 52 se puede apreciar el montaje de estas piezas. Donde cada rodamiento y su soporte poseen puntos de fijación hacia los ejes de aluminio del panel reflector y fijación hacia la estructura, correspondientemente. De esta manera, los ejes al estar sujetos al rodamiento y la estructura 3D (pieza verde) sujeta al soporte de estos (soporte negro), se permite el giro de los ejes con respecto al soporte anclado a la estructura, la cual se mantiene inmóvil.

Además, como fue mencionado, el soporte que permite el ensamblaje entre rodamiento y estructura es una pieza fabricada con impresión 3D que se acoplará mediante dos pernos M6 y es ajustable en altura con un arreglo de tuerca-contratuerca que se ajustan en la estructura fija (placa base del piso superior donde descansa motor cenital), ver Figura 52.

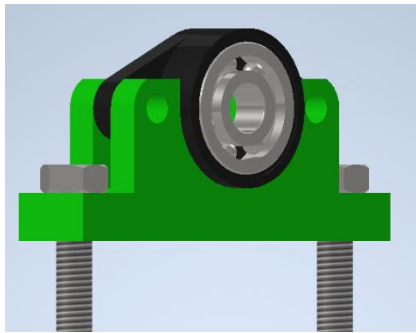


Figura 52: Representación 3D de soporte para sujetar rodamiento a estructura (verde) y soporte original con el que viene el rodamiento (negro).

Para poder ajustar el panel de forma horizontal y asegurar una buena sujeción y encaje entre corona y tornillo sinfín, correspondiente al sistema mecánico de movimiento cenital, la estructura posee un agujero estilo ranura por donde encajan los pernos M6 y se asegura mediante la misma tuerca y contratuerca. En la Figura 53 se observa este tipo de ensamblaje con mayor detalle y más adelante se entrega información acerca de la placa en donde están perforadas dichas ranuras.

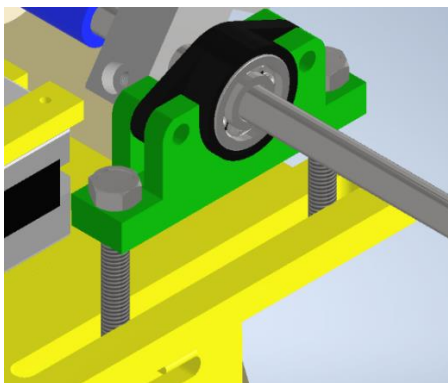


Figura 53: Representación 3D de ensamblaje entre sistema rodamiento-estructura.

A pesar de que con esto se intenta asegurar una sujeción entre los componentes móviles de la estructura base del espejo reflectante y la sección que permite el movimiento de todo el heliostato, se ha agregado cuatro piezas más impresas en 3D con material PETG, las cuales sirven para dar mayor firmeza a esta sujeción y además entregar un sistema de guía para la fijación de la Figura 53. De esta manera evitar colapsos debido a alguna eventual inestabilidad del sistema, para poder comprender mejor esta explicación se adjunta la Figura 54 en donde se ve el ensamblaje de estas nuevas piezas.

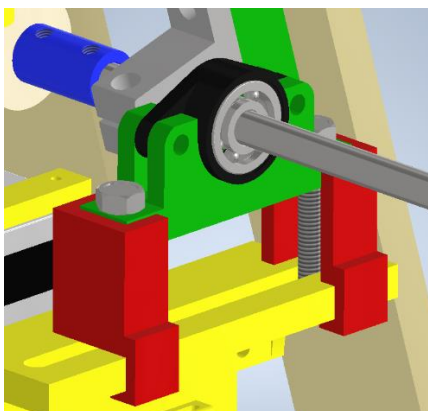


Figura 54: Representación 3D de ensamblaje piezas guía para rodamientos que permiten la sujeción cenital.

Para el ensamblaje del motor paso a paso que genera el movimiento angular del tornillo sinfín cenital, se establece que el motor se posicione de forma vertical, sujetando éste a través de dos piezas. La primera estará apernada entre la placa base de esta sección, proporcionando una sujeción posterior del motor. Mientras tanto, la segunda pieza está ensamblada por sobre el stepper y posee cuatro agujeros para incluir los cuatro pernos de 3 [mm] que el motor utiliza por defecto, esta misma pieza además se extiende verticalmente y están calculadas sus dimensiones para que el tornillo sinfín quede a contra presión y se pueda instalar su rodamiento en la parte superior. Por lo tanto, queda

restringido cualquier movimiento que pueda tener el motor. En la Figura 55 se representa el diseño y ensamblaje de las piezas descritas.

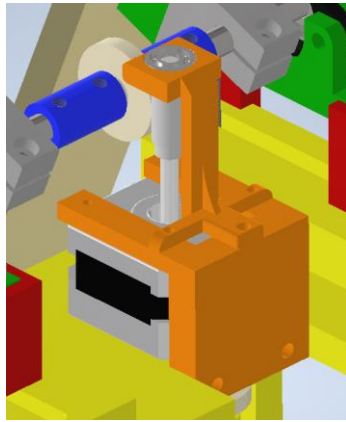


Figura 55: Representación 3D de ensamblaje piezas que sujetan el sistema motriz cenital, ambas se destacan con color naranja.

Ahora, el piso inferior correspondiente al lugar donde se establecen las componentes del sistema mecánico encargadas de generar el movimiento azimutal posee una placa base en donde descansa un motor paso a paso y en el enfrente y posterior de éste se cierra mediante dos piezas más que hacen función de tapas que presentan agujeros para fijación y una copla de posición regulable para situar el rodamiento de descanso del tornillo sinfín, ver Figura 56.

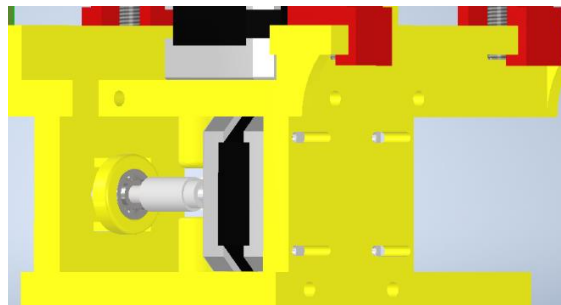


Figura 56: Representación 3D de ensamblaje subsistema que genera el movimiento azimutal del heliostato

A esta placa base donde descansa el motor azimutal se le diseña una perforación por donde pasará un eje de aluminio y por debajo de ella se ajusta el eje de manera perpendicular con otro sistema de rodamiento con soporte, apernando el soporte a la placa mientras que el rodamiento se fija al eje. Permitiendo así, el giro de la estructura con respecto al eje vertical fijo. Se puede comprender de mejor manera este tipo de ensamblaje en la Figura 57.

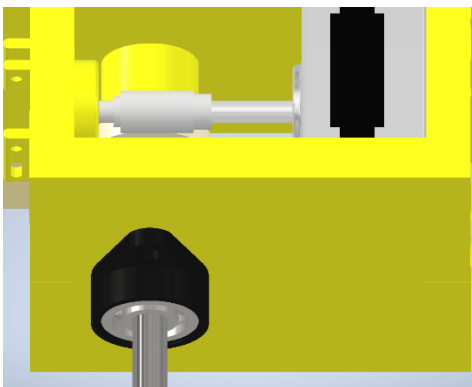


Figura 57: Representación 3D de ensamblaje de eje y rodamiento inferior para generar movimiento aimutal.

Para mantener una correcta fijación del eje de aluminio vertical, existe una placa impresa en 3D que hace de separación entre el piso superior (cenital) y piso inferior (azimutal), denominada *Placa Media*. A esta placa se le inserta otra pieza diseñada en 3D para que el extremo superior del eje de la corona encargada de propiciar el movimiento azimutal al heliostato descansa con un rodamiento y así se logre una correcta alineación del eje vertical. A continuación, se presenta la Figura 58 en donde se evidencia la descripción de este ensamblaje, en donde la placa media se presenta de color azul para ser identificada de mejor manera.

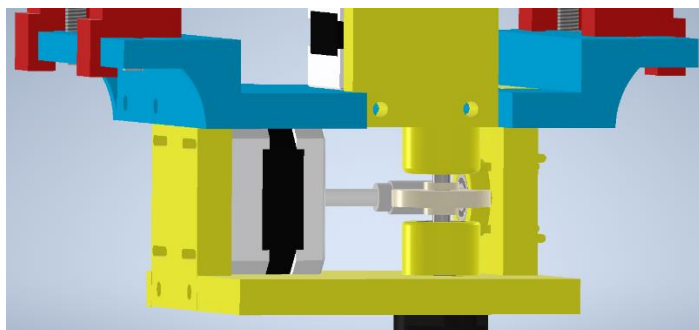


Figura 58: Representación 3D de placa media descrita.

Para la construcción de este subconjunto del heliostato son necesarias las piezas descritas en la Tabla 4.

Tabla 4: Listado de piezas para construcción de estructura que permite movimiento del heliostato

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre de Pieza</i>	<i>Especificaciones</i>
17	Piezas PETG	[-]
1	Rodamientos con soporte	$Diámetro_i = 8 [mm]$ $Diámetro_e = 22 [mm]$
12	Perno M5	[-]
4	Perno M6	[-]
1	Perno M4	[-]
1	Perno M3	[-]
1	Eje de aluminio	$Diámetro = 8 [mm]$ $Largo = 230 [mm]$
1	Copla de aluminio	$Largo = 25 [mm]$ $Diámetro = 14 [mm]$

2.2. Sección fija o pedestal base

Para este caso en particular, se utiliza un conjunto de diseño similar al utilizado en el primer prototipo de heliostato ya elaborado. En donde se fabrica una base tipo trípode con perfiles cuadrados de acero para establecer el correcto equilibrio y posible fijación del heliostato al suelo que posee una sección vertical donde dentro de ella se inserta un tubo PVC. En la Figura 59 se observa un diseño 3D de cómo se plantea este pedestal.

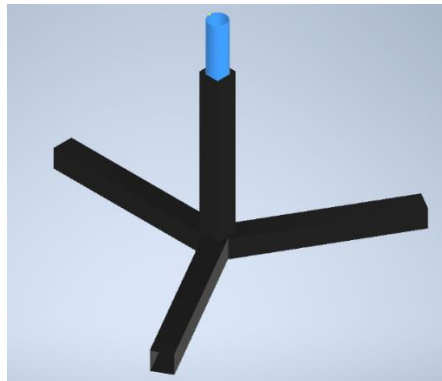


Figura 59: Representación 3D de pedestal base.

Además, para fijar este pedestal al conjunto del equipo previamente descrito se hará mediante dos piezas también impresas 3D. Una sirve de guía para que el eje de aluminio vertical siempre se mantenga centrado con respecto al centro del tubo PVC y la otra va

inserta por dentro del tubo sujeta firmemente mediante cuatro tornillos y en ella descansa el extremo inferior del eje de aluminio. En la Figura 60 se muestran ambas piezas mencionadas.

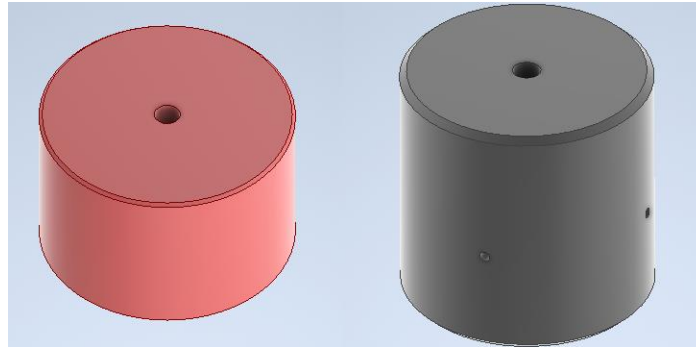


Figura 60: Representación 3D de piezas de soporte para ensamblaje de heliostato a su estructura pedestal. En rojo se presenta la guía y en gris el descanso del eje.

Para llevar a cabo la fabricación de este subconjunto se necesitarán los elementos que se incluyen en la Tabla 5.

Tabla 5: Listado de piezas para pedestal base del heliostato

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre de Pieza</i>	<i>Especificaciones</i>
2	Piezas PETG	[-]
1	Tubo PVC	<i>Diámetro = 75 [mm]</i> <i>Largo = 900[mm]</i>
1	Perfil cuadrado acero	80x80x2 <i>Largo = 2700 [mm]</i>

3. Sistema mecánico

Es este subsistema el cuál será el encargado de propiciar los movimientos Cenital y Azimutal del heliostato. Para este diseño propuesto se utilizarán los mismos componentes para cada uno de ambos movimientos. Es decir, se utilizarán dos modelos idénticos de motor paso a paso y dos modelos idénticos de sistema de transmisión.

Los motores para utilizar corresponden a dos stepper nema 17, la idea de seguir implementando este tipo de motores es que se caracterizan por su precisión en los movimientos que genera, en donde recibe pulsos eléctricos y los transforma en movimientos angulares precisos, por ejemplo, en base a su ficha técnica se puede saber cuántos pasos generan una revolución completa del motor y de esta manera saber cuántos son los grados por paso que es capaz de entregar. En la Figura 61 se entrega

una vista de aquellos motores. Este modelo de stepper en particular generan un par motor de 0,28 [Nm] y entregan 200 pasos por revolución.



Figura 61: Referencia de un motor paso a paso nema 17.

Estos motores son de fácil control, son motores bipolares ya que poseen dos bobinas que normalmente reciben la nomenclatura de bobina A y bobina B. Siempre poseen cuatro cables de salida en donde se separan de a pares y dos de ellos comandan la bobina A y el otro par la bobina B. Si una bobina se energiza el motor gira en un sentido y cuando cambia de bobina gira en el otro, esto debido a que las bobinas inducen un campo magnético y el rotor que posee un imán concéntrico se alinea con el campo de las bobinas y de esta manera se controla su sentido de giro. Para ser conectado simplemente se necesita de un multímetro en donde se debe hacer puente entre pares de los cuatro cables de salida que tiene el motor, cuando el multímetro marque continuidad entre dos de ellos significa que esos cables provienen de una de las bobinas y deben ser conectados juntos.

Ahora, para el sistema de transmisión se utilizarán un mecanismo de tornillo sinfín y corona. Se debe mencionar que para usar este tipo de transmisión se necesita que los ejes de movimiento sean perpendiculares entre sí y por ello el diseño anteriormente descrito sobre “Sección móvil” se planteó de esa forma. En la siguiente Figura 62 se evidencia una foto real del sistema de transmisión que se utilizará.

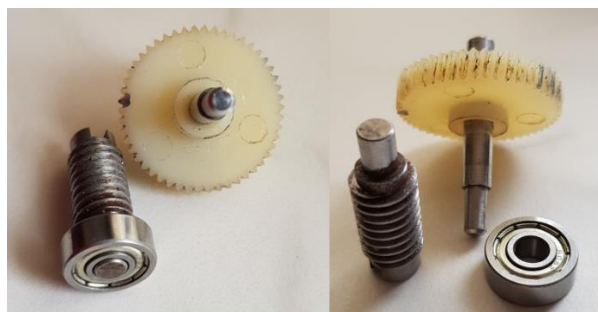


Figura 62: Sistema de transmisión sinfín-corona.

Se utilizan dos piezas en estos sistemas de transmisión, aquellas se desprenden de su propio nombre, un husillo sinfín que posee un dentado helicoidal y un engranaje circular o corona.

Particularmente, la ventaja de utilizar un tornillo sinfín es que se obtiene una alta reducción de velocidad y se no se necesita un gran espacio para albergarlo. Su relación de transmisión es muy baja ya que el tornillo se considera cómo una rueda dentada de un solo diente con rosca helicoidal. Con esto se puede deducir que la relación de transmisión del sistema tornillo sinfín-corona se expresa en la Ecuación 15.

$$i_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{26}$$

Ecuación 15: Relación de transmisión 1, tornillo sinfín y corona.

Esto quiere decir que para la rueda dentada de 52 dientes, el tornillo sinfín deberá dar 26 vueltas para que la rueda dentada realice una revolución completa ya que éste posee doble entrada. Finalmente, se demuestra claramente que si se posee un sistema de transmisión cómo éste se puede lograr una reducción de velocidad considerable con respecto a lo que se puede lograr con un conjunto de ruedas dentadas que, además, ocupan un espacio físico para su implementación mucho mayor.

En cuanto a la cantidad de grados por paso que puede realizar este sistema, el motor es capaz de entregar 200 *pasos/rev* de forma estándar y esta variable no se puede alterar para este tipo de steppers, entonces la cantidad de grados por paso o resolución del sistema mecánico en conjunto del sistema de transmisión queda expresada por la Ecuación 17.

$$\text{Resolución} = \frac{360^\circ/\text{rev}}{200 \text{ pulsos}/\text{rev}} = 1,8^\circ/\text{rev}$$

Ecuación 16: Resolución stepper nema 17.

En la Tabla 6 se entregan los componentes necesarios para implementar el sistema mecánico completo.

Tabla 6: Listado de piezas para sistema mecánico

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre de Pieza</i>	<i>Especificaciones</i>
2	Stepper Nema 17	$\text{Torque} = 0,28 \text{ [Nm]}$ $200 \text{ steps}/\text{rev}$
2	Husillo sinfín y corona	$Z_{\text{corona}} = 50 \text{ [dientes]}$ $i = 1:50$
2	Rodamientos	$\text{Diámetro}_i = 5 \text{ [mm]}$ $\text{Diámetro}_e = 14 \text{ [mm]}$

4. Sistema de control y posición

Este punto comprende explicar cómo se realiza el principio de reflexión óptica que deben realizar los heliostatos y sobre qué componentes utilizará para llevar a cabo este seguimiento solar.

Cabe destacar que en base los puntos presentados en la sección 8.4, los heliostatos utilizarán un sistema de seguimiento de lazo abierto (Open Loop). En donde se utilizarán todas las fórmulas de movimiento solar aparente presentadas en la sección 6. Con ellas se acepta el hecho de que el movimiento solar es un movimiento ampliamente estudiado a lo largo del tiempo y del que se puede tener información de su ubicación en función de una serie de conceptos, variables y ecuaciones que ya han sido expresadas.

Para la aplicación de este prototipo diseñado y en base a los elementos mecánicos a utilizar, se deben emplear los mismos elementos electrónicos descritos en el prototipo base desde donde comienza este trabajo, en el punto 4.4 de la sección II se entregó una breve reseña de estos, ahora se procede a dar una breve explicación de ellos.

El primer y más importante dispositivo es la placa Arduino Uno, ver Figura 63. Gracias a esta placa se puede controlar todo el movimiento del heliostato, ya que a través de Arduino que utiliza lenguaje de programación C++ es que se carga el código de seguimiento solar. Posee 14 pines de entradas/salidas digitales y 6 pines de entrada de señal analógica. Para ser programado se debe conectar mediante una entrada USB y si necesita energizarse con un voltaje mayor al que entrega un computador tiene una entrada Jack de alimentación que admite un transformador AC-DC.



Figura 63: Controlador “Arduino UNO”.

Ahora, esta placa controladora no posee un sistema de reloj. Por consiguiente, se utiliza un módulo de memoria de reloj en tiempo real, también conocido como RTC (Real-Time Clock), ver Figura 64. Acepta conexión mediante los pines del Arduino y la idea de utilizar esto es que presenta la lectura horaria de manera autónoma ya que utiliza

una pila como sistema de alimentación. Esto además es un beneficio, ya que aunque el Arduino se encuentre desenergizado el reloj seguirá operando y continúa con su lectura. Utilizar este dispositivo también asegura que no es necesario adquirir una placa controladora más sofisticada y por ende más costosa.

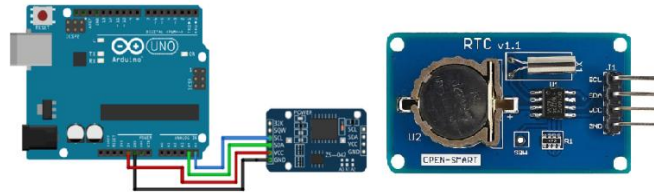


Figura 64: Esquema de conexión e imagen referencial de RTC.

Para controlar los motores paso a paso se puede hacer de dos maneras, la primera es conectarlos mediante sus cuatro cables de salida directamente al Arduino y segundo, se puede utilizar una Motor Shield V1 que corresponde a una placa controladora que permite controlar hasta dos motores paso a paso de corriente continua. Utilizando esta placa se puede controlar de manera más práctica la velocidad y sentido de giro de los motores, además Arduino posee una librería propia para utilizar un Motor Shield que hace que la elaboración de un código sea mucho más accesible. En la Figura 65 se puede apreciar este dispositivo.

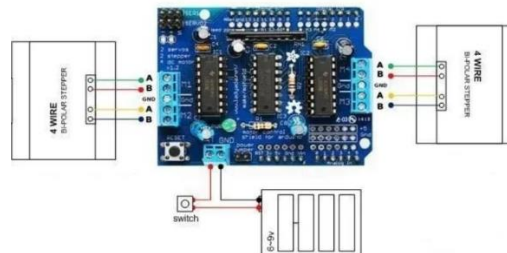


Figura 65: Esquema de conexión de Motor Shield y dos motores stepper.

Otro dispositivo para utilizar corresponde a los interruptores de final de carrera, estos son actuadores que, una vez pulsados o no, envían una señal eléctrica al controlador de Arduino y según su código empleado generará cierta acción que haya sido programada. Para este caso los interruptores se utilizan para entregar un “set” del punto de partida de cada motor e indicar cuando debe empezar a correr el programa completo. Un final de carrera no es más que un switch On/Off que entrega una señal a través de pulsos eléctricos, para mayor referencia ver Figura 66.



Figura 66: Interruptor final de carrera.

Finalmente, ya mencionados todos los elementos electromecánicos que se utilizan para realizar el seguimiento solar, queda un solo elemento que no corresponde a un dispositivo que envíe señales o procese información. Esto es una Protoboard o Breadboard, ver Figura 67. Esto representa una placa de pruebas para Arduino, que posee conexiones eléctricas internas y sirve para conectar distintos tipos de componentes sobre ella. Es aplicable para este caso ya que se necesita una extensión de conexión para poder instalar el reloj RTC.

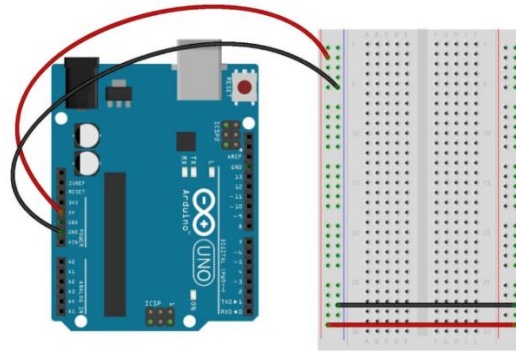


Figura 67: Esquema de conexión de Breadboard y Arduino.

4.1. Principio óptico de funcionamiento aplicado a los equipos

En base a todo el principio descrito en el punto 1 de la sección II, se plantea cómo se realizará el seguimiento solar de los equipos a utilizar de los que trata este trabajo. Para ello se debe destacar que los heliostatos se dispondrán mirando en dirección Norte y contrario a ellos, mirando hacia el Sur, se instalará el disco concentrador parabólico.

Entonces, se plantean los dos ejes de seguimiento, Cenit y Azimut. Los cuales a lo largo de todo el día solar deben descomponer los ángulos de variación solar y hacer que el vector normal a la superficie del espejo coincida siempre con el vector de bisectriz. Este vector realizará el trabajo de que los ángulos de radiación incidente y

radiación reflejada sean iguales y así mantener la radiación enfocada en el concentrador durante el día solar.

4.1.A.- Reflexión de radiación cenital

Los parámetros que se establezcan futuramente sobre las dimensiones, disposición y alturas exactas de elevación de todos los equipos que comprende el proyecto de energía solar concentrada son variables para definir luego de establecer el funcionamiento y operación de los heliostatos.

Antes que todo, se realizarán pruebas del equipo con un objetivo específico distanciado un par de metros más delante de él y sin elevación. Dentro del código de seguimiento solar se establecen las medidas suficientes para que, al momento de variar la altura del objetivo, α_{target} , con respecto a la horizontal se pueda sólo insertar esta variable y el equipo continúe operando. Es decir, por el momento existe un ángulo de elevación de $\alpha_{target} = 0^\circ$, pero una vez instalado el concentrador se podrá ajustar este valor directamente en el código de seguimiento solar.

Ahora, el vector bisectriz del movimiento cenital, α_{st} , se calculará en base a las Figura 68. En esta figura es donde se muestra la posibilidad de que el sol, dentro de un momento de su recorrido solar, esté situado por sobre el heliostato y otro momento en que esté por debajo de éste. Se debe destacar que la medición de cada ángulo (α_{st} , α y α_{target}) se realiza con respecto a la horizontal que nace desde el punto medio del espejo.

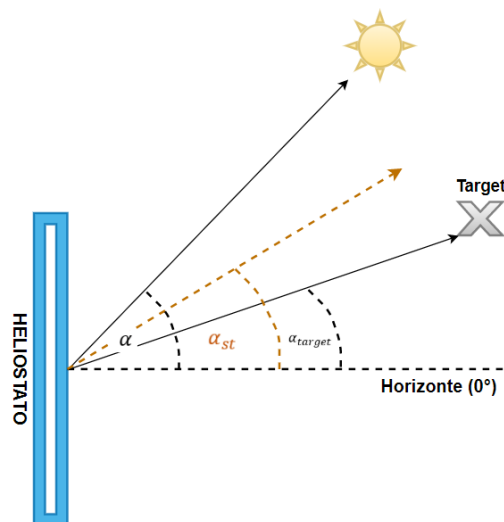


Figura 68: Esquema para obtener bisectriz cenital α_{st} . a) Caso en que el sol se encuentra debajo del objetivo, b) Caso en que el sol se encuentra sobre el objetivo.

Por consiguiente, se plantean las ecuaciones 17 y 18 para obtener α_{st} :

- Caso a):

$$\alpha_{st} = \alpha + \frac{\alpha_{target} - \alpha}{2} = \frac{\alpha + \alpha_{target}}{2} [^\circ]$$

Ecuación 17: α_{st} para caso a)

- Caso b):

$$\alpha_{st} = \alpha_{target} + \frac{\alpha - \alpha_{target}}{2} = \frac{\alpha_{target} + \alpha}{2} [^\circ]$$

Ecuación 18: α_{st} para caso b)

Finalmente, se observa mediante estas ecuaciones que el cálculo de la bisectriz para el movimiento cenital será el mismo para ambos casos.

Tomando en cuenta que existe la posibilidad de direccionar los heliostatos en dirección Sur y que contrario a ellos, en dirección Norte, estará el disco concentrador. Se establece la Ecuación 19, la cual plantea el cálculo de la bisectriz cenital para redirigir la radiación hacia el Sur.

$$\alpha_{st\ SUR} = \frac{180 - \alpha + \alpha_{target}}{2} [^\circ]$$

Ecuación 19: α_{st} para caso en que heliostato se direcciona hacia el Sur.

4.1.B.- Reflexión de radiación azimuthal

Al igual que el caso anterior, el movimiento en el eje azimuthal se realizará una toma de pruebas con un solo objetivo enfrente. Cómo también fue explicado, el equipo estará direccionado hacia el Norte y su objetivo hacia el Sur. Con esto, se entiende que el ángulo de desviación entre el equipo de prueba y el objetivo será $z_{target} = 0^\circ$. Sin embargo, también estará contemplado en el código la posibilidad de cambiar esta variable sin que ocurran cambios en el correcto desempeño de los heliostatos.

Luego, el vector bisectriz del movimiento azimuthal, z_{st} , se puede calcular con ayuda de la Figura 69. Para este caso se representa un solo esquema que regirá para el recorrido del sol durante todo el día solar.

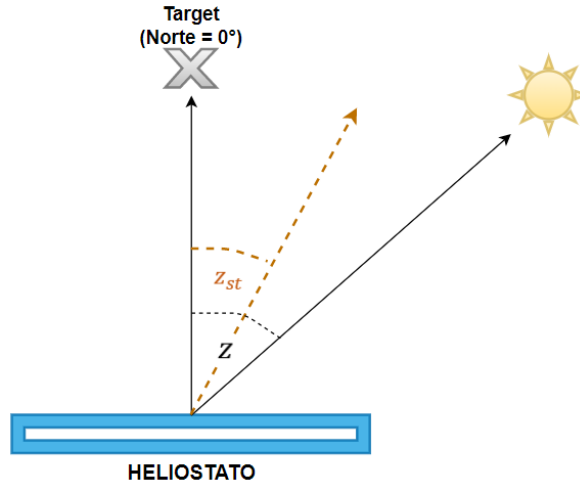


Figura 69: Esquema para obtener bisectriz azimuthal.

En base a esto, se plantea la Ecuación 20 que permitirá el cálculo de la bisectriz azimuthal.

$$z_{st} = \frac{Z + Z_{target}}{2} = \frac{Z}{2} [^\circ]$$

Ecuación 20: z_{st} , bisectriz azimuthal

Existe el caso en que el objetivo, concentrador parabólico, se encuentre desplazado cierta cantidad de grados con respecto al centro del heliostato ($Z_{target} \neq 0^\circ$). Si así fuese la situación, el cálculo de la bisectriz para el movimiento azimuthal se puede expresar según las ecuaciones 21 y 22.

$$z_{st} = \frac{Z - Z_{target}}{2} + Z_{target} = \frac{Z + Z_{target}}{2} [^\circ]$$

Ecuación 21: z_{st} , bisectriz azimuthal para los casos en que el objetivo se encuentre desviado hacia la derecha o izquierda del heliostato y el Sol se encuentre con un ángulo $Z > z_{st}$

$$z_{st} = \frac{Z + Z_{target}}{2} [^\circ]$$

Ecuación 22: z_{st} , bisectriz azimuthal para los casos en que el objetivo se encuentre desviado hacia la derecha o izquierda del heliostato y el Sol se encuentre con un ángulo opuesto a Z_{target} con respecto de la vertical

Finalmente, se vuelve a encontrar una igualdad en estas ecuaciones. Por lo tanto, para cualquier desviación angular que presente el objetivo con respecto al heliostato, se puede utilizar la misma expresión.

Es importante mencionar que para los casos de direccionar los heliostatos al Sur significa dar un giro de 180° , por lo tanto, las ecuaciones de bisectrices azimutales se mantienen bajo la misma expresión de las ecuaciones 21 y 22. No obstante, esta vez cuando comience el día solar el equipo deberá avanzar hacia el lado contrario azimutal, por lo cual se debe tener mucho cuidado con esto y cambiar el sentido de giro de los motores y de su conteo de paso para estos casos.

5. Cálculo de fuerzas que soporta el equipo

Una vez instalados los equipos, las fuerzas estáticas generadas por las cargas de su propia composición no son realmente un problema de estudio, ya que dentro de la etapa de diseño se debe tener en cuenta las dimensiones suficientes para que los equipos no fallen y se vean expuestos a esfuerzos desmedidos que lo lleven a la fatiga.

Un heliostato tampoco está expuesto a que alguien genere cargas sobre éste mientras ellos están operando, ya que son dispositivos programados para que funcionen de manera autónoma con sus elementos descritos. Sin embargo, posee un par de consideraciones que se deben tomar en cuenta una vez que ya es instalado un equipo como estos. Algunas de estas fueron mencionadas en el punto 3 de la sección II.

En particular, en este punto se busca obtener las máximas cargas que pueda soportar el equipo mediante los torques que se generen cuando se aplica cierta fuerza en alguna parte del espejo reflectante, ya que, si aquí se ejerce una fuerza mayor a la admisible fallará el sistema motriz del heliostato y puede quedar fuera de servicio.

Para este prototipo diseñado, se tiene que el par de torsión que es capaz de ejercer el heliostato en cada uno de sus ejes está dado por el producto entre el torque nominal que entrega cada motor, que en estos casos es el mismo, y la relación de transmisión del juego sínfin-corona (ver Ecuación 22).

$$M_{total} = M_{stepper} \cdot i_1 = 0,28 \cdot 26 = 7,28 [Nm]$$

Ecuación 23: Par de torsión máximo que pueden ejercer los motores (Nema 17).

Evidentemente esto corresponde a un par de torsión bastante elevado para tratarse de motores y un sistema de transmisión tan pequeños. Sin embargo, esto corresponde a los casos más favorables del par de torsión que puede entregar un motor paso a paso ya que su torque varía según su velocidad angular, ya que a medida que mientras mayor velocidad, menor torque entrega un motor paso a paso. A pesar de esto, para este caso, los motores trabajan a una velocidad muy baja por lo que este valor de torque resulta bastante certero. Para calcular las fuerzas que soporte se tomará un valor 7 [Nm] ya

que es ineficiente tomar el caso más favorable para el equipo y este nuevo valor corresponde alrededor del 95% del torque máximo a generar.

Cómo se pudo ver en las especificaciones y figuras del equipo descrito, el heliostato posee el panel reflector centrado con respecto a su estructura que soporta los sistemas mecánicos, por lo que estimar que las cargas desconocidas máximas que puede soportar se encontrarán a $\sim 0,5 [m]$ aproximadamente (ya que el panel es de $1 [m] \times 1 [m]$). Con esto, haciendo un balance de momentos simples en el centro del equipo se puede estimar la carga. En la Ecuación 24 se puede revisar este cálculo.

$$\sum M_{centro} = 0 : M_{total} = F_{carga} \cdot 0,5$$

$$F_{carga} = 14 [N]$$

Ecuación 24: Balance de momento para obtener carga azimutal a soportar.

Estos cálculos se pueden interpretar como la fuerza que puede soportar el sistema azimutal al presentarse una corriente de viento directamente sobre el espejo reflectante y donde éste se encuentre en posición vertical mirando directo hacia el Norte, es decir, se entiende como el caso más exigente para este sistema.

Sin duda esto es una carga muy alta para soportar para un equipo como éste. El heliostato se ha diseñado y se desea fabricar con la mayor parte de sus piezas en plástico PETG, por lo que se recomienda que una vez fabricado y puesto en marcha se realicen pruebas de carga para verificar si estos cálculos se asemejan a la realidad.

IV) SEGUNDO PROTOTIPO PARA IMPLEMENTAR

La primera etapa de este trabajo consistía en realizar un nuevo diseño de heliostatos en función del primer prototipo ya elaborado. Se logró verificar con ese primer equipo que la utilización de motores paso a paso y sistemas electrónicos como Arduino y sus elementos eran lo suficientemente útiles para un proyecto de prototipado como este caso, en donde por primera vez se implementaba un heliostato y en base a elaboración propia.

Principalmente, la idea era generar un diseño y prototipo replicable con el que se pudiesen experimentar distintos tipos de configuraciones y rediseños, por ello se presentó la nueva propuesta de diseño, capítulo 3. Ésta fue trabajada y presentada hasta la etapa que se expuso anteriormente. Sin duda, una vez fabricadas mediante impresión 3D no estaba exento a que existiesen inconvenientes, los cuales al ser un diseño propio podrían haberse solucionado luego de un par de intentos.

Dentro del desarrollo de todo este trabajo se presentó una oportunidad donde una empresa llamada B Bosh S.A quiso implementar un proyecto de energía solar dentro de su rubro de trabajo. No obstante, no tuvo buen desenlace y todo el trabajo elaborado por su equipo quedó abandonado dentro de sus instalaciones en su fábrica de galvanizado de Santiago. Este proyecto consistía, a grandes rasgos, en probar distintos tipos de heliostatos, de diferentes tamaños, soportes estructurales y sistemas motrices. De las pruebas realizadas por ellos no se tiene información alguna, así tampoco de su código de programación implementado.

B Bosh S.A llegó a un acuerdo con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María en donde ellos se comprometieron a entregar los heliostatos que desarrollaron a la universidad para ser aplicados dentro del proyecto en el que se trabaja. Fue entonces durante diciembre de 2019 en que un equipo perteneciente a la universidad asistió a las instalaciones de la empresa para retirar los equipos que ellos tenían instalados.

Estos heliostatos consistían en cuatro diferentes propuestas para redireccionar radiación solar incidente. Cada uno de ellos presentaba distintas características como ya fue mencionado. Sin embargo, tenían una similitud en común, todos usaban el mismo sistema de micro control, Arduino.

Una vez que el equipo encargado de retirar los heliostatos se presentó en el lugar, dio cuenta del estado de estos equipos, algunos presentaban muy buenas propuestas de fabricación y desarrollo. Aplicando ciertas mejoras a estos diseños propuestos se podría llegar a un buen concepto ya que sin duda estaban con varios desperfectos. Lamentablemente, además de algunos inconvenientes propios del diseño de los heliostatos, los efectos ambientales fueron otro problema ya que incidieron en grandes

deterioros en todos ellos, siendo sólo dos equipo los cuales pudieron retomar su funcionamiento después de varias pruebas realizadas y cambiando un par de piezas que luego serán detalladas.

Dentro de los cuatro heliostatos, dos de ellos presentaban fallas estructurales y de componentes gravemente dañadas como, por ejemplo, cajas reductoras reventadas y fatiga en sus sistemas estructurales que permiten el movimiento, además de zonas altamente corroídas. En la Figura 70 se puede evidenciar ciertos daños que presentaba uno de estos heliostatos. Cabe destacar que el otro no será especificado debido a su indisponibilidad por los graves daños que presentaba.



Figura 70: Daños de corrosión y fatiga estructural de heliostatos, equipo indisponible.

El tercer equipo corresponde a un heliostato con gran albergadura de espejos, ya que poseía cuatro espejos instalados con un área efectiva total cercana a $9 \text{ [m}^2\text{]}$ (ver Figura 71). Sin embargo, las grandes cargas a las que estaba sometida su estructura, la cual poseía el soporte estructural base al centro de los cuatro espejos, hizo un efecto de flexión en ambos extremos. Además, este equipo es el que presentaba un sistema motriz con los motores paso a paso más pequeños en comparación a los demás, ya que utilizaba un sistema de transmisión de husillo con rodamientos de bola para husillo deslizable, lo que permitía un gran aumento de par en su relación de transmisión.



Figura 71: Heliostato con cuatro espejos reflectantes con fenómeno de pandeo.

Este sistema de transmisión presentó complicaciones en los rodamientos de bola que utiliza, corresponden a un tipo de rodamientos difícil de adquirir y con medidas específicas. Estos rodamientos colapsaron y se agriparon, además de que cada husillo

que genera los movimientos de cenit y azimut también se encontraban corroídos. Para tener una mejor percepción de esto ver Figura 72.



Figura 72: Husillo y eje central de heliostato descrito.

Finalmente, el último equipo por presentar corresponde al diseño más estable y que no presentaba daños físicos considerables que provoquen la indisponibilidad de éste, ver en la Figura 73.

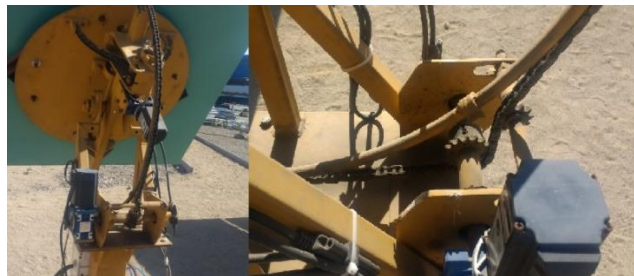


Figura 73: Estado inicial de heliostato.

A continuación, se explica detalladamente cada uno de los dos equipos que se implementaron definitivamente para el desarrollo de este trabajo. Se procede a entregar un detalle claro de cada uno de sus subconjuntos y los problemas asociados que tuvieron que ser reparados y/o reemplazados para retomar su funcionamiento.

1. Primer heliostato en implementación

Por consiguiente, se procede a explicar en los siguientes puntos de forma detallada cada uno de los elementos y subconjuntos que este último equipo presenta. También son incluidos los elementos que necesitaron reemplazo, mantención y estudio

general del funcionamiento de este equipo para, posteriormente, darle una nueva puesta en marcha.

1.1. Panel reflector y soporte estructural

El panel reflector inicial y con el cual se proceden a hacer todas las pruebas de funcionamiento de este equipo es un espejo de 1 [m²] con espesor de 3 [mm]. Como fue mencionado anteriormente, los espejos entre los 3~4 [mm] se caracterizan por ser los más utilizados en heliostatos de la industria solar ya que poseen muy buena reflectancia. Este espejo fue adherido mediante cinta adhesiva de doble contacto a un cuadro de acero que posee cuatro perfiles de acero tipo C soldados formando un rombo, ver Figura 74.



Figura 74: Cinta adhesiva doble contacto que permite adherencia entre cuadro de acero y espejo reflectante.

A través de cuatro placas de acero soldadas en cada vértice del rombo y mediante dos pernos por placa se elabora parte del ensamblaje del espejo al heliostato, ver Figura 75.



Figura 75: Primera parte de soporte estructural de espejo reflectante.

Por otro lado, este soporte adherido permanentemente al espejo se debe ensamblar directamente sobre el heliostato. Para ello, el equipo posee un disco de acero de

610 [mm] de diámetro que es parte de la estructura completa del equipo y tiene ocho perforaciones para sujetar el espejo, ver Figura 76.



Figura 76: Segunda parte de soporte estructural de espejo reflectante.

Cómo se puede ver la Figura 76 esta segunda parte del soporte estructural es una sección que está directamente acoplada a la estructura general del heliostato. Simplemente se trata de un ensamblaje slip-on que permite trabajar de mejor manera el espejo reflectante y el equipo sin necesidad de una adherencia permanente y un desmontaje más práctico.

1.2. Pedestal y cimientos

Siguiendo la misma lógica de definición en cuanto al pedestal y cimientos anteriores. En este caso, el equipo también posee una sección móvil diseñada particularmente para albergar lo que es el sistema mecánico y motriz. Mientras tanto, posee un soporte estructural fijo para sostener todo el equipo con un buen anclaje al piso.

De esta manera, se procede a separar este punto en dos subpuntos que consideran:

- Sección móvil.
- Sección fija o pedestal base.

1.2.A.- Sección móvil

Este es el subsistema que asegura la estabilidad al movimiento del heliostato, en donde cada uno de los ejes de movimiento tiene sus elementos instalados en esta sección.

Primeramente, el equipo llegó con fallas en ambos sistemas motrices, Zenit y Azimut. Donde presentaban discontinuidad en los movimientos que generaba y el sistema de

transmisión se encontraba agripado. Mayor detalle de esta problemática se entrega en el punto siguiente.

Principalmente este heliostato está fabricado en su totalidad de acero y el sistema cenital y azimutal son relativamente similares. Estos sistemas generan el movimiento a través de motores paso a paso de gran torque y cadenas de transmisión. Donde cada cadena recorre un semiarco de 180° y por encima de éste, se permanece fija la cadena de transmisión. Esto se puede observar de mejor manera en la Figura 77.

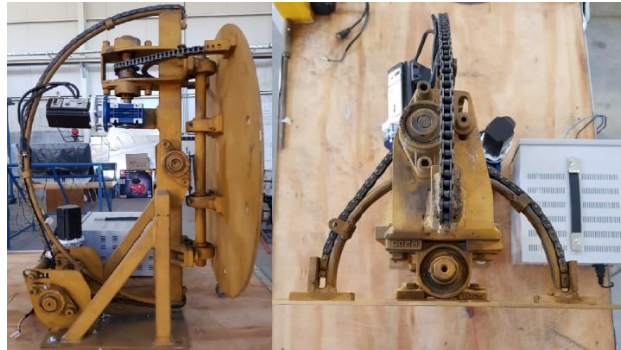


Figura 77: Presentación de sección móvil del heliostato. A la izquierda se evidencia sistema cenital y a la derecha sistema azimutal.

Ahora, teniendo una idea de cómo opera el equipo, se procede a explicar las partes y componentes que proporcionan los movimientos para llevar a cabo el seguimiento solar.

Esta sección del sistema de movimiento cenital se conforma principalmente por:

- Semicírculo de acero.
- Rodamientos FL204.
- Eje 1: Motriz cenital.
- Eje 2: Centro del heliostato.

El semicírculo de acero posee un diámetro de 720 [mm] y 180° de extensión en donde en su parte interior se une un perfil rectangular de acero para cerrar la sección. Este perfil está pivoteado justo en el centro a través del eje 2 de 22 [mm] de diámetro que lo une al subsistema de pedestal base, ver Figura 78 donde están identificados los ejes mencionados. El hecho de que se mantenga fijo mediante un eje y rodamientos justo en el centro hace que genere un movimiento uniforme y balanceado del sistema cenital, esto sin considerar aún el sistema mecánico, sistema de transmisión y peso de estos.

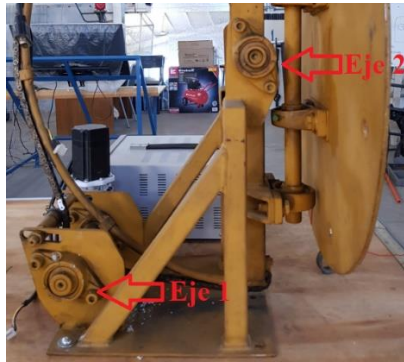


Figura 78: Identificación de ejes mencionados en estructura de movimiento cenital.

En la Figura 79 se observa que, en la parte posterior e inferior, a una distancia de 400 [mm] del perfil de acero, se encuentra el sistema estructural que alberga los componentes del sistema mecánico cenital. Esto se compone, principalmente, por dos rodamientos FL204 y un eje de 18 [mm] de diámetro y 230 [mm] de largo (eje 1). A un costado de éste, se encuentra un soporte de acero en donde se acopla el sistema mecánico y de transmisión del eje cenital.



Figura 79: Sistema estructural que mantiene estable todo el mecanismo de movimiento cenital.

Ahora, para describir la sección del sistema de movimiento azimutal se deben tener en cuenta los siguientes elementos:

- Semicírculo de acero.
- Rodamientos FL204.
- Rodamientos P205.
- Eje 3: Motriz azimutal.
- Eje 4: Centro azimutal.

En este caso, el semicírculo de acero es de 280 [mm] de diámetro y 180° de extensión, su parte interior está fija por completo al disco de acero de 610 [mm] de diámetro mencionado anteriormente. Este disco para poder moverse está conectado mediante dos rodamientos P205 al eje 4 de 25 [mm] de diámetro y 560 [mm] de largo, y este

eje ensamblado al perfil del acero que cierra el semicírculo de movimiento cenital con otros dos rodamientos P205, ver Figura 80.

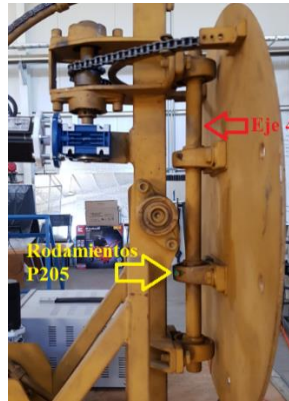


Figura 80: Sistema de ensamblaje entre eje 4.

Ahora, un poco más atrás del eje 4 se sitúa el ensamblaje de la estructura que mantiene estable las componentes motrices del movimiento azimutal. Para esto se utiliza el eje 3 que tiene un diámetro de 18 [mm] y 160 [mm] de largo. Además, otros dos rodamientos FL204 que permitirán el movimiento fluido de este eje. Par mayor referencia de esta parte ver la Figura 81.

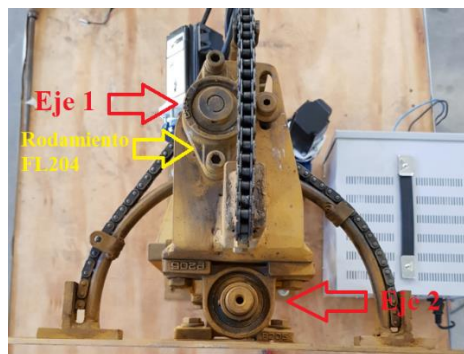


Figura 81: Identificación de ejes mencionados en estructura de movimiento azimutal.

1.2.B.- Sección fija o pedestal base

Al tratarse de un heliostato mucho más robusto que los anteriormente vistos y analizando su cantidad de componentes fabricadas en acero, además de que su propio sistema motriz es de mayor potencia y tamaño, es necesario un subsistema de pedestal que logre cumplir con una estabilidad indicada.

El heliostato descansa sobre una base de acero la cual se sujeta al eje 2, con ella van dos rodamientos FL204, esta base es tipo rectangular de 320x400 [mm] con seis agujeros para sujetarla mediante pernos. Esta base se ensambla sobre un pilar de acero

de 1100 [mm] de altura que a la vez trae otro juego de agujeros en su base para ser asegurado al piso, de esta manera se genera un sistema de cimientos bastante firme y capaz de aguantar el peso de todo el equipo. En la Figura 82 se puede apreciar de mejor manera este subsistema.

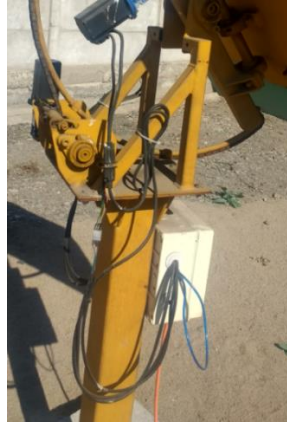


Figura 82: Subsistema de cimientos de heliostato.

1.3. Sistema mecánico

Una vez que ya se explicaron todos los detalles que componen el sistema estructural queda definir y detallar los elementos que componen el sistema mecánico que permiten ejecutar los movimientos cenital y azimutal del heliostato.

Se vuelven a utilizar lo que son los motores paso a paso (stepper), pero esta vez de mayor tamaño y potencia ya que la magnitud del heliostato también ha aumentado. Tanto para el movimiento cenital y azimutal se utilizan los mismos motores, correspondiente a un motor Nema 23, ver Figura 83. Estos motores al igual que los Nema 17, poseen por defecto 200 *pulsos/revolución* lo que significa que su resolución estándar de grados que puede avanzar por cada pulso que da se especifica en la Ecuación 25.



Figura 83: Motor paso a paso nema 23. Imagen corresponde a un motor defectuoso que se extrajo del heliostato de trabajo.

$$\text{Resolución Estándar} = \frac{360^{\circ}/\text{rev}}{200 \text{ pulsos}/\text{rev}} = 1,8^{\circ}/\text{rev}$$

Ecuación 25: Resolución de stepper Nema 23.

Sin embargo, el arreglo entre stepper y driver pueden setear, por defecto, un mínimo de pasos de 400 *pulsos/revolución* por lo que esta es la configuración a utilizar, lo cual se puede traducir a que el motor logra suministrar 0,9°/rev sin contar su caja reductora para el movimiento final del equipo. Y con caja reductora incluida la resolución de movimiento equivale a 0,03°/rev.

Sin embargo, estos motores advierten grandes ventajas por sobre los nema 17 comunes, ya que son motores bipolares con sistema de encoder, esto significa que poseen un sistema de control y genera una interfaz entre el movimiento mecánico del motor y los pulsos eléctricos que recibe. Por ello estos motores ya no funcionan sólo con cuatro cables de salida, sino que traen dos cables, cómo se muestra en la Figura 84.



Figura 84: Cableado de salida stepper nema 23.

Cómo se puede ver tienen un cable de comunicación (VGA) y un conector que posee cuatro pines de salida. Entre estos cables, el de comunicación suministra la información del encoder, mientras que el cable con cuatro pines se conecta para comandar las bobinas A y B del motor. Estos cables se conectan a un controlador o driver híbrido HSS57 que corresponde al intermediario entre el motor y el dispositivo que suministra la orden, y es gracias a éste que el motor presente grandes ventajas cómo:

- ✓ Utiliza tecnología de control de circuito cerrado (close loop). Esto permite evitar las pérdidas de sincronización del movimiento angular del motor y de su precisión.
- ✓ Permite reducir las pérdidas de torque cuando el motor trabaja a altas velocidades.
- ✓ Posee un control de corriente basado en la carga que necesite mover el motor, con esto evita el sobrecalentamiento del stepper y alarga su vida útil.

- ✓ Ofrece una serie de combinaciones para configurar los micropasos por revolución, ajustando de esta manera un movimiento angular más fino. Siendo la configuración más alta de 51.200 *micropasos / revolución*.
- ✓ Motor presenta un par de 2 [Nm] y corriente nominal de 4 [A] con un peak de 6 [A].

A continuación, en la Figura 85 se presenta el diagrama de conexión que debe seguir el controlador en función del cableado del motor, además de una imagen real del controlador utilizado.

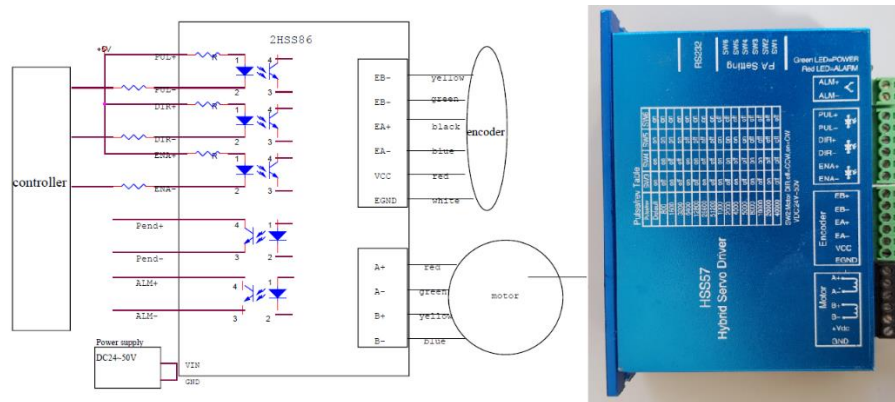


Figura 85: Diagrama de conexión del controlador (HSS57) y cableado del motor²⁵.

Este sistema de motor y controlador son alimentados mediante una fuente de poder que sea capaz de entregar voltaje dentro de 24~50 [V] continuos.

Los motores no se ensamblan directamente a cada eje de movimiento, sino que se acoplan a una caja reductora de velocidad o “worm reducer” mediante un juego de tres piezas impresas en material PETG, ver Figura 86.



Figura 86: Motor paso a paso ensamblado a caja reductora mediante piezas impresas en impresora 3D.

²⁵ Phase Hybrid and Stepper Servo, ‘HSS86 2-phase Hybrid Stepper Servo Driver’.

Esta reductora en su interior posee un juego de tornillo sinfín-corona y presenta una reducción de 1: 30, lo que significa que, por cada vuelta del eje motriz, ya sea cenital o azimutal, el motor paso a paso entregó 30 vueltas completas, ver Ecuación 26. Esto claramente permite un control muy preciso del movimiento generado y hace más fácil la manipulación y pruebas del heliostato minimizando los riesgos de falla. El torque generado de cada motor por sí solo es de 2 [Nm] y este se ve favorecido por la reductora de velocidad que puede aumentar el torque total generado.

$$i_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{30}$$

Ecuación 26: Relación de transmisión 2, tornillo sinfín y corona.

Cada eje de movimiento presenta un piñón en el centro de 17 *dientes* que, a su vez, impulsa a una cadena. Una vez que el motor transmite movimiento a la reductora de velocidad, el eje gira suavemente de manera auxiliar con el piñón fijo y éste genera movimiento del equipo a través de la cadena. En la Figura 87 se encuentra este tipo de sistema de transmisión para ambos casos.

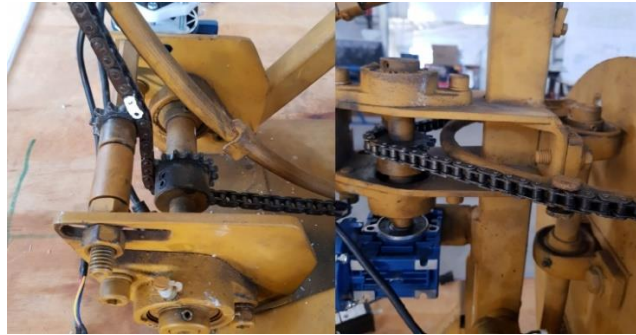


Figura 87: Sistema de transmisión para ejes cenital (izquierda) y azimutal (derecha).

Cómo es difícil mantener la tensión de la cadena a lo largo de todo el recorrido tiene instalado otro piñón que cumple el rol de tensor, éste es más pequeño y posee 10 *dientes*.

Para el sistema de movimiento cenital se emplea una cadena que recorre todo el semicírculo de acero y está anclada en cada uno de sus extremos, esta cadena tiene un total de 70 eslabones. Mientras tanto, para el movimiento azimutal se emplea otra cadena idéntica, pero esta vez mucho más corta ya que el semicírculo de este eje tiene un diámetro inferior, siendo una cadena de 28 eslabones que también está anclada a cada extremo.

1.4. Sistema de control y posición

Como ha sido mencionado y explicado en detalle anteriormente en este trabajo, los dispositivos a utilizar corresponden a un controlador Arduino y dispositivos electrónicos asociados a éste. Dentro del punto 4 de la sección III se entregó información acerca de los dispositivos utilizados, los cuales no difieren mucho para este caso.

En particular, para este heliostato no se utiliza una placa controladora Motor Shield, ya que ésta no sirve para controlar motores stepper nema 23. Por ello, cada motor posee su propio controlador que permite un control más preciso para este tipo de motores, las ventajas y detalles se entregaron previamente en la sección 21.

Finalmente, cada componente utilizado ya ha sido mencionado con anterioridad. Sin embargo, a continuación, se entrega un punteo sobre ellos:

- Placa controladora Arduino UNO.
- 2 driver HSS57
- Reloj en tiempo real RTC.
- 3 interruptores de final de carrera.
- Placa de pruebas Breadboard.
- Fuente de poder con capacidad de convertir corriente alterna a corriente continua (AC-CC) con voltaje de salida 24~25 [V].
-

1.5. Cálculo de fuerzas que soporta el equipo

Al igual que el diseño propuesto anteriormente, se realiza un cálculo estimativo de las fuerzas que podría soportar el heliostato, aplicadas en los puntos más extremos y donde se generaría el mayor par de torsión. Para este caso, los motores paso a paso entregan un par nominal correspondiente a 2 [Nm], el cual es el máximo par posible para entregar según las curvas de desempeño del stepper, en donde, a medida que la velocidad angular aumenta, su par de torsión disminuye. Sin embargo, la utilización de un controlador para cada uno de los motores hace que esta caída de torque no sea tan drástica en comparación con un motor de menor potencia. Las ventajas de estos motores están detalladas anteriormente. El par de torsión generado entre el sistema motriz y el sistema de transmisión del equipo queda expresado por la Ecuación 27.

$$M_{total} = M_{stepper} \cdot i_2 = 2 \cdot 30 = 60 [Nm]$$

Ecuación 27: Par de torsión máximo que pueden ejercer los motores (Nema 23).

Para el cálculo de esto, al tratarse de estructuras de mayor volumen y con materiales más pesados se calcula la fuerza tanto para el sistema azimutal y el sistema cenital. En la Figura 88 se aprecia una referencia de cómo se calcularán estas fuerzas.

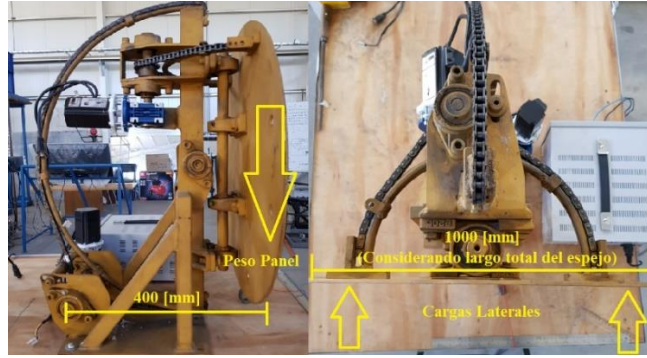


Figura 88: Referencia para cálculo de fuerzas. Izquierda: Cenital. Derecha: Azimutal.

Para el sistema cenital, el caso más drástico corresponde cuando el espejo se encuentra en posición vertical y donde toda la carga del espejo se compensa directamente con el par de torsión del sistema motriz cenital. Así también, para el sistema azimutal el caso en estudio es en la misma posición del equipo, pero esta vez con fuerzas aplicadas perpendicularmente sobre él. Ahora, en las Ecuaciones 28 y 29 se realiza el balance de momento con respecto a cada eje del sistema motriz. En este caso, se toma un par de torsión para cada motor capaz de ejercer el 90% del torque entregado en la Ecuación 26, que corresponde a 54 [Nm].

$$\sum M_{centro} = 0 : M_{total} = F_{carga\ cenital} \cdot 0,4$$

$$F_{carga\ cenital} = 135 [N]$$

$$Masa_{espejo} \approx 13,5 [kg]$$

Ecuación 28: Balance de momento para obtener carga cenital que puede soportar.

$$\sum M_{centro} = 0 : M_{total} = F_{carga\ azimutal} \cdot 0,5$$

$$F_{carga\ azimutal} = 108 [N]$$

Ecuación 29: Balance de momento para obtener carga azimutal que puede soportar.

Por lo tanto, para ser una estimación aproximada, las ecuaciones entregan valores bastante acordes a lo que se puede esperar de un equipo como este. No obstante, una vez programado el heliostato se debe tener consideración con la masa del panel reflectante y verificar que no hay mayor problema con mover una carga cercana a la calculada.

2. Segundo heliostato a implementación

Este equipo comprende el representado en la Figura 71, donde inicialmente contemplaba el uso de cuatro espejos obteniendo un área efectiva cercana a los 9 [m²] pero que tuvo problemas de flexión en su soporte estructural.

En los siguientes puntos se entrega un detalle más completo de cada uno de sus subconjuntos.

2.1. Panel reflector y soporte estructural

Para este heliostato se debió desestimar la configuración inicial de los cuatro espejos, que se puede ver en la Figura 89, debido a dos problemas:

- 1) Flexión de su soporte estructural debido al gran peso que significaba la masa de los espejos.
- 2) Dificultad de re-ensamblaje una vez que se desarmó el equipo para su transporte, donde no es recomendable volver a ensamblar una estructura de este tamaño debido al primer problema mencionado.



Figura 89: Soporte estructural inicial del panel reflector.

Por lo tanto, para este caso es necesario diseñar un nuevo soporte estructural base, el cual sea posible ensamblar a la estructura de la sección móvil cenital que permite el movimiento que se describe más adelante. Para el caso de las pruebas de funcionamiento sólo basta con hacer un arreglo temporal en donde se estampe un fragmento de espejo o se adhiera una lámina reflectante para comprobar el correcto desempeño del equipo.

2.2. Pedestal y cimientos

Manteniendo la misma descripción de subconjuntos ya establecida para los primeros dos prototipos con posibilidad de implementación, para este caso también se definen la sección móvil y la sección fija o de pedestal base, las cuales cumplen la función de albergar el sistema de movimiento motriz del equipo y los cimientos estructurales con el cual el heliostato se fijará al suelo, respectivamente.

2.2.A.- Sección Móvil

Este equipo presenta dentro de su sección móvil las piezas y conjuntos ensamblados para producir los movimientos en los ejes cenital y azimutal del heliostato. Las primeras observaciones no pudieron ser muy concluyentes ya que los sistemas motrices se encontraban inoperables debido a problemas que se detallan más adelante. Esto significaba que no se podía probar el equipo a través de sus sistemas de movimiento y se procedió a desarmar por completo.

Este heliostato, al igual que el anterior, está fabricado en su totalidad en acero, lo cual lo hace un equipo bastante pesado y difícil de manipular por una sola persona. Sin embargo, sus sistemas de movimiento cenital y azimutal difieren entre sí, ver Figura 90.

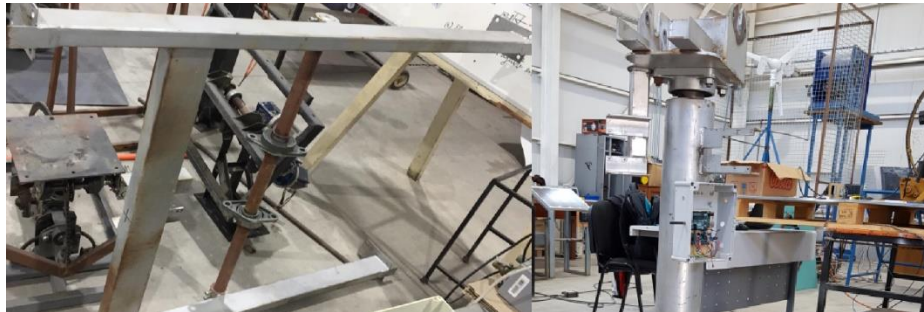


Figura 90: Sección móvil. A la izquierda se observa la estructura cenital y a la derecha el cabezal móvil azimutal.

La estructura de la sección móvil del sistema de movimiento cenital descansa sobre el cabezal que permite el movimiento azimutal con una estructura que posee un eje de acero transversal de 40 [mm] de diámetro, ajustándose a ella mediante cuatro pernos hexagonales métricos de 24 [mm] y dos rodamientos FL208 que permiten que el cenit se mueva con libertad sobre el cabezal. Por otro lado, el sistema azimutal plantea el uso de un cabezal móvil que se ensambla sobre un eje perpendicular de 90 [mm] de diámetro que proviene desde el pedestal base, su movimiento se lleva a cabo ya que en el descanso del cabezal se sitúan dos rodamientos F212 que proporcionan un giro en 360° del cabezal con respecto al pilar base, esto es sin conexión de sistema motriz ya

que en este caso se ve limitado el rango de movimiento, como se verá más adelante en la descripción de este sistema del heliostato. En la Figura 91 se aprecia el ensamblaje de ambos sistemas de movimiento.



Figura 91: Sistemas de ensamblaje para sección móvil cenital y azimutal.

Sin duda, este heliostato presenta un sistema de diseño más simplificado en comparación al anteriormente descrito y que se asemeja mucho más a lo que fue diseñado en 3D del primero prototipo, ya que sólo utiliza dos ejes de acero para realizar todo el movimiento (cenit y azimut) versus los cuatro ejes que posee el equipo anterior en donde se utilizan dos para cada sistema de movimiento.

2.2.B.- Sección Fija

Este equipo es bastante robusto debido a que desde el inicio estaba pensado para ensamblar una cantidad mayor de espejos. Por esto, es que su pedestal base es un pilar de acero circular de 150 [mm] de diámetro y con ocho perforaciones en su base para ser apernado al piso. Para asegurar de mejor manera el ensamblaje y la firmeza de estos cimientos, se elabora una estructura rectangular con perfiles cuadrados de acero para que, sobre ella, descante el pilar y se ajuste su apernadura. En la Figura 92 se aprecia el pilar y su arreglo base.

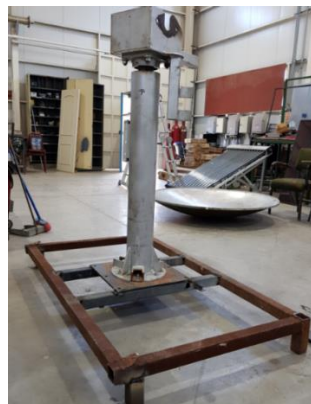


Figura 92: Sistema de cimientos de heliostato.

2.3. Sistema mecánico

Los sistemas principales que proporcionan los movimientos de seguimiento solar cenital y azimutal de este equipo son exactamente iguales. Donde cada uno de ellos cuenta con lo siguiente, ver Figura 93:

- Husillo de acero inoxidable SFU1605 con recorrido de útil de 500 mm y diámetro de 16 mm.
- Rodamiento de bolas para husillo.
- Caja de acero inoxidable que alberga al rodamiento de bolas.
- Acoplador para husillo.
- Motor stepper Nema 17 17HS19-1684S-PG100.
- Driver TB6600.

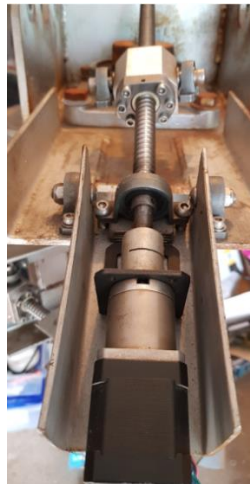


Figura 93: Sistema motriz idéntico para cada uno de los ejes de movimiento.

Como se puede ver, entre el eje del motor y el husillo se encuentra el acoplador, el cual permite la firme sujeción de estos dos ejes. El rodamiento de bolas permite el libre desplazamiento de éste a través del largo del husillo. La utilización de un sistema como este posee ventajas importantes en comparación al heliostato con sistema de transmisión por cadena ya que es mucho más rígido, más estable, permite mayor precisión, bajo nivel de ruido, y alta vida útil.

En la Figura 93 se representa el ensamblaje del sistema motriz principal. Sin embargo, falta agregar la conexión entre el controlador (driver) y el stepper, para este caso y debido al tipo de motor que se utiliza, no se puede implementar un driver con lectura de encoder ya que los motores no traen uno incorporado y esto hace que el driver sea un poco más simple en funcionamiento con respecto al HSS57. Sin embargo, este driver también posee ventajas similares al anterior, como:

- ✓ Soporta el ajuste de 8 niveles de corriente.

- ✓ Ofrece una serie de combinaciones para configurar los micro pasos por revolución, ajustando de esta manera un movimiento angular más fino. Siendo la configuración más alta de 6400 *micropasos / revolución*.
- ✓ Protección contra sobrecalentamiento, y cortocircuito.
- ✓ Reductor de calor mediante regulador de flujo de corriente.

La conexión entre el motor y el driver se realiza mediante los cuatro cables de las bobinas del stepper que se describen a continuación y se representa en el esquema entregado en la Figura 94:

- A+: Negro.
- A-: Verde.
- B+: Rojo.
- B-: Azul.

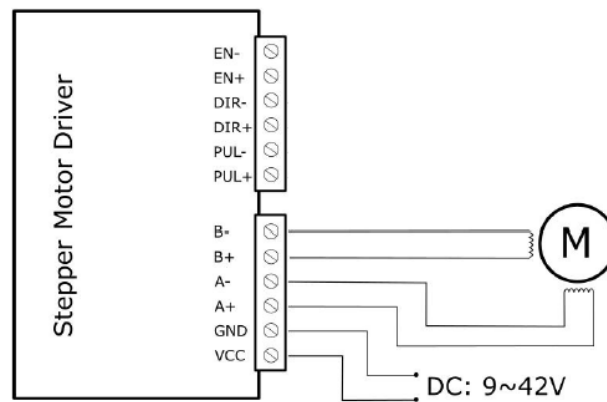


Figura 94: Diagrama de conexión del controlador TB6600 y motor paso a paso.

Este motor paso a paso presenta un par de 4 [Nm] y posee una caja reductora de engranajes planetarios de 1:100, lo que significa que, por cada 100 vueltas del eje del motor, el husillo dará una revolución completa y el sistema de rodamiento avanzará un paso del husillo. Además, necesita de una corriente nominal para su funcionamiento de 1,68 [A] con un voltaje de entrada para el controlador de 9~42 [V].

La relación de transmisión que entrega el motor está dada por la Ecuación 30.

$$i_3 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{100}$$

Ecuación 30: Relación de transmisión 3, motor stepper-reductora.

Debido a la gran capacidad de reducción del movimiento que entrega este juego de motor y su reductora es que la resolución de cantidad de grados por paso que se puede generar queda expresada en la Ecuación 31.

$$Resolución = \frac{360^{\circ}/rev}{200 pulsos/rev * 100} = 0,018^{\circ}/rev$$

Ecuación 31: Resolución final de movimiento para husillo conectado a motor stepper Nema 17 con caja reductora de 1:100.

2.4. Sistema de control y posición

Al igual que en el punto 1.4, Capítulo IV. El sistema de control y posición no será muy distinto, ya que, en consideración general, los sistemas de microcontrolador y sus dispositivos asociados no variarán entre las distintas propuestas. Para este caso particular, los componentes que se utilizan para el sistema de control y posición son:

- Placa controladora Arduino UNO.
- 2 Driver TB6600.
- Reloj en tiempo real RTC.
- 3 interruptores de final de carrera.
- Placa de pruebas Breadboard.
- Fuente de poder para convertir de corriente alterna a corriente continua con voltaje de salida de 24~25 [V].

2.5. Cálculo de fuerzas que soporta el equipo

El arreglo del sistema motriz de este equipo es un conjunto que se adquiere directamente con su motor paso a paso y el reductor planetario. A diferencia del caso anterior, en donde el motor y la caja reductora no son un conjunto que se comercialicen juntos directamente. Este nuevo motor Nema 17 posee un torque máximo de 4 [Nm] los cuales se ven directamente potenciados gracias a la reducción 1:100 que incorporan. Por lo tanto, para obtener un cálculo representativo del torque que entrega de este conjunto no es recomendable solo asociar el producto entre el torque nominal del motor con la relación de transmisión, ya que esto entregaría un par motor sobrevalorado y erróneo. Por esto, se establece un torque de trabajo entregado a partir de la curva de torque del conjunto (ver Figura 95).

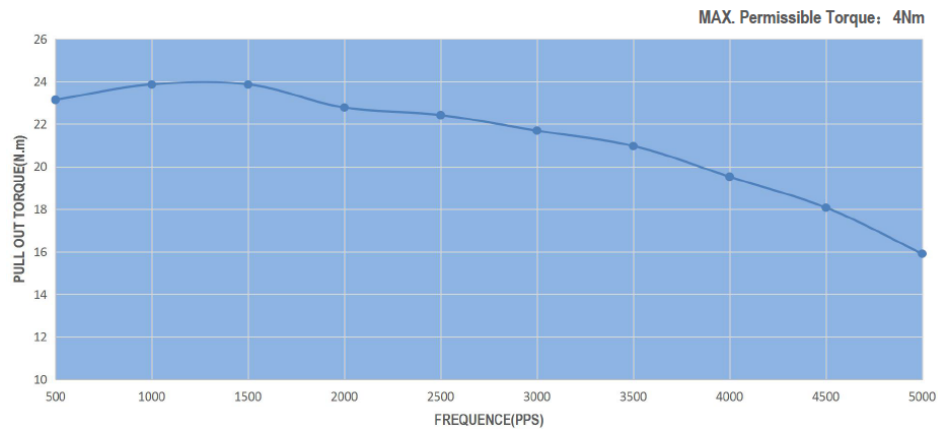


Figura 95: Curva de torque para motor Nema 17 con caja reductora con rodamientos planetarios.

En base a esto, el torque máximo que puede producir este conjunto es aproximadamente de 24 [Nm], mientras que, el torque más bajo se da alrededor de los 16 [Nm]. Por lo tanto, se establece que el promedio es una buena representación para estimar el cálculo de fuerzas que puede soportar este equipo. Cabe destacar que el torque es inversamente proporcional a la velocidad de trabajo con que trabaje el motor, por lo cual, a menor velocidad mayor es el torque generado.

En particular, este heliostato no cuenta con una estructura definitiva para ensamblar los espejos a utilizar y tampoco la cantidad de espejos o el tamaño que estos tendrán ya que serán parámetros de estudio y análisis cuando el campo de concentración solar en donde serán utilizados comience su proceso de puesta en marcha. Por lo tanto, se estimarán ciertas medidas aproximadas con las que es posible que opere este equipo. Sin embargo, antes se debe tener en cuenta cuáles son los puntos críticos de estudio o donde se verá más afectado el equipo en función de la ubicación de las cargas a las que se somete, en la Figura 96 se puede ver que hay cuatro flechas indicando puntos clave del equipo, en donde, al igual que se hizo anteriormente son los puntos más alejados del heliostato y bajo el supuesto de que las fuerzas perpendiculares que se ejerzan sobre él serán las de mayor problema. Las flechas color rojo representan las fuerzas perpendiculares que ejercerán mayor torque sobre el eje azimutal. Mientras tanto, las de color amarillo son aquellas que ejercen mayor torque sobre el eje cenital.

En la misma Figura 96, el equipo no se encuentra con espejos instalados, por lo tanto, la estimación de medidas es que desde el pilar central hacia los extremos laterales habrán 1,1 [m], mientras que desde el cabezal móvil hacia los extremos superior e inferior habrá 0,5 [m]. Con esto, se supone un espejo con área total efectiva cercano a los 2,2 [m].



Figura 96: Puntos en donde las fuerzas aplicadas son más críticas para la operación del heliostato.

Entonces, queda expresar la ecuación de torque para estimar las fuerzas que pueden causar problema y que superen el torque realizado por los motores. En las ecuaciones 32 y 33 se expresa el balance de momento para el eje cenital y azimutal considerando un momento total de 20 [Nm] (promedio según la curva de la Figura 95), respectivamente.

$$\sum M_{centro} = 0 : M_{total} = F_{carga\ cenital} \cdot 0,5$$

$$F_{carga\ cenital} = 40 [N]$$

Ecuación 32: Balance de momento para obtener carga cenital que puede soportar.

$$\sum M_{centro} = 0 : M_{total} = F_{carga\ azimutal} \cdot 1,1$$

$$F_{carga\ azimutal} = 18,2 [N]$$

Ecuación 33: Balance de momento para obtener carga azimutal que puede soportar.

Estas cargas son mucho menores en comparación a las cargas calculadas para el otro equipo implementado. Sin embargo, se estima que pueden ser datos que tengan mucha variabilidad en la práctica, ya que este equipo presenta una fabricación bastante rígida y estable y se debe tener en consideración que utilizar sistemas motrices con reductoras de engranajes planetarios posee grandes ventajas por sobre las reductoras que se emplean en el otro equipo (“worm reducer”). Tales como que al presentar mayor cantidad de dientes en contacto soporta y ejerce mayor par, su transmisión de par es más uniforme y minimiza el riesgo de desalineamiento de los engranajes, entre otras.

V) PUESTA EN MARCHA Y ANÁLISIS DE SISTEMAS

Tras la toma de decisiones en cuanto a qué equipos serían finalmente más viables de implementar, y en consideración de los tiempos de entrega y tiempos de implementación, es que se decide realizar la puesta en marcha de los dos últimos equipos estudiados. Esto debido a que son equipos más robustos y con mayores expectativas de durabilidad debido a todos sus subconjuntos y estructuras. Sin embargo, como se mencionó se debió hacer un análisis crítico sobre el correcto funcionamiento de los equipos y cuáles eran sus limitaciones más importantes, a su vez el sistema programable también invirtió un gran tiempo de estudio y trabajo para hacerlos funcionar como se esperaba.

1. Puesta en marcha del primer heliostato

Todo lo descrito anteriormente en cuanto a este equipo son definiciones de su sistema estructural completo y cómo se sustentan sus movimientos de azimut y cenit. Sin embargo, el heliostato presenta una serie de complicaciones desde que fue entregado al equipo de trabajo de este proyecto. Entre los diversos problemas, presentó:

- Sistema mecánico y de transmisión en mal estado.
- Motor paso a paso Nema 23 defectuoso.
- Sistema de acoplamiento entre motor y reductora mal diseñado e inoperable.
- Carencia de información alguna de los detalles del equipo (diseño, programación, ficha técnica de elementos mecánicos y eléctricos que lo componen, entre otros).
- Inestabilidad de su estructura.
- Sistema de tensado con problemas de diseño o montaje.
- Equipo diseñado para trabajar durante fracción del día solar y reflejando principalmente radiación hacia el norte.

Con el equipo instalado y comenzando a realizar las primeras pruebas de su puesta en marcha se encontró que uno de los ejes de movimiento no funcionaba. La avería provenía de un motor paso a paso defectuoso, se logró encontrar el problema una vez testeados los dispositivos desde lo general a lo más específico.

La inspección del cableado general del equipo fue lo primero en realizarse, luego, verificar el estado y funcionamiento de la fuente de poder. Más tarde, se revisó las conexiones entre motor, controlador y Arduino. Una vez conectado todo correctamente, se verifica el funcionamiento de los dispositivos cuando se energizan, aplicando un código de Arduino bastante simple para realizar una prueba a cada motor

y si gira de manera correcta hacia ambos sentidos, según lo que se ordene por programa. Con esto, y cada uno de los puntos chequeados, se concluyó que la avería provenía de la falla del motor stepper. La solución, se obtuvo desde el reemplazo del motor afectado a través de uno de los motores de los heliostatos que llegaron sin posibilidad de operación debido a sus fallas, extrayendo un motor paso a paso en buen estado.

El sistema de transmisión poseía corrosión y baja lubricación, lo que causaba que el movimiento de los ejes no fuese de la manera esperada. En la Figura 97 se aprecia el antes y después de haber realizado un proceso de limpieza y lubricación al sistema.



Figura 97: Antes y después de mantenimiento a sistema de transmisión del heliostato.

Luego de esto, el sistema pudo efectuar un movimiento en los ejes cenital y azimutal mucho más fluidos y ambos piñones (conductor y tensión) no presentaron problemas de trabamiento.

El ensamblaje que presentaban los motores a cada una de sus cajas reductoras era directamente a través de su eje. Mientras se operaban se observó la disfuncionalidad de esto, ya que los motores advertían vibraciones, sonidos como si estuviesen trabajando más exigidos y una vez que fueron desmontados se encontraron restos de metal en el lugar de acoplamiento. Esto era debido a que el agujero de la caja reductora donde encajaba el eje del motor era más grande y por ende había juego. Quienes montaron anteriormente este equipo elaboraron una camisa de aluminio para recubrir el eje del motor y aumentar así su diámetro, además, incluyeron una chaveta rectangular para restringir el deslizamiento del eje con respecto a la caja reductora, ver Figura 98.



Figura 98: Camisa y chaveta que se extrajeron de los motores y caja reductora.

La utilización de estos elementos generaba los problemas mencionados en el párrafo anterior, y fueron estos los que se fueron deteriorando y generaban restos de metal y que se deslizaran los ejes de los motores.

Para solucionar esto, se crearon en Inventor tres piezas que sustituirían la camisa y chaveta para proporcionar una sujeción firme y de mejor calidad. La primera pieza corresponde a una placa que se acopla solamente al motor a través de los 4 pernos que este posee para ser ensamblado a otro elemento (caja reductora en este caso), esta placa además posee otros 4 agujeros para que se sujete a la segunda pieza diseñada, una placa similar que, esta vez, se ensambla a la caja reductora. Asegurando de esta manera un buen diseño para estos dos elementos sólo falta la tercera pieza, un eje con cambio de sección que por un lado tiene un agujero para insertar el eje del motor y por el otro un eje con chaveta incluida. Estas piezas son impresas en impresoras 3D y en la Figura 99 se entrega la representación de ellas.

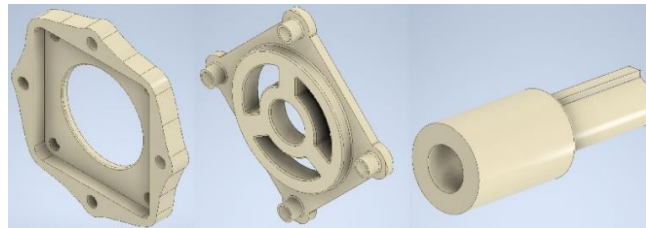


Figura 99: Piezas diseñadas en 3D para ensamblaje de motor Nema 23 y caja reductora.

Una vez instaladas las tres piezas se debe tener cuidado en la cantidad de vueltas que se le dan a los pernos, para evitar un montaje disparejo y que el motor vea forzado su eje por un ensamblaje incorrecto. Deben quedar las piezas niveladas una con respecto de otra ya que si no se encuentran paralelas el motor no puede girar debido a los esfuerzos generados. Para observar el montaje de esto se entrega la Figura 100.

A medida que se avanzaban en las pruebas del heliostato y se iban descartando las problemáticas mencionadas. Lo siguiente corresponde a obtener más información de la caja reductora, ya que esta no poseía más que una placa identificadora donde estaba el modelo de ésta. Sin embargo, la búsqueda por este modelo llevó a encontrar una serie de cajas reductoras idénticas donde, a la vez, había una serie de distintas relaciones de reducción. Para saber cuál era la caja con la que se trabajaba se debió programar el motor para girar una serie de vueltas y con esto contar las vueltas que daba el eje de transmisión de cada uno de los ejes, así se obtuvo que ambas cajas reductoras poseen una relación de transmisión de 1 : 30.



Figura 100: Montaje de piezas fabricadas en impresora 3D para ensamblaje de motor paso a paso y caja reductora.

Uno de los puntos más complejo de solucionar es la inestabilidad de la estructura en ciertos grados de movimiento, esto es propio del diseño estructural fabricado y no se puede intervenir de manera rápida y eficiente. Por ello, el heliostato se mantiene con ciertos parámetros de funcionalidad limitados donde uno de ellos corresponde al eje central. Este eje atraviesa el perfil de acero que conecta el semicírculo de la estructura de movimiento cenital y posee una serie de espaciadores para que no exista juego axial. Sin embargo, uno de estos no fue bien dimensionado y es más angosto, lo que causa que el panel tenga un leve juego, ver Figura 101 donde se muestra el espaciador y su problemática.



Figura 101: Espaciador de eje central que genera inestabilidad en el equipo.

El sistema de transmisión del heliostato posee otro problema que no es de fácil reparación, ya que es la cadena de transmisión del sistema de movimiento cenital la cual presenta baja tensión cuando el heliostato llega a ciertos grados de inclinación y esto genera que los piñones lleguen a saltar el encaje de un eslabón, lo cual provoca que el equipo se desestabilice completamente en cierto punto. A continuación, en la Figura 102 se presentan dos imágenes, una de ellas en donde el equipo se encuentra

haciendo su recorrido normal en el eje cenital sin problemas de tensión y el otro cuando ya se encuentra con averías.



Figura 102: Problema en tensión de sistema de transmisión de eje de movimiento cenital.

Como fue mencionado, el heliostato es capaz de llegar hasta sólo un punto de trabajo en su inclinación. Para el seguimiento de la trayectoria solar el equipo debiese diseñarse para un rango de movimiento entre los 0 y 90° con el fin de no incurrir en problemas una vez que se pone en operación. Para este caso, el equipo comienza con problemas a los 84° de inclinación, en donde la cadena comienza a separarse más de lo recomendado del piñón motriz cenital. En la Figura 103 se muestran estos últimos 6° de inclinación en donde el heliostato ya no es factible ni recomendable que pueda operar y por lo mismo se establece que la altitud máxima que puede alcanzar el equipo será de 82° y así minimizar el riesgo de colapso del sistema cenital.



Figura 103: Posición máxima de inclinación para el eje cenital del heliostato.

Cuando es sobrepasado este límite angular en el movimiento cenital, el sistema de transmisión del equipo se verá colapsados, ver Figura 104.



Figura 104: Posición de absoluto colapso del heliostato en su sistema de movimiento cenital.

Ahora, el sistema de movimiento azimutal presenta problemas similares con su sistema de transmisión, además, se encontraron algunas inconveniencias en su rango de movimiento máximo.

El sistema de transmisión del movimiento azimutal genera cierto desfase angular una vez que el heliostato es puesto en marcha, ya que mientras opera, el plato estructural que soporta el espejo tiene un juego entre el piñón y la cadena que se traduce en un error de alrededor $2\sim 3^\circ$ en la reflexión de radiación. Esto se advirtió una vez que el equipo comenzó sus primeras pruebas de seguimiento solar autónomas y en donde se logró verificar que había errores en su exactitud de reflexión al objetivo y una vez que se manipula manualmente el plato se puede reflejar completamente la radiación solar al centro del objetivo. Por otro lado, este equipo al tener centrado el eje de movimiento azimutal se esperaba que pudiese concretar la misma cantidad de grados de movimiento hacia ambos sentidos de giro. No obstante, mediante las diversas pruebas previas al seguimiento solar se encontró que uno de estos sentidos estaba más limitado que el otro debido a impacto entre sus componentes estructurales posteriores, generando así un giro de 45° para un lado (grados negativos si es que el heliostato es posicionado en dirección Norte) y de 40° para el otro (grados positivos si es que el heliostato es posicionado en dirección Norte), ver Figura 105. Para este caso, se debe tener en consideración que el rango de movimiento azimutal de la trayectoria solar es bastante amplio, lo cual implicará ciertas limitaciones para llevar a cabo este trabajo durante todo el día solar, siempre y cuando el equipo sea instalado en lugares en donde se pueda evidenciar el recorrido azimutal del sol en su totalidad durante todo el día.

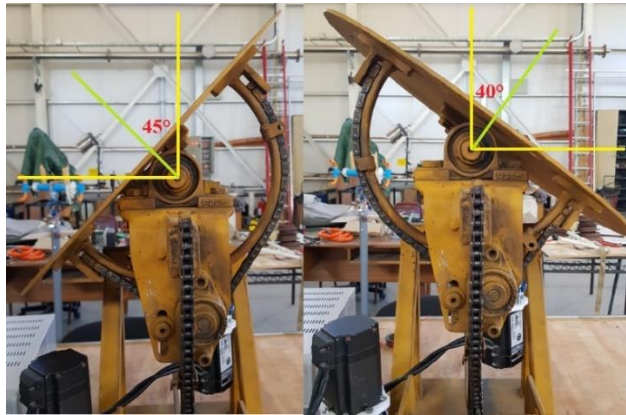


Figura 105: Posición máximo de movimiento para el eje azimutal del heliostato.

Ahora, con ambos rangos de movimiento caracterizados se procede a la instalación de los dispositivos de final de carrera que advertirán los límites de movimiento para el equipo y además ayudarán a establecer la calibración de éste cuando comience su proceso operativo. Dentro de la Figura 106 se aprecia que se ensamblaron dos finales de carrera para el sistema de movimiento azimutal ya que es el más crítico debido a su rango de movimiento y en donde si se ve sobrepasado el ángulo azimutal de seguimiento solar el final de carrera establecerá una alerta de detención de toda lectura posterior. A su vez, en el sistema de movimiento azimutal se instaló sólo un dispositivo final de carrera que corresponde al límite inferior de movimiento (0°) que determinará el comienzo del día y del seguimiento solar en conjunto del final de carrera dispuesto en el límite de movimiento de 40° positivos.

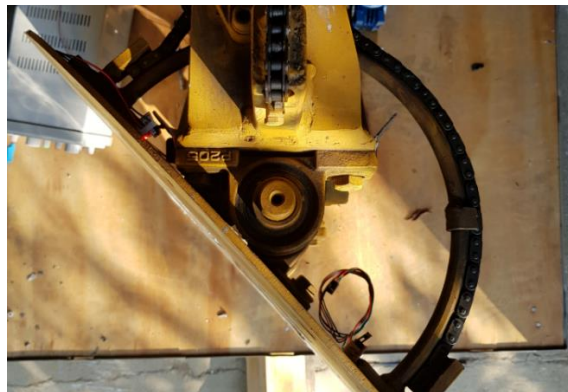


Figura 106: Dispositivos de final de carrera dispuestos en sistema de movimiento azimutal.

Finalmente, para terminar de establecer la puesta en marcha de este primer equipo implementado, en donde se verificó el correcto funcionamiento de sus motores y sistema de control queda caracterizar su movimiento en función de los grados que recorre (en ambos ejes de movimiento) y la cantidad de pasos asociadas a estos. Para

llevar a cabo esto se verificó la cantidad de vueltas totales que entrega el motor entre los 0° y los 82° dando un resultado de 89 vueltas. Siendo estos valores constantes y analizando el comportamiento del sistema cenital en base a diferentes ordenes de posicionamiento angular se puede implantar una ecuación de la recta en función de la variación angular y la cantidad de pasos que se deben realizar dentro de este movimiento y así el sistema regirse a través de ella para sus lecturas de seguimiento solar. En la Figura 107 se adjunta la gráfica de este comportamiento.

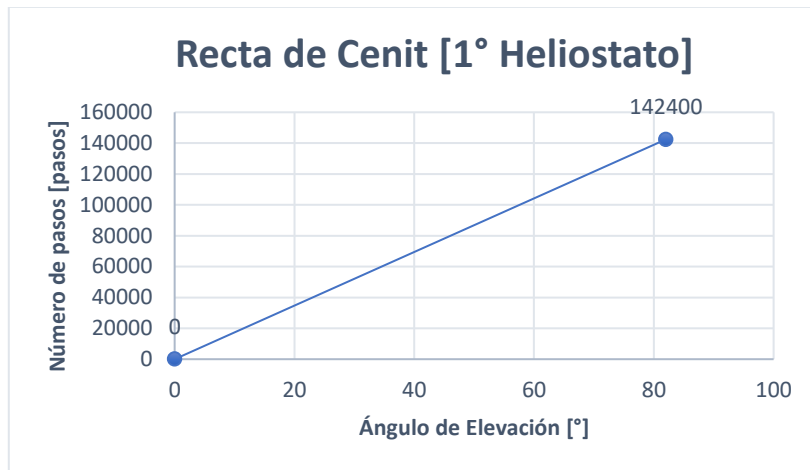


Figura 107: Gráfica de ecuación de la recta cenital para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (1° Heliostato).

Al mismo tiempo, para el sistema en el eje azimutal se dispone de un rango desde -45° a 40° lo que equivale a 43 vueltas. Por lo tanto, con estos valores se puede expresar la ecuación de la recta para regir el comportamiento del seguimiento azimutal durante todo el día solar del heliostato al igual que en el caso cenital (ver Figura 108).

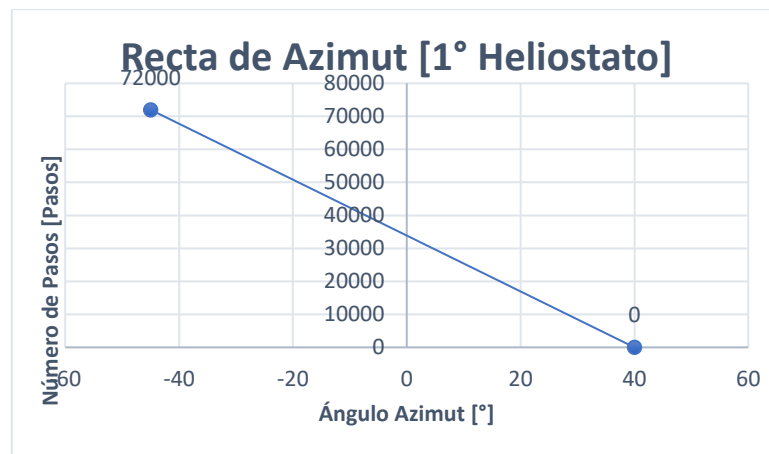


Figura 108: Gráfica de ecuación de la recta azimutal para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (1° Heliostato).

2. Puesta en marcha del segundo heliostato

Este equipo comprende el representado en la Figura 71 y descrito recientemente en el punto 2 de este mismo capítulo. Inicialmente contemplaba el uso de cuatro espejos obteniendo un área efectiva cercana a los 9 [m²] pero que tuvo problemas de flexión en su soporte estructural del espejo.

En los siguientes puntos se entrega un detalle más completo de cada uno de sus subconjuntos mientras fueron analizados y reparados para su nueva puesta en marcha.

Dentro de la puesta en marcha de este equipo se vuelven a encontrar algunas similitudes en cuanto a las problemáticas de funcionamiento que también presentó el primer heliostato implementado. A continuación, se detalla lo encontrado:

- Sistema mecánico inoperable por causa del colapso de los rodamientos de bolas de husillo.
- Carencia de información alguna de los detalles del equipo (diseño, programación, ficha técnica de elementos mecánicos y eléctricos que lo componen, entre otros).
- Equipo diseñado para trabajar durante fracción del día solar debido a limitantes físicas para llegar a los ángulos necesarios.

Este equipo fue analizado luego de haber completado los trabajos con el primer heliostato, ya que este implicaba reparación de su sistema motriz y además posee componentes de sistema de control distintos. Entonces, los trabajos se organizaron de manera jerárquica, en donde el primer equipo una vez que estuvo listo para ser operado mecánicamente se priorizó su programación. Luego de operar y hacer pruebas parciales se dio paso al trabajo con este segundo heliostato.

El primer trabajo fue analizar y verificar si era factible reparar ambos rodamientos de bolas para husillo de cada eje de movimiento y una inspección acerca del estado general de los sistemas motrices que se encontraban un poco agripados debido al tiempo que habían sido expuestos a las condiciones ambientales exteriores, ver Figura 109.

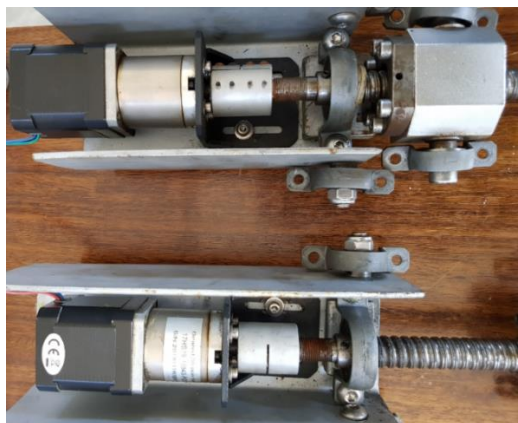


Figura 109: Estado inicial de los sistemas motrices.

De igual manera, se adquirieron dos rodamientos que cumplían con las dimensiones del husillo SFU1605 que finalmente no pudieron ser instalados ya que volvieron a colapsar. En la Figura 110 se puede ver el estado inicial de los rodamientos específicamente y su proceso de reparación.



Figura 110: Estado inicial y reparación de rodamientos de bolas de husillos motrices.

Una vez montados ambos rodamientos y luego de realizar un proceso de limpieza a los husillos y su ensamblaje completo del sistema motriz, ver Figura 111. Se procede al montaje de ambos sistemas de movimiento sobre el heliostato.



Figura 111: Ensamblaje de ambos sistemas motrices a heliostato. Izquierda, sistema cenital. Derecha, sistema azimutal.

Con los sistemas motrices ya ensamblados en sus soportes correspondientes, es necesario ensamblar la estructura de movimiento cenital sobre el cabezal móvil azimutal para dar paso a las primeras pruebas de movimiento de este equipo. Con esto hecho, sólo queda verificar los rangos máximos de operación que puede presentar este heliostato, en donde a través de un código simple que ordena a los motores a avanzar una cantidad definida de pasos se lleva al límite cada uno de sus ejes, en la Figura 112 se entrega como el sistema azimutal puede verse colapsado cuando llega a sus límites.



Figura 112: Máximos movimientos de sistema azimutal.

Para verificar la magnitud angular de movimiento que permite este equipo se llevó a puntos levemente inferiores de sus límites máximos para prevenir futuras averías cuando ya se encuentre en operación. Con esto, se trazaron marcas entre el cabezal móvil y el pilar central de fijación para que, posteriormente, relacionar en función del diámetro del pilar la amplitud de todo el movimiento, con esto se encontró que el máximo rango de movimiento azimutal es de 120° . Así, se describe que el equipo puede operar desde los 60° a los -60° ya que un heliostato debe posicionarse siempre mirando directamente hacia el Norte para zonas geográficas en el hemisferio sur y

directamente hacia el Sur para zonas geográficas en el hemisferio norte ya que en estos puntos cardinales se sitúa el medio día solar y la hora solar es igual a 0° .

En cuanto a los límites del eje de movimiento cenital, este es un poco más simple de caracterizar y no se necesita dividir el rango de movimiento en dos tramos iguales ya que el movimiento solar asociado al cenit se mide desde 0° a 90° . Sin embargo, se debe destacar que los 90° de altitud solar sólo se dan en los equinoccios y se puede hallar este valor angular para un observador situado en el ecuador terrestre, en donde el sol se posicionará en el medio día solar completamente sobre él. De esta manera, se obtiene que este quipo posee un rango de movimiento cenital desde 13° hasta 82° , en la Figura 113 se observa su límite inferior de 13° es el que comprende mayor criticidad ya que la longitud del husillo y su rodamiento de bolas están en el punto máximo. Si se ordenase al motor continuar sus movimientos una vez que el heliostato haya llegado a los 13° de altitud solar significaría un colapso del sistema cenital ya que el rodamiento de bolas sobrepasaría la longitud efectiva de recorrido que el husillo puede entregar.



Figura 113: Límite inferior de altitud cenital para segundo heliostato.

Con ambos sistemas de movimientos caracterizados es posible añadir los dispositivos de final de carrera los cuales se encargan de entregar las señales de alerta al funcionamiento de los motores para detener su recorrido y donde se instalaron, de igual manera que el anterior, dos para el sistema azimutal y uno para el sistema cenital, ver Figura 114. De esta manera, se establece el sistema de calibración del heliostato, que al igual que el equipo anterior, se encontrará en su mínimo ángulo cenital (13°) y en su máxima posición angular positiva azimutal (60°). En el punto 3 de este mismo capítulo se encontrará más información sobre cada proceso de programación que se implementó en los heliostatos.



Figura 114: Dispositivos de final de carrera instalados.

Con la caracterización de los sistemas de movimiento e instalados los dispositivos de final de carrera. Tan sólo queda representar los movimientos de cenit y azimut en función de una recta que relacione el ángulo solar y la cantidad de pasos que debe avanzar. Para el caso del movimiento cenital, entre los 13° y los 82° el husillo debiese entregar 72 vueltas, esto se traduce en que el motor seteado a 200 *pasos/rev* y con una reductora de 1:100 que el motor debe dar 7200 vueltas. Entonces, la ecuación de la recta para este movimiento queda representado según la gráfica de la Figura 115.

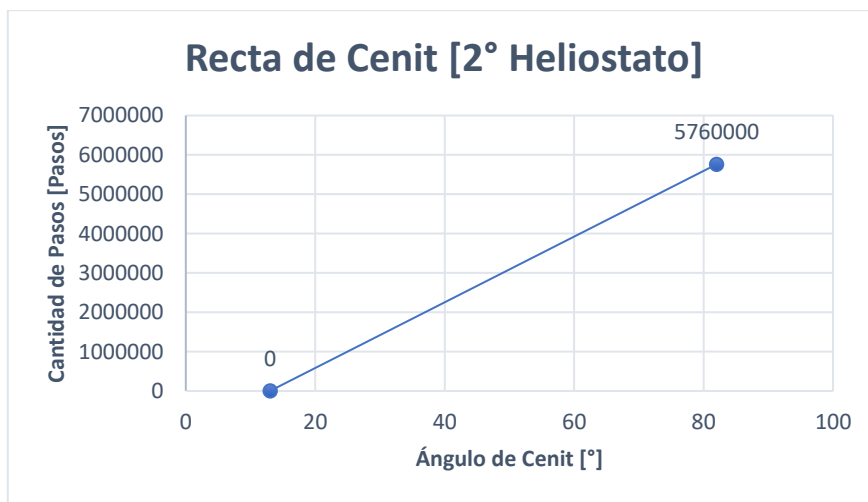


Figura 115: Gráfica de ecuación de la recta cenital para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (2° Heliostato).

Así mismo, el movimiento azimutal se ve representado entre los -60° y los 60° con una cantidad de vueltas del husillo de 64 vueltas, teniendo en consideración la caja reductora de 1:100 el motor debe entregar 6400 vueltas para generar todo el recorrido

de azimut. Finalmente, la ecuación de la recta que describe este movimiento se entrega en la Figura 116.

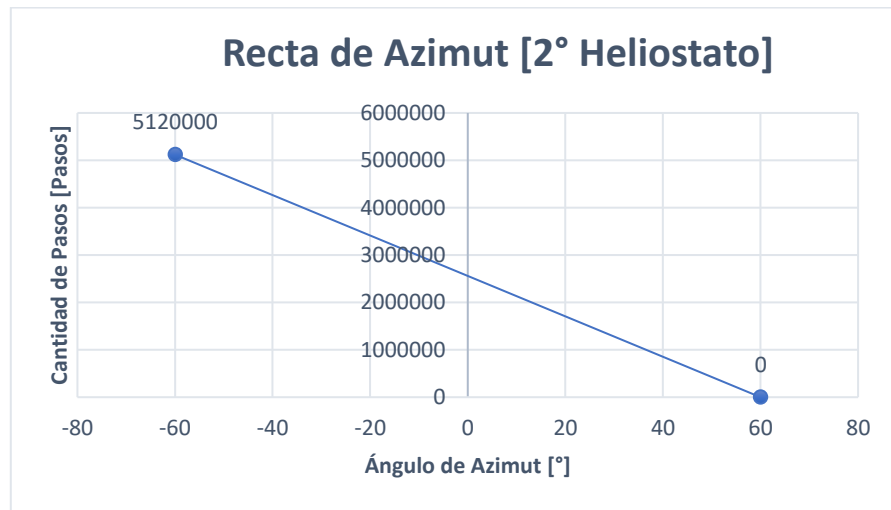


Figura 116: Gráfica de ecuación de la recta azimutal para establecer relación entre grados de movimiento y cantidad de pasos asociados (2° Heliostato).

3. Implementación de Arduino IDE

Arduino corresponde a una plataforma de desarrollo de programación libre y gratuita, permite realizar diversos tipos de trabajos para facilitar la implementación de artículos electrónicos ya que ofrecen sus propios dispositivos para ser utilizados y ajustados de manera flexible para diversas finalidades.

De forma general, la programación más habitual de Arduino se divide en tres partes:

- Definición de constantes.
- Definición de funciones ejecutables una única vez ("Void Setup").
- Definición de ciclo de funciones a ejecutar cíclicamente ("Void Loop").

En la primera parte de un código se deben definir todas las constantes que se utilizarán, es decir, los valores que si son llamados dentro de cualquier etapa del programa no verán afectado su valor y sirven para abreviar y facilitar la programación durante todo el trabajo. Además, en esta parte se definen las librerías de Arduino, éstas corresponden a un código elaborado por un tercero que el mismo software las entrega para su descarga libre y así facilitar la programación, por ejemplo, para que el microcontrolador sea capaz de operar motores paso a paso se emplea la librería "Stepper.h".

Lo siguiente es definir funciones que se ejecutan una sola vez desde que se pone en marcha la ejecución del programa, se disponen en el inicio de cada código. Aquí, se pueden insertar ecuaciones, lecturas de dispositivos, definición de ciertos dispositivos conectados como una variable, entre otras cosas.

Finalmente, se inserta en el programa las funciones o acciones que deban ejecutarse secuencialmente. Esta sección utiliza todo lo programado anteriormente en las primeras dos partes del programa y será la encargada de repetir una y otra vez las acciones de las funciones descritas para obtener los resultados correctos, siempre y cuando los dispositivos electrónicos utilizados se encuentren energizados.

Para emplear el código de seguimiento solar se deben utilizar las siguientes librerías:

- **Math.h:** Librería encargada de desarrollar, de manera más eficiente, operaciones matemáticas básicas dentro del código, en este caso resulta de gran utilidad para desarrollar y entregar los resultados de las ecuaciones entregadas en el punto 4 de la sección I.
- **Wire.h:** Librería encargada de hacer el puente de comunicación entre la placa controladora de Arduino y algún dispositivo electrónico, en este caso, corresponde al reloj RTC que se conecta mediante los pines análogos 4 y 5 de la placa Arduino Uno, donde uno de ellos se encarga de enviar la señal con los datos y otra para la señal de reloj.
- **Stepper.h:** Librería encargada de controlar de manera más simple los motores paso a paso, estos se deben conectar mediante dos pines digitales cada uno, Pulso (PUL) y Dirección (DIR). Además, se conecta un tercer pin hacia el GND de la placa de Arduino. Con esta librería se puede ordenar que el motor avance una cantidad específica de pasos (step()) y a una velocidad previamente programada (setSpeed()).

Para la elaboración de este código de programación para el seguimiento y redireccionamiento solar no se emplea por completo el estilo de programación que utiliza Arduino habitualmente, sino que, se aplica lo que es un modelo de máquina de estados o también conocido como autómata finito. Esto es un modelo computacional que plantea la existencia de un conjunto de estados finitos, una función de transición que permite el salto de un estado a otro y que necesita que su estado inicial esté bien definido ya que a partir de él se realiza las lecturas de entrada para que en base a su conjunto de estados finales producir el resultado de salida.

En particular, el código de programación, el cual se puede ver en los Anexos de este trabajo, se estructura de forma general como se describe a continuación:

- **Definición de constantes y variables:** El código inicia con la definición de todas las constantes y variables a utilizar dentro de todo la programación, es decir, aquí se encuentran algunas constantes numéricas que se emplean en el

cálculo de muchas de las ecuaciones para llevar a cabo el seguimiento solar, esto pasa porque Arduino UNO, que por su capacidad de lectura (16 bits), se ve saturado cuando se ingresan en su código de iteración ecuaciones muy extensas o complejas, y a través de la definición previa de valores numéricos constantes, se entrega un grado de ayuda para que Arduino no se vea sobrepasado.

Por otro lado, se definen las variables como, por ejemplo, los nombres de cada una de las ecuaciones a resolver, ya que de esta manera se le entrega al microcontrolador qué tipo de valor obtendrá más adelante cuando ejecute las lecturas. En otras palabras, si es conocido que una ecuación (ej. ecuación 1) entrega valores decimales, en esta parte se define previamente con la palabra *“float ecuación 1”* lo que indica que el resultado de la ecuación 1 será con números decimales. En esto hay que tener mucho cuidado ya que si se define que una ecuación obtendrá números enteros (*int*) y, sin embargo, el resultado es decimal, Arduino no será capaz de entregar el resultado correcto y puede ejecutar acciones que concluyan con una falla funcional del equipo.

- **Definición de estados:** En este punto es donde se establece la función de cada uno de los estados con los que trabajará la máquina de estados inserta en arduino. Donde el estado inicial (E0) comienza con la calibración de inicio para darle la partida al redireccionamiento solar, esta calibración comprende llevar al heliostato a su posición inicial de Cenit y Azimut, independientemente de la posición angular en que se encuentre. Esta posición de inicio se encuentra en el Cenit a los 2° para el primer heliostato y 13° para el segundo, mientras tanto, en azimut se llevará a los 40° y 60°, respectivamente. Estos datos angulares se obtienen mediante las limitaciones físicas que se entregaron en la descripción de cada uno de los equipos.

Una vez calibrado el equipo, el sistema de autómatas finito continúa su proceso con los estados finales, los cuales, para este caso son tres (E1, E2, E3). El Estado 1 comprende el cálculo de todos los ángulos de posición solar, los cálculos de las bisectrices cenital y azimutal para redirigir la radiación incidente hacia la posición en donde quiera que se ubique el objetivo deseado y finalmente entrega la diferencia (delta) de desfase angular convertido a pasos entre la posición actual y la posición anterior en la que quedó el heliostato, según los movimientos de cada motor. El Estado 2, ejecuta el movimiento de los motores en base a una función *“while”*, que permite realizar un movimiento de un solo paso del stepper consecutivamente hasta igualar la cantidad de pasos que ha dado con respecto a la cantidad de pasos entregada por el delta de desfase que resultó del Estado 1. Cabe destacar, que es aquí donde depende si el delta de desfase angular (en pasos) es una adición o sustracción de pasos para llegar a la nueva posición deseada, y con esto, es que los motores se moverán en sentido

horario o antihorario. Finalmente, el Estado 3 ejecuta el lapso de espera, asignado arbitrariamente, para llevar a cabo nuevamente el Estado 1. Esto ocurrirá sucesivamente hasta que los equipos lleguen a su límite angular máximo o el día solar acabe.

El límite angular máximo ocurre cuando, cualquiera de los heliostatos, llega a un punto donde acciona algún dispositivo final de carrera y ya no se encuentra en la ejecución del Estado 0, esto significa que se insertó dentro del código programable una alerta de aviso a través de los dispositivos. De esta manera, se evita que el código vuelva a ejecutar el Estado 1. Además, la otra barrera de seguridad es la implementación de un saturador de pasos dentro del programa, el cual identifica si la cantidad de pasos que se debe mover el equipo es mayor a su capacidad máxima (dada por la ecuación de la recta para cenit y azimut en cada heliostato). Con esto se tienen dos barreras que pueden detener la operación de los heliostatos en caso de verse sobrepasados sus límites físicos o de programación y evitar cualquier colapso estructural debido al gran torque que generan los sistemas mecánicos utilizados.

- **Definición de funciones de transición:** La transición entre estados corresponde a la verificación de ciertos parámetros o banderas de aviso que alertan sobre el correcto desempeño y resultado del estado actual que está operando para así dar paso a la siguiente lectura. De lo contrario, si las transiciones no son ejecutadas de manera correcta, el código de programación se estancará en el estado actual. En este caso, el Estado 0 es aquel que no posee alerta previa ya que el programa siempre se va a ejecutar con él una vez que el arduino se haya energizado. Sin embargo, la transición ocurre entre Estado 0 y Estado 1, Estado 1 y Estado 2, Estado 2 y Estado 3, Estado 3 y Estado 1. La primera se establece en función de los límites de carrera añadidos a ambos equipos, en donde se indica un valor programado para la variable de alerta que se definen para estos interruptores (False: interruptor abierto, True: interruptor cerrado), así, una vez que son accionados cambia su valor de “False” a “True” e indica que el motor movió el equipo hasta la posición de calibración deseada accionando los finales de carrera respectivos de cada eje.

La segunda transición, ocurre cuando el Estado 1 entrega los valores angulares de la bisectriz de cenit, azimut y con esto la diferencia angular que exista entre la lectura pasada y actual de posicionamiento solar, donde también se asignan valores, “True” o “False”, a dos nuevas variables que indican cada vez que se tiene un nuevo resultado de bisectriz cenital o azimutal, por lo cual, con esto comprobado, se da paso al Estado 2.

La tercera transición se ejecuta una vez que los motores stepper hayan completado la cantidad de pasos que se ordenó debido a la diferencia angular (delta) entregada en el Estado 1, es decir, que mientras el motor esté en

movimiento, la bandera de alerta entregará el valor de “False” y cuando el motor complete su recorrido hasta llegar al punto que se requiere, la bandera indicará “True”.

Por último, la cuarta transición está ligada sólo a la correcta ejecución del contador temporal que se asigne para que el código vuelva a iterar, es decir, que una vez que el Estado 3 haya realizado la pausa de lecturas durante un tiempo determinado, la bandera de alerta de este contador cambiará su valor de “False” a “True”, dando paso nuevamente a la inicialización del Estado 1, el cálculo de ángulos solares y sus derivados explicados recientemente.

A continuación, en la Figura 117, se entrega el diagrama de estados para el autómata finito en donde se puede apreciar de mejor manera la ejecución y transición de estado a estado, además de los nombres de cada variable de interés que se utiliza dentro del código programado.

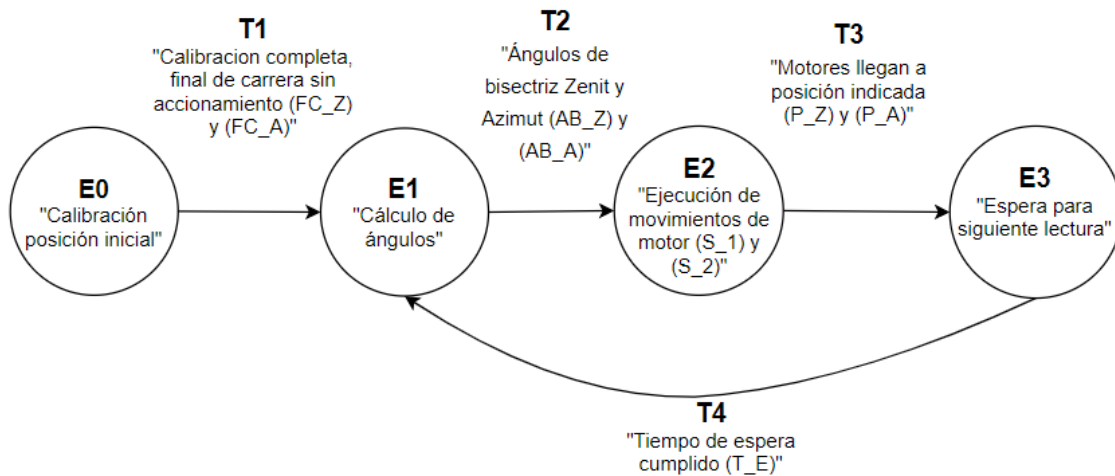


Figura 117: Diagrama de estados para autómata finito.

Además, en la Tabla 7 se entrega el listado de las variables importantes que ejecutan cada estado y cada función de transición.

Tabla 7: Conjunto de variables definidas para ejecutar los estados y transiciones de la máquina de estados.

Variable	Significado
FC_Z	Bandera final de carrera cenit.
FC_A	Bandera Final de carrera azimut.
B_Z	Ángulo bisectriz cenital.

B_A	Ángulo bisectriz azimutal.
AB_Z	Bandera de alerta que hay lectura cenit.
AB_A	Bandera de alerta que hay lectura azimut.
S_1	Movimiento motor 1, cenit.
S_2	Movimiento motor 2, azimut.
P_Z	Bandera alerta de posición de cenit cumplida.
P_A	Bandera alerta de posición de azimut cumplida.
Tiempo_espera	Tiempo definido para realizar otra lectura.
T_E	Bandera alerta que el tiempo se ha cumplido.

Una vez que ya se han explicado todos los sistemas de control y posición que rigen para ambos heliostatos implementados, además de la explicación detallada sobre la implementación de Arduino IDE dentro de este punto. Se procede a entregar una tabla resumen del tipo de lectura que realizará el código programado para Arduino, ver Tabla 8, en donde se entregan las variables más importantes de lectura y la ejecución de ellas. Este código está resuelto en función de todas las variables y conceptos entregados para el seguimiento solar y sus funciones de ejecución para el movimiento de los motores.

Tabla 8: Paso a paso generalizado de cada función que debe ejecutar el programa del microcontrolador Arduino UNO.

Paso	Función	Ejecución
1.-	Verificación de bandera de finales de carrera	Realizar movimiento de motores hasta que el valor de la bandera de alerta de cada final de carrera de calibración cambie, indicando su punto inicial.
2.-	Leer reloj RTC.	Obtener día, mes y hora actual.
3.-	Convertir lectura RTC.	Obtener valor para LT (Hora Local) en horas.
4.-	Zonas horarias de Chile.	Crear valor para las dos zonas horarias que presenta Chile durante el año (Invierno/Verano).
5.-	Calcular LSTM .	Obtener valor para LSTM (Tiempo solar medio) en grados.

6.-	Definir cantidad de días totales de un año por meses.	A través de un vector expresar la cantidad de días por mes que tiene un año, ver Tabla 1.
7.-	Cálculo de n .	Obtener valor para n en base a la lectura del día del RTC y en función del vector del punto 5.
8.-	Cálculo B .	Generar valor para la variable B en grados.
9.-	Cálculo de ET .	Obtener valor para la ecuación de tiempo (ET) en minutos.
10.-	Cálculo de δ .	Obtener valor para la declinación solar (δ) en grados.
11.-	Cálculo de TC .	Generar el valor para el factor de corrección de tiempo en minutos.
12.-	Cálculo de LST .	Obtener el valor del tiempo solar aparente en horas.
13.-	Cálculo de h .	Obtener valor para la hora solar (h) en grados.
14.-	Cálculo de α .	Generar el valor para la altitud solar en grados.
15.-	Cálculo de α_{st} .	Generar el valor de la bisectriz para el movimiento cenital.
16.-	Comprobar posición cenital del heliostato.	Diferenciar si la posición cenital del heliostato es mayor o menor a la bisectriz cenital.
17.-	Mover motor cenital.	Ejecutar el movimiento angular del motor cenital si es que la posición no corresponde a la bisectriz.
18.-	Cálculo de z .	Generar el valor de la bisectriz para el movimiento azimutal.
19.-	Comprobar posición azimutal del heliostato.	Diferenciar si la posición azimutal del heliostato es mayor o mejor a la bisectriz azimutal.

20.-	Mover motor azimutal.	Ejecutar el movimiento angular del motor azimutal si es que la posición no corresponde a la bisectriz.
21.-	Conteo de tiempo para otra lectura.	Espera de tiempo definido en Estado 5 para volver a iniciar el proceso desde el Estado 1.

También es oportuno mencionar el diagrama de conexión en base al cual se deben conectar todos los dispositivos electrónicos de Arduino (ver Figura 118). Esto comprende un arduo trabajo en lo que significa cómo y dónde conectar cada dispositivo según sus funciones a desarrollar, ya que se realizaron muchas pruebas de puesta en marcha (prueba/error) para concretar la conexión definitiva que deben seguir. Dos ejemplos importantes son, que se debe tener mucho cuidado sobre cómo conectar el dispositivo RTC, ya que si se llegan a invertir las conexiones de GND y VCC se produce sobrecalentamiento en la placa del reloj y esto puede llevarlo a la falla, también hay que destacar que no se deben conectar pines con señal digital en los pines 0 y 1 de la placa de Arduino UNO, debido a que estos son pines que se pueden configurar con doble finalidad, ya sea digital o analógico, en donde esto hace que el programa no pueda ejecutarse si es conectado algún final de carrera o motor en estos pines.

Un factor importante es la conexión entre driver y Arduino, ya que al utilizar la librería “Stepper.h”, esta acepta sólo dos definiciones para comandar un motor paso a paso, en donde se establece que la conexión a utilizar será del tipo Stepper(Pin1,Pin2), siendo Pin1=PUL+ y Pin2=DIR+ del driver. Con esto sólo queda conectar a GND lo correspondiente a PUL-, DIR- y EN-. Además, en este caso, los saturadores de movimiento máximo y mínimo fueron establecidos en base a EN+, ya que de esta manera es posible “desconectar” la operación de los motores cuando llegue la señal de alerta.

Por último, tanto el reloj RTC y los dispositivos final de carrera poseen conexiones de GND y VCC (5 volts proporcionados por la placa Arduino UNO) y las conexiones de señal corresponden a un solo pin por cada final de carrera (Pines 2, 3 y 4) y el reloj se comunica mediante los pines SDA (Serial Data Line) y SCL (Serial Clock Line), en donde el primero corresponde a la señal por donde viajan los datos del RTC y el segundo es la señal sincronizada para transmitir la hora actual.

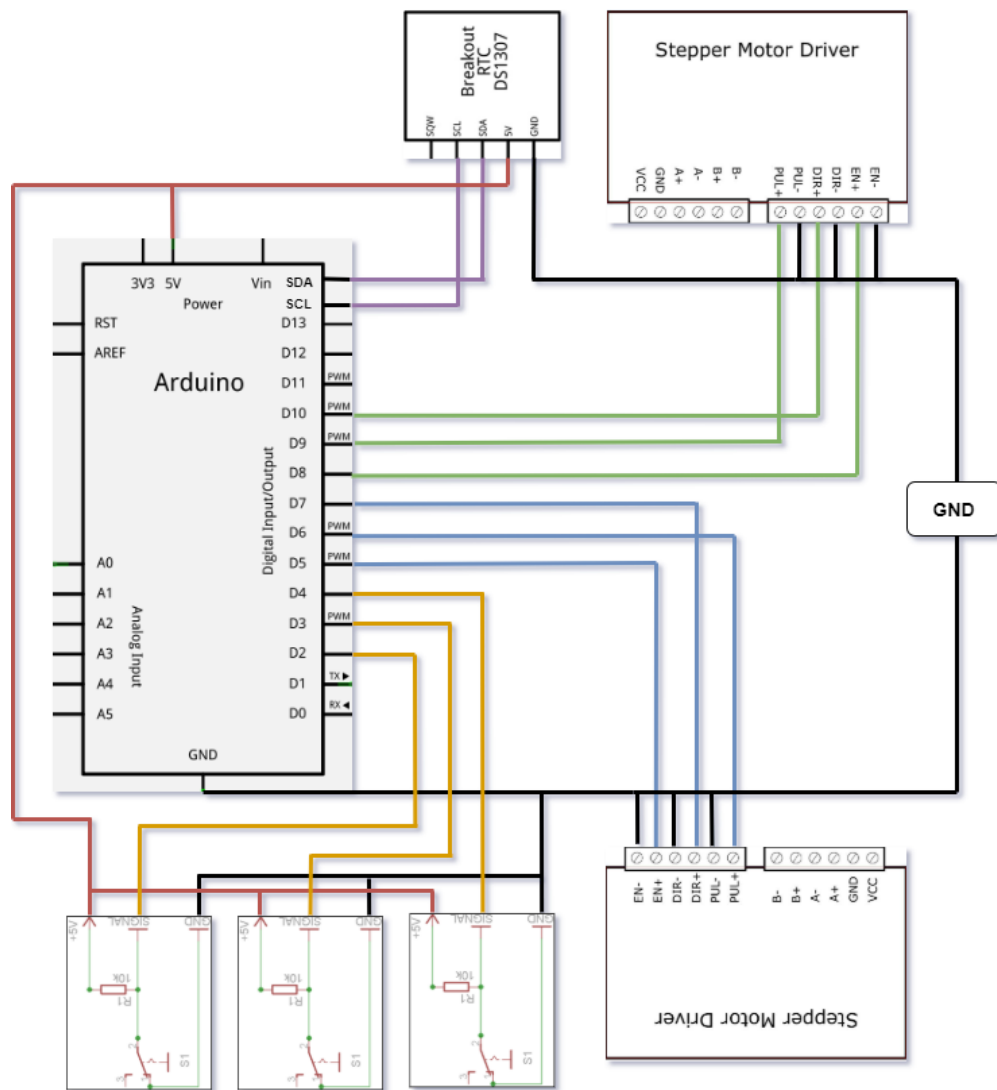


Figura 118: Diagrama de conexión a microcontrolador Arduino UNO.

VI) ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES

La prueba de los heliostatos se llevó a cabo en tres días diferentes en la zona de Quilpué, V Región, Chile:

- ✓ Domingo 24 de mayo.
- ✓ Sábado 6 de junio.
- ✓ Viernes 12 de junio.

El principal lugar objetivo para la puesta en marcha de los equipos era en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María. Sin embargo, por la contingencia internacional causada por la pandemia del virus COVID-19 es que fueron cerradas todas las instalaciones universitarias y por ello se debieron continuar los trabajos de manera particular en el domicilio del encargado del proyecto de la implementación del campo de concentración solar para el cual se utilizarán estos heliostatos.

1. Resultados primer día de pruebas

Los primeros dos días de prueba fueron en base a las pruebas del primer heliostato, en donde el primer día se probó su capacidad de reflexión a un objetivo situado en frente del equipo, a la misma altura del punto central del heliostato (0,65 [m]) y a una distancia de 1,90 [m] alejado de él.

Un factor importante para destacar es que para ninguna de las pruebas realizadas se utilizaron espejos reales, esto debido a que la reflexión de la radiación puede llegar a causar grandes daños si es que no es bien controlada. Por lo mismo, para disminuir el riesgo de cualquier incidente es que se utilizaron sólo láminas de adhesivo reflectante el cual entregó muy buenos resultados experimentales para evidenciar el correcto desempeño de los heliostatos. En la Figura 119 se puede ver cómo fueron probados ambos equipos.



Figura 119: Heliostatos con lámina adhesiva reflectante.

El objetivo (target) consistió en una plancha de madera a la cual se le marcó un cuadrado con cinta adhesiva para identificar el lugar concreto hacia donde debía apuntar el heliostato, y con ayuda de cámaras fotográficas es que se evidenció el desempeño de la reflexión solar dentro de las 11:30 y las 14:30 horas, este horario fue clave ya que dentro de él ocurrió el medio día solar y se debía comprobar la efectividad de las ecuaciones de seguimiento y del cálculo de las bisectrices. Finalmente, se obtuvieron los resultados entregados en las Figuras 120, 121, 122, 123 y 124.



*Figura 120: Comienzo de pruebas de primer heliostato, post proceso de calibración.
Hora: 11:30 aproximadamente.*



Figura 121: Continuación de pruebas, primer heliostato.



Figura 122: Continuación de pruebas, primer heliostato. Mediodía solar aproximadamente.



Figura 123: Continuación de pruebas, primer heliostato. Post mediodía solar.



Figura 124: Fin de pruebas, primer heliostato. Hora: 14:30 aproximadamente.

Como se puede apreciar, entre la Figura 120 y 121 existe un desfase en la reflexión de la imagen, esto se asoció debido a que el tiempo de espera entre lecturas se estableció en 10 minutos. Por lo tanto, esto sirve para evidenciar que un tiempo de espera tan largo causa un desplazamiento considerable de alrededor de 15 [cm] en la reflexión de la imagen. Sin embargo, se ve claramente que a lo largo de la prueba completa que se realizó, la imagen siempre se mantuvo dentro del target establecido y se puede verificar que el comienzo de las pruebas se realizaron antes del medio día solar fijándose en la sombra proyectada en la Figura 120, además, se asocia en la Figura 122 que el sol se encontraba en un punto cercano al medio día, por lo cual la sombra se encuentra justo entre el target y el heliostato y con muy baja deformación angular. Finalmente, en la Figura 124 y analizando la proyección de la sombra, se entrega una prueba de reflexión después del medio día solar y con gran exactitud de reflexión.

2. Resultados segundo día de pruebas

El segundo día de pruebas también consistió en pruebas al primer equipo, esta vez, con tres variaciones de la ubicación del objetivo. Con estas pruebas se busca verificar el correcto desarrollo del planeamiento de las ecuaciones de bisectrices cenital y azimutal. A continuación, se entrega la distancia y ubicación de cada prueba:

- ✓ Primera ubicación: Objetivo alejado a 9 [m] (rectos) en frente del heliostato y ubicado a la misma altura proyectada del punto central del heliostato.
- ✓ Segunda ubicación: Objetivo alejado a 9 [m] (rectos) del heliostato, pero con un desfase de $-1,30$ [m] (izquierda) y ubicado a una altura de 0,3 [m] del punto central del heliostato.
- ✓ Tercera Ubicación: Objetivo alejado a 5,20 [m] (rectos) del heliostato, pero con un desfase de $+2,60$ [m] (derecha) y esta vez con una altura de 0,50 [m] más arriba del punto central del heliostato.

2.1. Primera ubicación

Esta corresponde a la primera vez en que se dispone de un objetivo tan lejano del heliostato, ya que dentro de lo conocido en base a estudios anteriores nunca se fijó un objetivo a más de 4 [m]. A continuación, en las Figuras 125 y 126 se puede ver que efectivamente la reflexión solar proporcionada por el heliostato si mantuvo su desempeño evidenciado en la primera prueba realizada.



Figura 125: Comienzo de segunda prueba para primer heliostato antes de calibrar equipo.

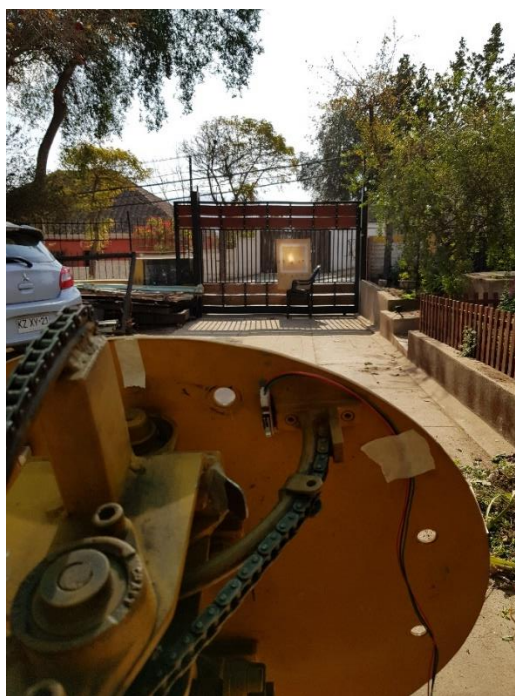


Figura 126: Segunda prueba para primer heliostato una vez puesto en marcha.

Esta prueba sólo tuvo un lapso de 45 minutos de tiempo, ya que se debía dar espacio para realizar las siguientes pruebas y verificar el desempeño del heliostato con un objetivo desfasado, las cuales también tuvieron el mismo lapso de medición.

2.2. Segunda Ubicación

La siguiente ubicación del equipo corresponde, también, a la primera vez en disponer de un objetivo desviado del centro del heliostato. Esta vez se ubica el objetivo a $-1,30 [m]$, esto significa que se encuentra a la izquierda del heliostato. Con esto se busca mantener la concordancia de que, durante el día solar, los valores angulares positivos corresponden a aquellos previos al mediodía solar y los negativos son posteriores al mediodía solar en azimut, además, se elevó el objetivo a una distancia de $0,30 [m]$ por sobre el centro del heliostato. En las Figuras 127 y 128 se puede verificar el desempeño del equipo.



Figura 127: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la izquierda.



Figura 128: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la izquierda.

Lamentablemente, en aquel momento del día bajó la intensidad de la radiación solar debido a nubosidad parcial. Sin embargo, se logra verificar que dentro de los 45 minutos de prueba, el heliostato logró redireccionar la radiación incidente sobre el objetivo. Se debe tener en cuenta que la intensidad de la imagen también se ve reducida debido a la distancia de 9 metros que se encontraba alejado el objetivo desde el heliostato y esto sumado a que no se utilizaron espejos reales para llevar a cabo la reflexión solar.

2.3. Tercera Ubicación

Para esta prueba ya se había verificado que las ecuaciones para los cálculos de las bisectrices cenitales si dieron buenos resultados, entonces, se decidió ubicar el objetivo a una distancia un poco menor a 9 metros para tener una imagen de la reflexión un poco más clara y con un desfase de $+2,60 [m]$ a la derecha del heliostato, además a una altura de $0,50 [m]$ con respecto al centro del equipo. En las Figuras 129 y 130 se aprecian los resultados de esta prueba.

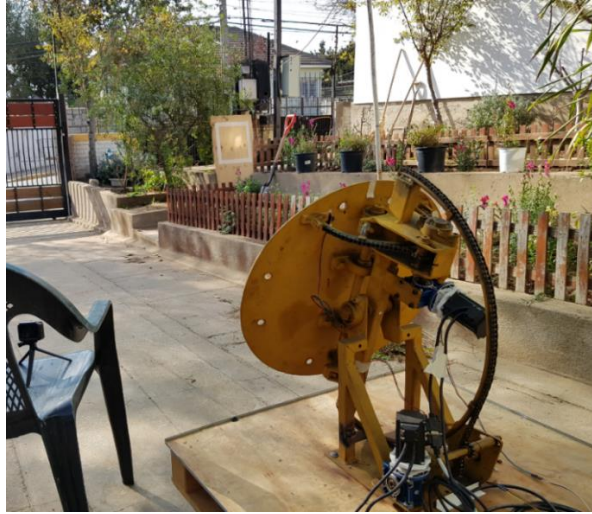


Figura 129: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la derecha.

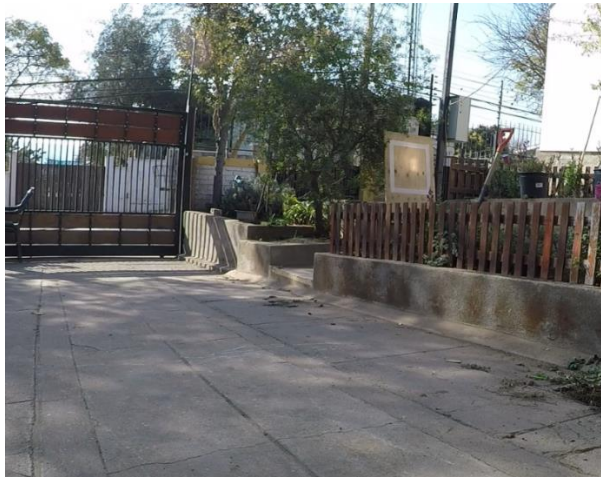


Figura 130: Segunda prueba para primer heliostato, objetivo desfasado a la derecha.

Oportunamente, se pudo obtener una fotografía de la disposición general entre el heliostato y el objetivo (ver Figura 129). Además, en la Figura 130 se aprecia una toma de la cámara que se mantuvo grabando durante los 45 minutos de esta prueba.

3. Resultados tercer día de pruebas

El tercer y último día de pruebas fue el viernes 12 de junio, en donde se logró poner en marcha en su totalidad el segundo heliostato y se procedió a realizar una prueba con ambos equipos. Previamente, se había comprobado el correcto funcionamiento del primero, por lo que faltaba verificar qué desempeño entregaría el segundo. Entonces, se organizaron ambos heliostatos direccionados al norte y acomodados de manera que no se entorpecieran a lo largo del lapso de pruebas, en la Figura 131 se aprecia la ubicación de estos dos equipos dentro del patio delantero del domicilio en la comuna de Quilpué.



Figura 131: Disposición de ambos heliostatos operando, tercer día de pruebas.

Esta prueba fue registrada mediante grabación videográfica en un lapso aproximado de 2 horas y 45 minutos, pero lamentablemente, ocurrieron problemas técnicos en cuanto a la obtención final del archivo. Por lo tanto, se procedió a reorganizar los heliostatos para alcanzar a tomar pruebas de reflexión solar (ver Figura 134) ya que en la zona donde se encontraban inicialmente ya no se lograba captar radiación incidente debido a la vegetación, con esta nueva configuración se pudo obtener la grabación mediante teléfono celular de la reflexión solar.

A pesar de los inconvenientes, afortunadamente se tomaron algunas fotografías del trabajo de estos equipos y sobre la evaluación de su desempeño. A continuación, en las Figuras 132 y 133 se pueden evidenciar los resultados obtenidos de la primera puesta en marcha de este día de pruebas y en la Figura 134 se puede ver cómo funcionaban luego de reorganizarlos.



Figura 132: Tercer día de pruebas. Ambos heliostatos en funcionamiento.



Figura 133: Tercer día de pruebas. Continuación del funcionamiento de ambos equipos.

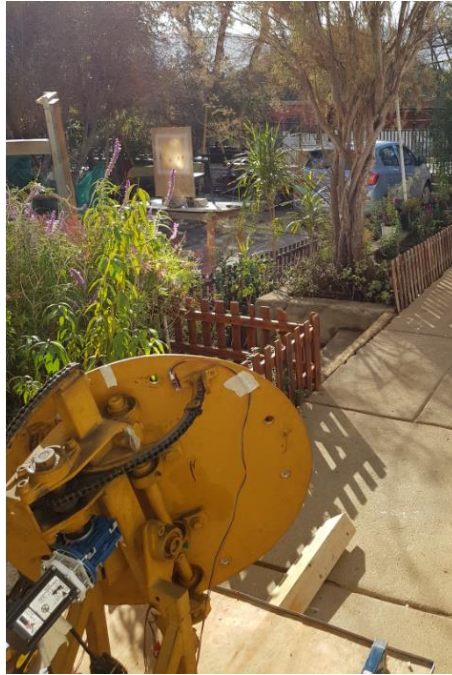


Figura 134: Tercer día de pruebas. Ambos heliostatos funcionando con cambio de posición para recibir radiación solar.

4. Consideraciones generales

Luego de las pruebas de desempeño realizadas a ambos equipos, se obtuvieron resultados satisfactorios. Sin embargo, es recomendable que los equipos una vez instalados en el lugar real donde se desarrollará el proyecto del campo de concentración solar sean probados y testeados nuevamente para disminuir la cantidad de errores de lectura que pueda presentar los heliostatos. Por ende, es recomendable verificar, cuidadosamente, los siguientes puntos antes de dar paso a la puesta en marcha:

- ✓ Comprobar todas las conexiones eléctricas y electrónicas de cada heliostato, esto se puede hacer sin problemas buscando los diagramas de conexión entre drivers/motores y drivers/arduino, los cuales están presentes dentro de este trabajo.
- ✓ Energizar sólo la placa Arduino UNO para verificar la correcta conexión de los dispositivos de final de carrera, se puede hacer esto realizando la pulsación manual de los dispositivos y comprobando que la luz led se enciende.
- ✓ Si cada final de carrera está energizado y conectado correctamente entre los pines de GND y VCC sólo queda verificar con el código programado a cuál pin

está conectado cada final de carrera (calibración cenit, calibración azimut, final azimut).

- ✓ Con la comprobación del correcto desarrollo de los pasos anteriores ya se puede establecer que los heliostatos no realizarán movimientos que puedan causar fallas estructurales, ya que los finales de carrera al ser accionados entregan la alerta de detención de movimiento.
- ✓ Orientar, con el mínimo de error posible, cada heliostato en dirección Norte si es que se desean tomar pruebas como las realizadas durante este trabajo. De lo contrario, se deben orientar los equipos, con la misma precaución, en dirección Sur. Este punto es muy importante, ya que una mala disposición de los heliostatos y de su dirección causará problemas en la correcta reflexión solar.
- ✓ Con los equipos orientados hacia el Norte o Sur, cargar el código perteneciente a cada heliostato en función de su dirección. Por consiguiente, el cambio de dirección de los equipos hace que las ecuaciones de cálculo de bisectrices para redireccionar la radiación cambien y también cambie el sentido de movimiento de los motores de azimut debido al giro en 180° que poseen los heliostatos entre dirección Norte o dirección Sur.
- ✓ Estimar cuidadosa y correctamente el posicionamiento y altura del objetivo (“target”) con respecto de cada heliostato. Con distancia lineal de separación, distancia horizontal de desfase y altura es suficiente para calcular los ángulos de posición del objetivo a través de ecuaciones trigonométricas simples, los cuales están considerados en las ecuaciones de bisectrices.

CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de un campo de heliostatos puede ser muy flexible y de gran alcance si se tienen en cuenta los costos asociados al diseño, fabricación y puesta en marcha. En base a que los resultados obtenidos fueron totalmente satisfactorios se vuelve realmente muy interesante la implementación de un campo de heliostatos para diferentes prácticas que se estimen convenientes.

Sin duda las ecuaciones de seguimiento solar comprobaron empíricamente su exactitud para este sistema de seguimiento solar de lazo abierto o también llamado “*sensorless*”. Sin embargo, para obtener mayor precisión de lectura y de reflexión solar queda en la incertidumbre si un sistema de lazo cerrado con retroalimentación pueda ser potencialmente mejor en comparación a lo desarrollado dentro de todo este trabajo. No obstante, no se tiene una estimación de los costos de manufactura y dispositivos asociados que se invirtieron en estos equipos, e impulsar el desarrollo con nuevas tecnologías para modificar el sistema de control puede significar un alza considerable en los costos finales. Por lo tanto, queda a modo de desafío analizar la factibilidad técnica y económica de dichas modificaciones. Por otro lado, la incorporación de un sistema de control globalizado para comandar todos los equipos que estén operando puede significar un gran apoyo en cuanto a tiempo y dedicación que se invierte en cada heliostato, ya que, en este caso particular, cada equipo debía ser programado de forma individual y cada uno de ellos es totalmente independiente del otro.

Más allá de los posibles cambios y mejoras que pudiesen aplicarse dentro de este campo de heliostatos, cabe destacar que el trabajo realizado sobre el conjunto de equipos que se encontraban abandonados y con partes funcionales defectuosas, fue completamente focalizado en intentar habilitar la máxima cantidad de equipos posibles. Finalmente, fueron dos de ellos los que pudieron ser devueltos a su puesta en marcha y realizar las pruebas piloto correspondientes, las cuales entregaron muy buenos resultados a pesar de que no se utilizaron los espejos reales para cada uno de los equipos. Por lo tanto, realizar las pruebas con los espejos montados sobre cada uno de los heliostatos corresponde a un desafío y trabajo futuro interesante para evaluar su correcto desempeño. En particular, no se tenía conocimiento previo de los heliostatos implementados, y si es que alguna vez operaron con seguimiento solar autónomo o si sólo sirvieron de pruebas para verificar el desempeño que entregaba cada configuración distinta. Además, esto trata del primer trabajo de implementación de heliostatos replicables a mediana escala dentro de la Universidad Técnica Federico Santa María y da una pauta de partida para futuras innovaciones, las cuales pueden tener en consideración todos los detalles de diseño que posee cada uno de los equipos implementados para mejorar y modificar en pro de un diseño final mucho más versátil y estable. Además, plantear nuevos sistemas de control para el seguimiento solar

comprende un desafío transversal hacia otras áreas de estudio, como, por ejemplo, Ingeniería Civil Electrónica, desde donde se obtuvo un gran apoyo y retroalimentación de nuevos conceptos e información con la cual fue posible realizar este trabajo.

Dentro de las condiciones en las que se empleará el campo de heliostatos es importante mencionar que los niveles de vientos dentro de la zona de Quilpué en la V Región de Chile presentan un promedio de $3,6 \text{ m/s}$, esto según la escala de Beaufort corresponde a una brisa muy moderada que no afectará directamente el desempeño de los heliostatos, ya que estos presentan soportes bastante balanceados y cimientos hacia fundaciones de acero. No obstante, no se tiene una aproximación real de la fuerza de arrastre que pueda generar el viento sobre los paneles y se recomienda que una vez instalados en el banco de pruebas del campo de concentración solar se evalúe la posibilidad de instalar una cerca porosa en el perímetro de este campo y de esta manera estará comprobado que el efecto que el viento provoca sobre los equipos se verá totalmente disminuido entre un 40% y 50%. Además, es importante medir empíricamente el resultado de concentración solar que puedan generar ambos heliostatos ya que la estimación teórica y real de la radiación reflejada puede variar según los planos de inclinación en los que se encuentren cada heliostato.

Los resultados generales de este proyecto son realmente alentadores para seguir una nueva línea de trabajo en lo que significa la implementación de nuevas tecnologías sobre energía solar concentrada, con esto se puede sacar máximo provecho de energías renovables que no plantean un desgaste y deterioro del planeta Tierra y el medioambiente, en donde se desenvuelve la humanidad y todos los otros seres que la habitan. Por esto, es que un trabajo de este tipo es sugerente y desafiante para disminuir cada vez más el impacto negativo que genera el desarrollo del ser humano.

REFERENCIAS

- Carvajal, Esteban, ““ Diseño Y Construcción De Un Helióstató Con Seguimiento Solar En Dos Ejes Para Re-Direccionar Radiación Incidente Hacia Un Disco Concentrador Parabólico ””, 2018
- Coventry, J., and J. Pye, ‘Heliostat Cost Reduction - Where to Now?’, *Energy Procedia*, 49 (2014), 60–70
- Coventry, Joe, Jon Campbell, Peng Xue Yun, Colin Hall, Jin-Soo Kim, John Pye, and others, ‘Heliostat Cost Down Scoping Study - Final Report’, *Technical Report*, January 2017, 2016, 1–98
<https://www.researchgate.net/publication/312214094_Heliostat_Cost_Down_Scoping_Study_-_Final_Report>
- Freixanet, Víctor, ‘Geometría Solar’, *Heliodon*, 2015, 16
- Gallo, Alessandro, Aitor Marzo, Edward Fuentealba, and Elisa Alonso, ‘High Flux Solar Simulators for Concentrated Solar Thermal Research: A Review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77.April (2017), 1385–1402
<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.056>>
- Generaci, Sector D E, D E Energ, and Ctrica Renovable Agosto, ‘Sector de Generación de Energía Eléctrica Renovable Agosto 2019’, 2019
- Hybrid, Phase, and Stepper Servo, ‘HSS86 2-phase Hybrid Stepper Servo Driver’
- Iberdrola, ‘Efectos Ambientales de La Producción Y Distribución de Energía Eléctrica : Acciones Para Su Control y Corrección’, *Iberdrola*, 2013
- Islam, Md Tasbirul, Nazmul Huda, A. B. Abdullah, and R. Saidur, ‘A Comprehensive Review of State-of-the-Art Concentrating Solar Power (CSP) Technologies: Current Status and Research Trends’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91.April (2018), 987–1018 <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>>
- M, Ing Pedro Sarmiento, ‘Energía Solar, Aplicaciones e Ingeniería’, 2008
- Nsengiyumva, Walter, Shi Guo Chen, Lihua Hu, and Xueyong Chen, ‘Recent Advancements and Challenges in Solar Tracking Systems (STS): A Review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81.April 2017 (2018), 250–79
<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>>
- Peinado Gonzalo, A., A. Pliego Marugán, and F.P. García Márquez, ‘A Review of the Application Performances of Concentrated Solar Power Systems’, *Applied Energy*, 255.March (2019), 113893
<<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113893>>
- Pfahl, Andreas, ‘Survey of Heliostat Concepts for Cost Reduction’, *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 136.1 (2014), 1–9
<<https://doi.org/10.1115/1.4024243>>

- Pfahl, Andreas, Joe Coventry, Marc Röger, Fabian Wolfertstetter, Juan Felipe Vásquez-Arango, Fabian Gross, and others, 'Progress in Heliostat Development', *Solar Energy*, 152 (2017), 3–37 <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.029>>
- Walraven, Robert, 'Calculating the Position of the Sun', *Solar Energy*, 20.5 (1978), 393–97 <[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90155-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90155-X)>

ANEXOS

1. Código programado para primer heliostato implementado

```
#include <Stepper.h>
#include<Wire.h>
#include "RTClib.h"

// RTC_DS1307 rtc;
RTC_DS3231 rtc;

//Variables_RTC
int hora;
int minuto;
int segundo;
int dia;
int mes;
int anio;
int es_bisiesto;
float dia_anio;
float lt;
float parametro_et;// parametro b
float cte_et=0.017214182;// (360/365)*(pi/180)
//float cte_1=0.986301369;//360/365
float cte_angulo_radian=0.017453292;
float et;//
float lstm;
float utc=-4;
float latitud=-33.04752;
float latitud_rad=latitud*cte_angulo_radian;
float longitud=-71.44249;
float longitud_rad=longitud*cte_angulo_radian;
float tc;
float lst;
float h,h_rad;
float dec_solar,dec_solar_rad;
float cenit, cenit_rad;
float azimut, azimut_rad;

//float pi= 3.14159265359

//vector_dia del año
int anio_normal[12]={0,31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334};
int anio_bisiesto[12]={0,31,60,91,121,152,182,213,244,274,305,335};

//Reflexiones
float cenit_target=0;//Angulo altura target cenit
float azimut_target=0;
float cenit_heliostato, azimut_heliostato;

//Motor cenit
const int stepsPerRevolution = 400*4;
```

```

const int vueltas_motor=400*4;
Stepper motor_cenit(vueltas_motor,6,7);
int activar_cenit=5;
boolean cenit_origen = false;
boolean calibrar_cenit = true;
//calibracion final de carrera cenit.
bool fc_c=false;

//Motor azimuth
const int stepsPerRevolution_azimut = 400*4;
const int vueltas_motor_azimut=400*4;
Stepper motor_azimut(vueltas_motor,9,10);
int activar_azimut=8;
boolean cenit_azimut = false;
boolean calibrar_azimut = true;
//calibracion final de carrera azimut.
bool fc_a=false;

//banderas estados
boolean lectura_angulo = false;
long angulo_a_pasos_cenit;
long angulo_a_pasos_azimut;
float angulo; //Angulo requerido.
long delta_cenit;
long delta_azimut;
long posicion_cenit;
long posicion_azimut;
float angulo_cenit_adquirido;
float angulo_azimut_adquirido;
bool ab_z=false;
bool ab_a=false;
bool P_z=false;
bool P_a=false;
bool T_E=false;

//desbordamiento
long contador_cenit, contador_azimut;
//Estados
int estado_actual=0;
#define E0 0
#define E1 1
#define E2 2
#define E3 3
// Transiciones
int habilitar_transicion=0;
#define HT1 0
#define HT2 1
#define HT3 2
#define HT4 3
//Temporizadores
long t_est_0=1000;
unsigned long t_previo_est_0=1000;

```

```

//pin entrada
int fc_cenit=3;
int fc_azimut=2;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) {
    }
    pinMode(fc_cenit, INPUT);
    pinMode(activar_cenit, OUTPUT);
    motor_cenit.setSpeed(80);
    motor_azimut.setSpeed(80);
    if (!rtc.begin()) {
        Serial.println(("Couldn't find RTC"));
        while (1);
    }
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    control_estados();
    estados();
}

void control_estados(){
    unsigned long t_actual=millis();

    switch (habilitar_transicion){
        case HT1:
            if((fc_c==1)&&(fc_a==1)){
                estado_actual=E1;
            }
            break;
        case HT2:
            if((ab_z==true)&&(ab_a=true)){
                estado_actual=E2;
            }
            break;
        case HT3:
            if((P_z==true)&&(P_a==true)){
                estado_actual=E3;
            }
            break;
        case HT4:
            if(T_E==true){
                estado_actual=E1;
            }
            break;
    }
    //switch(estado_actual)
}
//control_estados()
//Accionamientos de los estados

```

```

void estados() {
  switch (estado_actual) {
    case E0:
      estado_0();
      habilitar_transicion=0;
      break;
    case E1:
      estado_1();
      habilitar_transicion=1;
      break;
    case E2:
      estado_2();
      habilitar_transicion=2;
      break;
    case E3:
      estado_3();
      habilitar_transicion=3;
      break;
  } //switch (estado_actual)
} //void estados()

void estado_0() {
  //Calibración cenit
  Serial.println("Estado_0");

  while(digitalRead(fc_cenit)==1) {
    digitalWrite(activar_cenit, LOW);
    motor_cenit.step(-1);
  }
  delay(2000);
  while(digitalRead(fc_cenit)==0) {
    digitalWrite(activar_cenit, LOW);
    motor_cenit.step(1);
  }
  posicion_cenit=0;
  fc_c = true;

  //Calibración Azimut
  while(digitalRead(fc_azimut)==1) {
    digitalWrite(activar_azimut, LOW);
    motor_azimut.step(-1);
  }
  delay(2000);
  while(digitalRead(fc_azimut)==0) {
    digitalWrite(activar_azimut, LOW);
    motor_azimut.step(1);
  }
  posicion_azimut=0;
  fc_a = true;
} //void estado_0()

void estado_1() {
  calculo_angulos();
  lectura_angulo=true;
}

```

```

    if(lectura_angulo){
        //cenit
        Serial.println(angulo_a_pasos_cenit =
pasos_angulo_cenit(cenit_heliostato));
        delta_cenit=angulo_a_pasos_cenit-posicion_cenit;
        posicion_cenit=angulo_a_pasos_cenit;
        Serial.println(delta_cenit);
        ab_z=true;
        // Azimut
        Serial.println(angulo_a_pasos_azimut =
pasos_angulo_azimut(azimut_heliostato));
        delta_azimut=angulo_a_pasos_azimut-posicion_azimut;
        posicion_azimut=angulo_a_pasos_azimut;
        Serial.println(delta_azimut);
        ab_a=true;

        //
    }
} //void estado_1()

void estado_2(){
    Serial.println("Estado_2(mover_motores)");

    //motor cenit
    if (delta_cenit<0){
        contador_cenit=0;
        while(contador_cenit>delta_cenit){
            motor_cenit.step(-1);
            contador_cenit--;
        }
        P_z=true;
        Serial.println(contador_cenit);
    }
    else{ //delta_cenit>0
        contador_cenit=0;
        while(contador_cenit<delta_cenit){
            motor_cenit.step(1);
            contador_cenit++;
        }
        Serial.println(contador_cenit);
        P_z=true;
    }
}

//Motor azimut

    if (delta_azimut<0){
        contador_azimut=0;
        while(contador_azimut>delta_azimut){
            motor_azimut.step(-1);
            contador_azimut--;
        }
        Serial.println(contador_azimut);
        P_a=true;
    }
}

```

```

    else{
        contador_azimut=0;
        while(contador_azimut<delta_azimut){
            motor_azimut.step(1);
            contador_azimut++;
        }
        Serial.println(contador_azimut);
        P_a=true;
    }

//  motor_cenit.step(delta_cenit);
//  P_z=true;
//  motor_azimut.step(delta_azimut);
//  P_a=true;
} //void estado_2()

void estado_3(){
    Serial.println("Estado_3");
    delay(20000);
    T_E=true;
    lectura_angulo=false;
} //void estado_3()

void calculo_angulos(){
    DateTime ahora = rtc.now();
    hora=ahora.hour();
    minuto=ahora.minute();
    segundo=ahora.second();
    dia=ahora.day();
    mes=ahora.month();
    anio=ahora.year();
    // Condiciones año bisiesto.
    es_bisiesto=anio%4;
//  Serial.println(hora);
//  Serial.println(minuto);
//  Serial.println(segundo);
//  Serial.println(dia);
//  Serial.println(mes);
//  Serial.println(anio);

//Cálculo de Hora Local.(lt,en horas)

lt=(float)hora+(float)minuto/60+(float)segundo/3600;
//Serial.println(anio_normal[mes-1]);

if(es_bisiesto==0){
    dia_anio=dia+anio_bisiesto[mes-1];
}
else{
    dia_anio=dia+anio_normal[mes-1];
}

```

```

    parametro_et=cte_et*(dia_anio-81);//en radianes
//Ecuacion de tiempo, minutos
    et=9.87*sin(2*parametro_et)-7.53*cos(parametro_et)-
1.5*sin(parametro_et);//ecuacion de tiempo

//Tiempo solar medio.(lstm,grados)
lstm=15*utc;

//factor de corrección de tiempo, (tc, en minutos)
tc=et+4*(longitud-lstm);

// Cálculo de hora solar aparente. (lst, en horas)
lst=lt+tc/60;

//Calculo hora solar, (h,grados)
h=15*(lst-12);
h_rad=h*cte_angulo_radian;

//Declinación solar, (dec_solar,grados)
dec_solar=23.45*sin(cte_et*(284+dia_anio));
dec_solar_rad=dec_solar*cte_angulo_radian;

//Cenit, grados
cenit=(57.2958)*asin(sin(dec_solar_rad)*sin(latitud_rad)+cos(dec_solar_rad)*cos(latitud_rad)*cos(h_rad));// En grados, 57.2958
radianes_angulo
cenit_rad=asin(sin(dec_solar_rad)*sin(latitud_rad)+cos(dec_solar_rad)*cos(latitud_rad)*cos(h_rad));// En radianes

//Azimut, grados
azimut=(57.2958)*acos((sin(dec_solar_rad)*cos(latitud_rad)-cos(dec_solar_rad)*sin(latitud_rad)*cos(h_rad))/cos(cenit_rad));//
En grados, 57.2958 radianes_angulo

if (h>0){
    azimut=-azimut;
}

// Reflexión cenit.
cenit_heliostato=(cenit+cenit_target)/2;

//Reflexión azimut.
azimut_heliostato=(azimut+azimut_target)/2;

//Serial.print(cenit_heliostato,4);
//Serial.print(" y ");
//Serial.println(azimut_heliostato,4);
}

long pasos_angulo_azimut(float angulo){
long p_a;//pasos correspondiente al angulo, (variable local).
int angulo_sup=-47;

```

```

int angulo_inf=40;
long vuelta_sup=1600*43L;
int vuelta_inf=0;
float pendiente=-790.8;//z=(vuelta_sup-vuelta_inf)/(angulo_sup-
angulo_inf);
//Saturador

if(angulo>angulo_inf){
    p_a=vuelta_inf;
    return(p_a);
}
if(angulo<angulo_sup){
    p_a=vuelta_sup;
    return(p_a);
}

if((angulo>=angulo_sup)&&(angulo<=angulo_inf)){
    p_a=pendiente*(angulo-angulo_sup)+vuelta_sup;
    return(p_a);
}
}

long pasos_angulo_cenit(float angulo){
int angulo_sup=82;
int angulo_inf=0;
long vuelta_sup=1600*89L;
int vuelta_inf=0;
float pendiente=1736.59;//z=(vuelta_sup-vuelta_inf)/(angulo_sup-
angulo_inf);
long p_a;//pasos correspondiente al angulo

if(angulo<angulo_inf){
    p_a=vuelta_inf;
    return(p_a);
}
if(angulo>angulo_sup){
    p_a=vuelta_sup;
    return(p_a);
}

if((angulo<=angulo_sup)&&(angulo>=angulo_inf)){
    p_a=pendiente*(angulo-angulo_inf)+vuelta_inf;
    return(p_a);
}
}

```

2. Código programado para segundo heliostato implementado

```
#include <Stepper.h>
#include<Wire.h>
#include "RTClib.h"

// RTC_DS1307 rtc;
RTC_DS3231 rtc;

//Variables_RTC
int hora;
int minuto;
int segundo;
int dia;
int mes;
int anio;
int es_bisiesto;
float dia_anio;
float lt;
float parametro_et;// parametro b
float cte_et=0.017214182;// (360/365)*(pi/180)
//float cte_1=0.986301369;//360/365
float cte_angulo_radian=0.017453292;
float et;//
float lstm;
float utc=-4;
float latitud=-33.04752;
float latitud_rad=latitud*cte_angulo_radian;
float longitud=-71.44249;
float longitud_rad=longitud*cte_angulo_radian;
float tc;
float lst;
float h,h_rad;
float dec_solar,dec_solar_rad;
float cenit, cenit_rad;
float azimut, azimut_rad;

//float pi= 3.14159265359

//vector_dia del año
int anio_normal[12]={0,31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334};
int anio_bisiesto[12]={0,31,60,91,121,152,182,213,244,274,305,335};

//Reflexiones
float cenit_target=0;//Angulo altura target cenit
float azimut_target=-37.3;
float cenit_heliostato, azimut_heliostato;

//Motor cenit
const int stepsPerRevolution = 200*4;
```

```

const int vueltas_motor=200*4;
Stepper motor_cenit(vueltas_motor,6,7);
int activar_cenit=5;
boolean cenit_origen = false;
boolean calibrar_cenit = true;
//calibracion final de carrera cenit.
bool fc_c=false;

//Motor azimuth
const int stepsPerRevolution_azimut = 200*4;
const int vueltas_motor_azimut=200*4;
Stepper motor_azimut(vueltas_motor,9,10);
int activar_azimut=8;
boolean cenit_azimut = false;
boolean calibrar_azimut = true;
//calibracion final de carrera azimut.
bool fc_a=false;

//banderas estados
boolean lectura_angulo = false;
long angulo_a_pasos_cenit;
long angulo_a_pasos_azimut;
float angulo; //Angulo requerido.
long delta_cenit;
long delta_azimut;
long posicion_cenit;
long posicion_azimut;
float angulo_cenit_adquirido;
float angulo_azimut_adquirido;
bool ab_z=false;
bool ab_a=false;
bool P_z=false;
bool P_a=false;
bool T_E=false;
//desbordamiento
long contador_cenit, contador_azimut;
//Estados
int estado_actual=0;
#define E0 0
#define E1 1
#define E2 2
#define E3 3
// Transiciones
int habilitar_transicion=0;
#define HT1 0
#define HT2 1
#define HT3 2
#define HT4 3
//Temporizadores
long t_est_0=1000;
unsigned long t_previo_est_0=1000;

```

```

//pin entrada
int fc_cenit=2;//(verde)
int fc_azimut=4;//(blanco)
//int fc_azimut_final=3;//(negro)

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) {
    }
    pinMode(fc_cenit, INPUT);
    pinMode(activar_cenit, OUTPUT);
    motor_cenit.setSpeed(400);
    motor_azimut.setSpeed(400);
    if (!rtc.begin()) {
        Serial.println(("Couldn't find RTC"));
        while (1);
    }
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    control_estados();
    estados();
}

void control_estados(){
    unsigned long t_actual=millis();

    switch (habilitar_transicion){
        case HT1:
            if((fc_c==1)&&(fc_a==1)){
                estado_actual=E1;
            }
            break;
        case HT2:
            if((ab_z==true)&&(ab_a=true)){
                estado_actual=E2;
            }
            break;
        case HT3:
            if((P_z==true)&&(P_a==true)){
                estado_actual=E3;
            }
            break;
        case HT4:
            if(T_E==true){
                estado_actual=E1;
            }
            break;
    }
    //switch(estado_actual)
}
//control_estados()
//Accionamientos de los estados

```

```

void estados() {
  switch (estado_actual) {
    case E0:
      estado_0();
      habilitar_transicion=0;
      break;
    case E1:
      estado_1();
      habilitar_transicion=1;
      break;
    case E2:
      estado_2();
      habilitar_transicion=2;
      break;
    case E3:
      estado_3();
      habilitar_transicion=3;
      break;
  } //switch (estado_actual)
} //void estados()

void estado_0() {
  //Calibración cenit
  Serial.println("Estado_0");

  while(digitalRead(fc_cenit)==1) {
    digitalWrite(activar_cenit, LOW);
    motor_cenit.step(-1);
  }
  delay(2000);
  while(digitalRead(fc_cenit)==0) {
    digitalWrite(activar_cenit, LOW);
    motor_cenit.step(1);
  }
  posicion_cenit=0;
  fc_c = true;

  //Calibración Azimut
  while(digitalRead(fc_azimut)==1) {
    digitalWrite(activar_azimut, LOW);
    motor_azimut.step(-1);
  }
  delay(2000);
  while(digitalRead(fc_azimut)==0) {
    digitalWrite(activar_azimut, LOW);
    motor_azimut.step(1);
  }
  posicion_azimut=0;
  fc_a = true;
} //void estado_0()

void estado_1() {
  calculo_angulos();
  // angulo_cenit_adquirido=

```

```

// while(lectura_angulo==false){
//   Serial.println("Ingresar angulo cenit:");
//   angulo_cenit_adquirido=adquirir_angulo();
//   Serial.println("Ingresar angulo azimuth:");
//   angulo_azimut_adquirido=adquirir_angulo();
//   lectura_angulo=true;
// }
// if(lectura_angulo){
//   //cenit
//   Serial.println(angulo_a_pasos_cenit =
pasos_angulo_cenit(cenit_heliostato));
//   delta_cenit=angulo_a_pasos_cenit-posicion_cenit;
//   posicion_cenit=angulo_a_pasos_cenit;
//   Serial.println(delta_cenit);
//   ab_z=true;
//   // Azimut
//   Serial.println(angulo_a_pasos_azimut =
pasos_angulo_azimut(azimut_heliostato));
//   delta_azimut=angulo_a_pasos_azimut-posicion_azimut;
//   posicion_azimut=angulo_a_pasos_azimut;
//   Serial.println(delta_azimut);
//   ab_a=true;

// }
}
}

void estado_1()

void estado_2() {
  Serial.println("Estado_2(mover_motores)");

  //motor cenit
  if (delta_cenit<0){
    contador_cenit=0;
    while(contador_cenit>delta_cenit){
      motor_cenit.step(-1);
      contador_cenit--;
    }
    P_z=true;
    Serial.println(contador_cenit);
  }
  else{
    contador_cenit=0;
    while(contador_cenit<delta_cenit){
      motor_cenit.step(1);
      contador_cenit++;
    }
    Serial.println(contador_cenit);
    P_z=true;
  }
}

//Motor azimuth

if (delta_azimut<0){
  contador_azimut=0;

```

```

        while(contador_azimut>delta_azimut){
            motor_azimut.step(-1);
            contador_azimut--;
        }
        Serial.println(contador_azimut);
        P_a=true;
    }
    else{
        contador_azimut=0;
        while(contador_azimut<delta_azimut){
            motor_azimut.step(1);
            contador_azimut++;
        }
        Serial.println(contador_azimut);
        P_a=true;
    }

// motor_cenit.step(delta_cenit);
// P_z=true;
// motor_azimut.step(delta_azimut);
// P_a=true;
} //void estado_2()

void estado_3(){
    Serial.println("Estado_3");
    delay(20000);
    T_E=true;
    lectura_angulo=false;
} //void estado_3()

void calculo_angulos(){
    DateTime ahora = rtc.now();
    hora=ahora.hour();
    minuto=ahora.minute();
    segundo=ahora.second();
    dia=ahora.day();
    mes=ahora.month();
    anio=ahora.year();
    es_bisiesto=anio%4;
// Serial.println(hora);
// Serial.println(minuto);
// Serial.println(segundo);
// Serial.println(dia);
// Serial.println(mes);
// Serial.println(anio);

//Cálculo de Hora Local.(lt,en horas)

lt=(float)hora+(float)minuto/60+(float)segundo/3600;
//Serial.println(anio_normal[mes-1]);

```

```

if(es_bisiesto==0){
    dia_anio=dia+anio_bisiesto[mes-1];
}
else{
    dia_anio=dia+anio_normal[mes-1];
}

    parametro_et=cte_et*(dia_anio-81);//en radianes
//Ecuacion de tiempo, minutos
    et=9.87*sin(2*parametro_et)-7.53*cos(parametro_et)-
1.5*sin(parametro_et);//ecuacion de tiempo

//Tiempo solar medio.(lstm,grados)
lstm=15*utc;

//factor de corrección de tiempo, (tc, en minutos)
tc=et+4*(longitud-lstm);

// Cálculo de hora solar aparente. (lst, en horas)
lst=lt+tc/60;

//Calculo hora solar, (h,grados)
h=15*(lst-12);
h_rad=h*cte_angulo_radian;

//Declinación solar, (dec_solar,grados)
dec_solar=23.45*sin(cte_et*(284+dia_anio));
dec_solar_rad=dec_solar*cte_angulo_radian;

//Cenit, grados
cenit=(57.2958)*asin(sin(dec_solar_rad)*sin(latitud_rad)+cos(dec_solar_rad)*cos(latitud_rad)*cos(h_rad));// En grados, 57.2958
radianes_angulo
cenit_rad=asin(sin(dec_solar_rad)*sin(latitud_rad)+cos(dec_solar_rad)*cos(latitud_rad)*cos(h_rad));// En radianes

//Azimut, grados
azimut=(57.2958)*acos((sin(dec_solar_rad)*cos(latitud_rad)-cos(dec_solar_rad)*sin(latitud_rad)*cos(h_rad))/cos(cenit_rad));//
En grados, 57.2958 radianes_angulo

if (h>0){
    azimut=-azimut;
}

// Reflexión cenit.
cenit_heliostato=(cenit+cenit_target)/2;

//Reflexión azimut.
azimut_heliostato=(azimut+azimut_target)/2;

//Serial.print(cenit_heliostato,4);
//Serial.print(" y ");

```

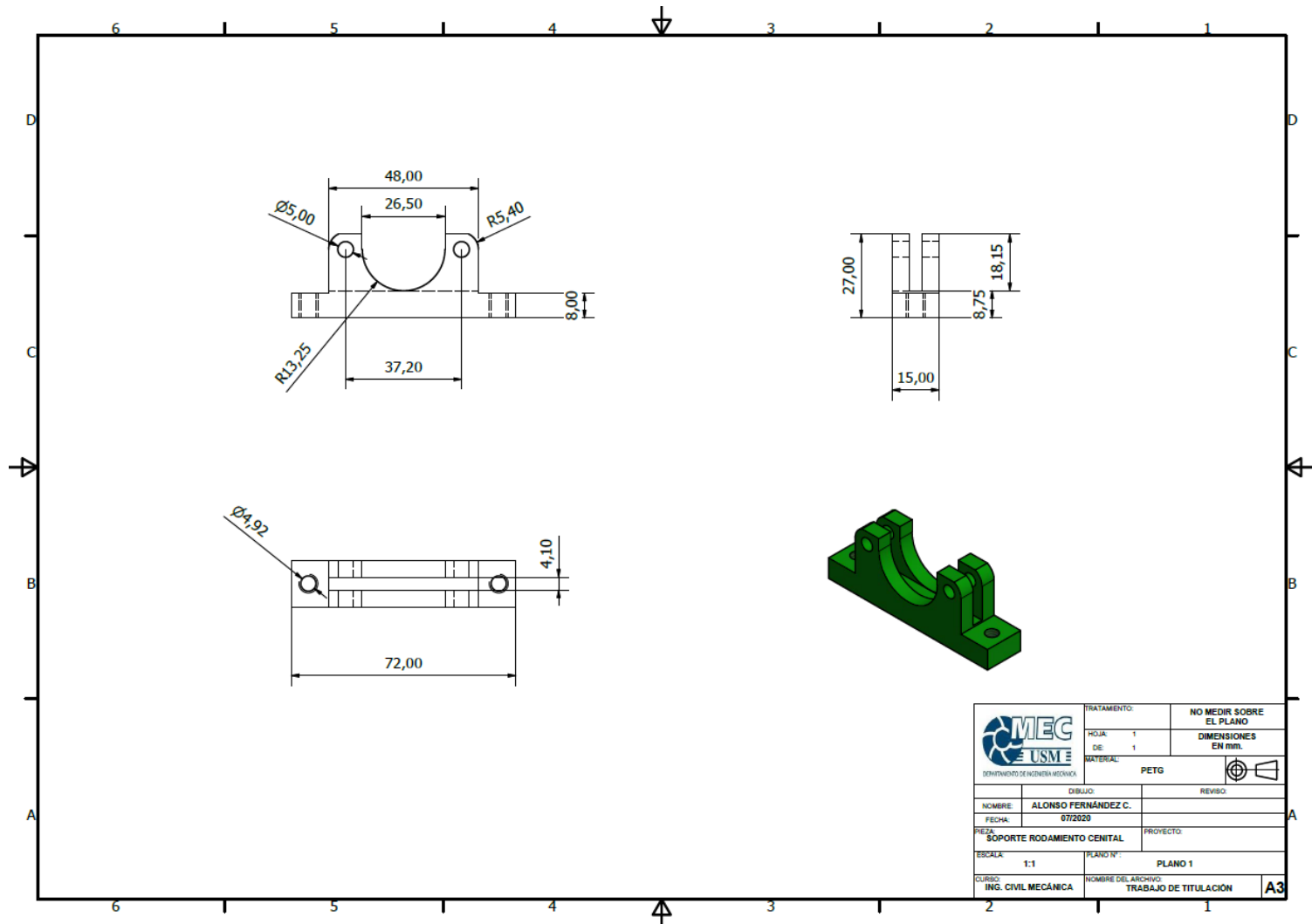
```
//Serial.println(azimut_heliostato,4);  
}
```

```
long pasos_angulo_azimut(float angulo){  
int angulo_sup=-60;  
int angulo_inf=57;  
long vuelta_sup=5120000;//1600*43L;  
int vuelta_inf=0;  
float pendiente=-42666.67;//z=(vuelta_sup-vuelta_inf)/(angulo_sup-  
angulo_inf);  
long p_a;//pasos correspondiente al angulo}  
//p_a=(pendiente*angulo)-2560000+vuelta_sup;  
p_a=pendiente*(angulo-angulo_sup)+vuelta_sup;  
return(p_a);  
}
```

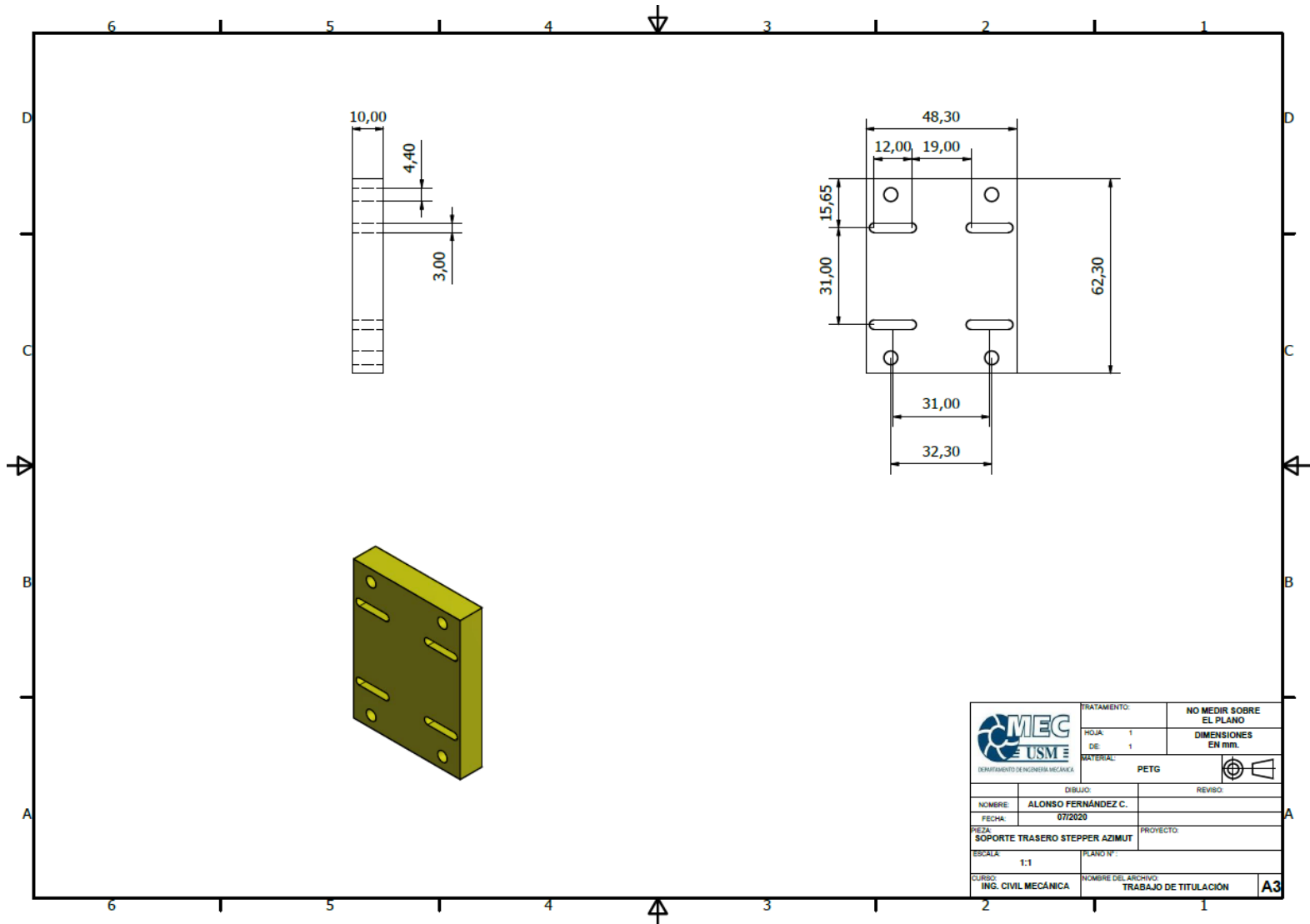
```
long pasos_angulo_cenit(float angulo){  
int angulo_sup=82;  
int angulo_inf=13;  
long vuelta_sup=5760000;//1600*89L;  
int vuelta_inf=0;  
float pendiente=83478.26;//z=(vuelta_sup-vuelta_inf)/(angulo_sup-  
angulo_inf);  
long p_a;//pasos correspondiente al angulo  
p_a=pendiente*(angulo-angulo_inf)+vuelta_inf;  
return(p_a);  
}
```

3. Planos de primero prototipo propuesto

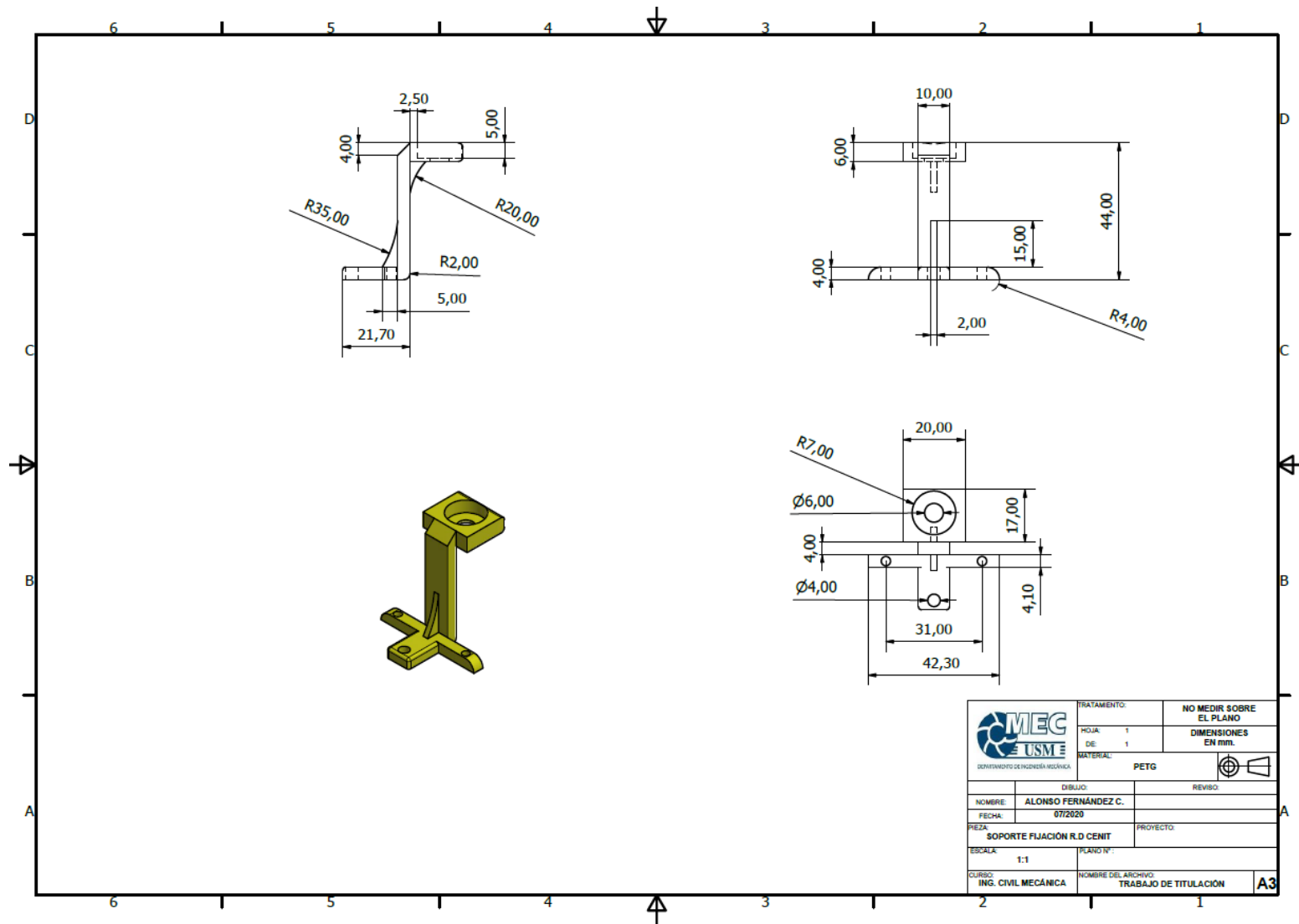
3.1. Soporte rodamiento cenital



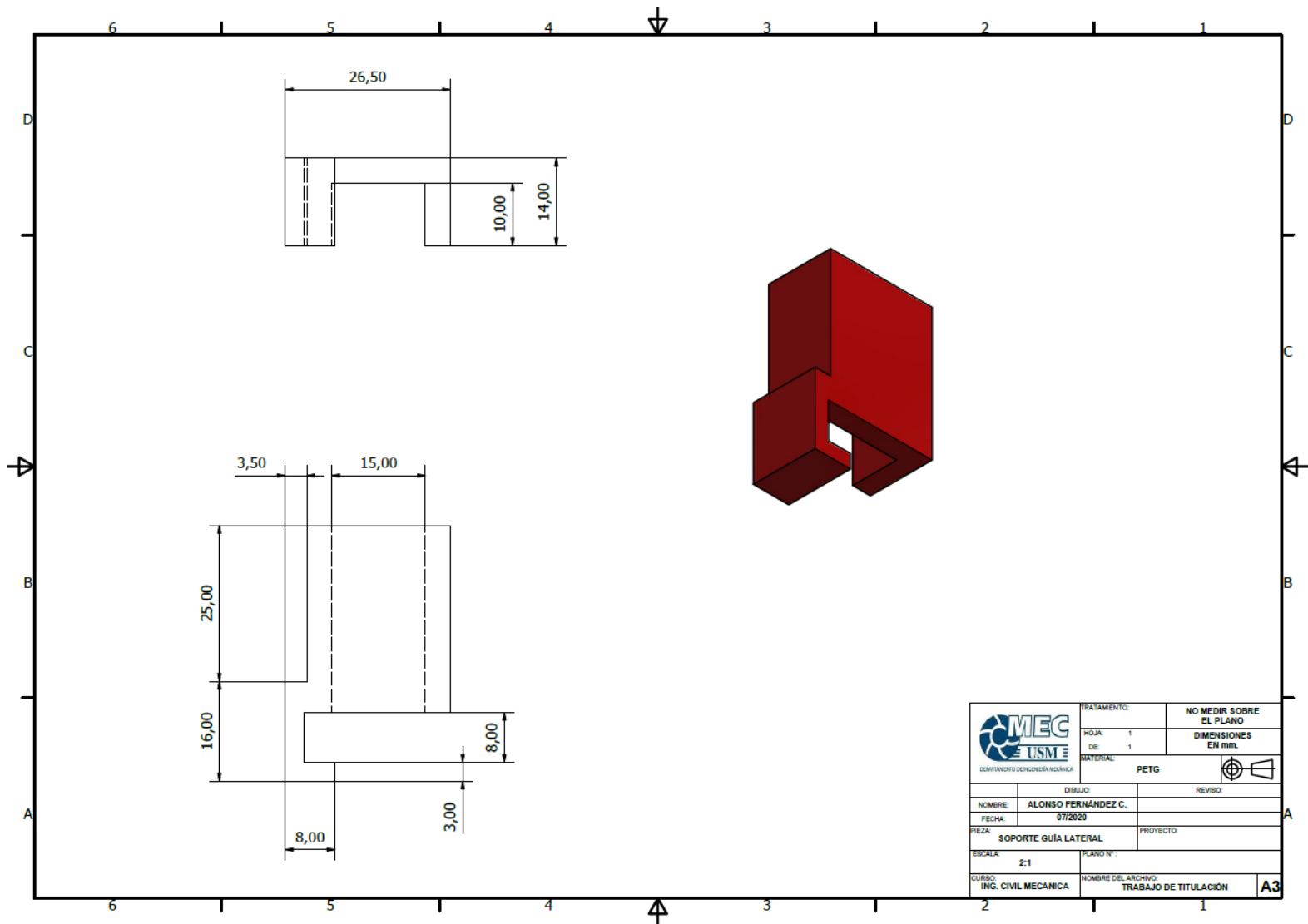
3.2. Soporte trasero stepper azimuth



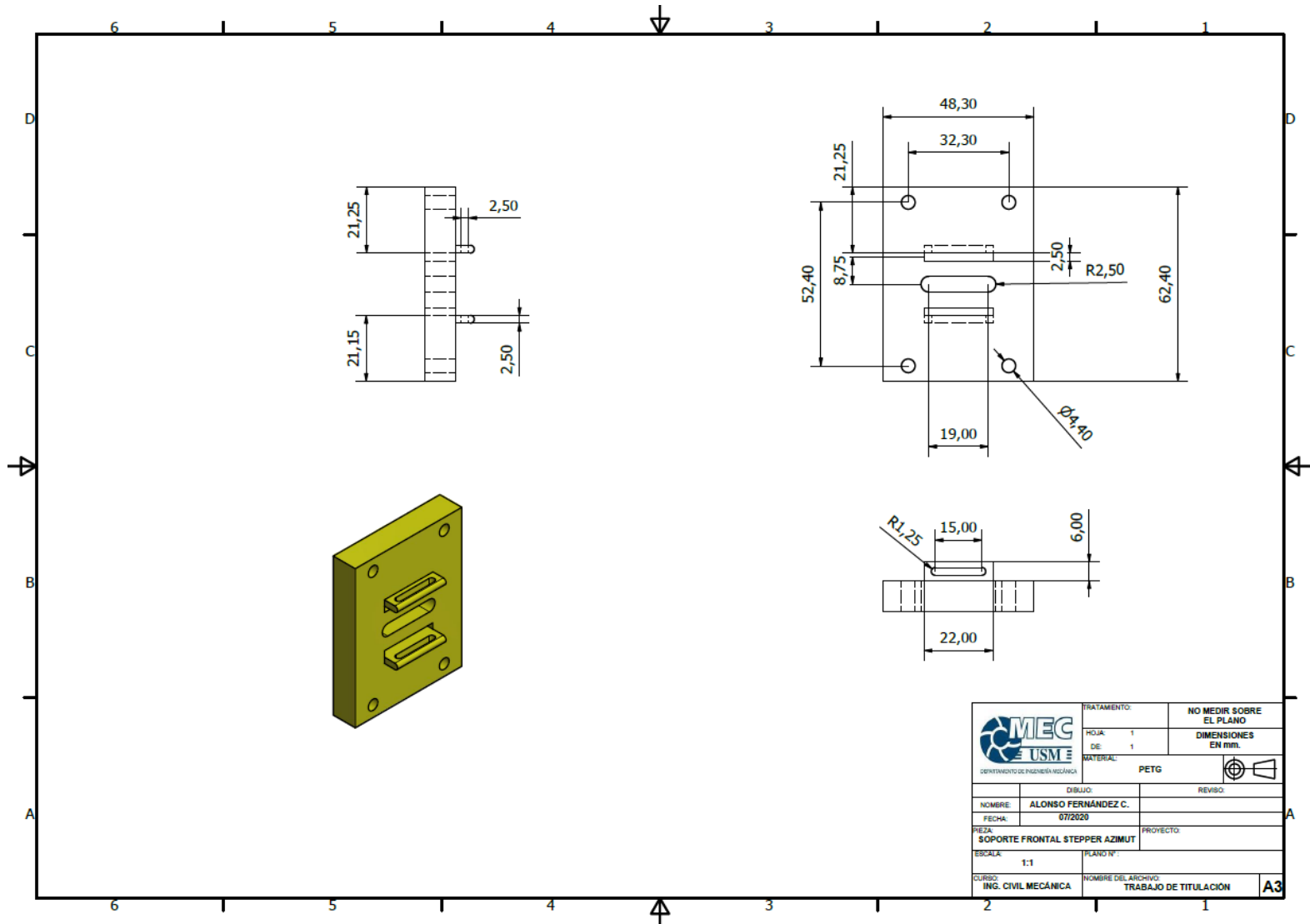
3.3. Soporte fijación de rueda dentada cenit



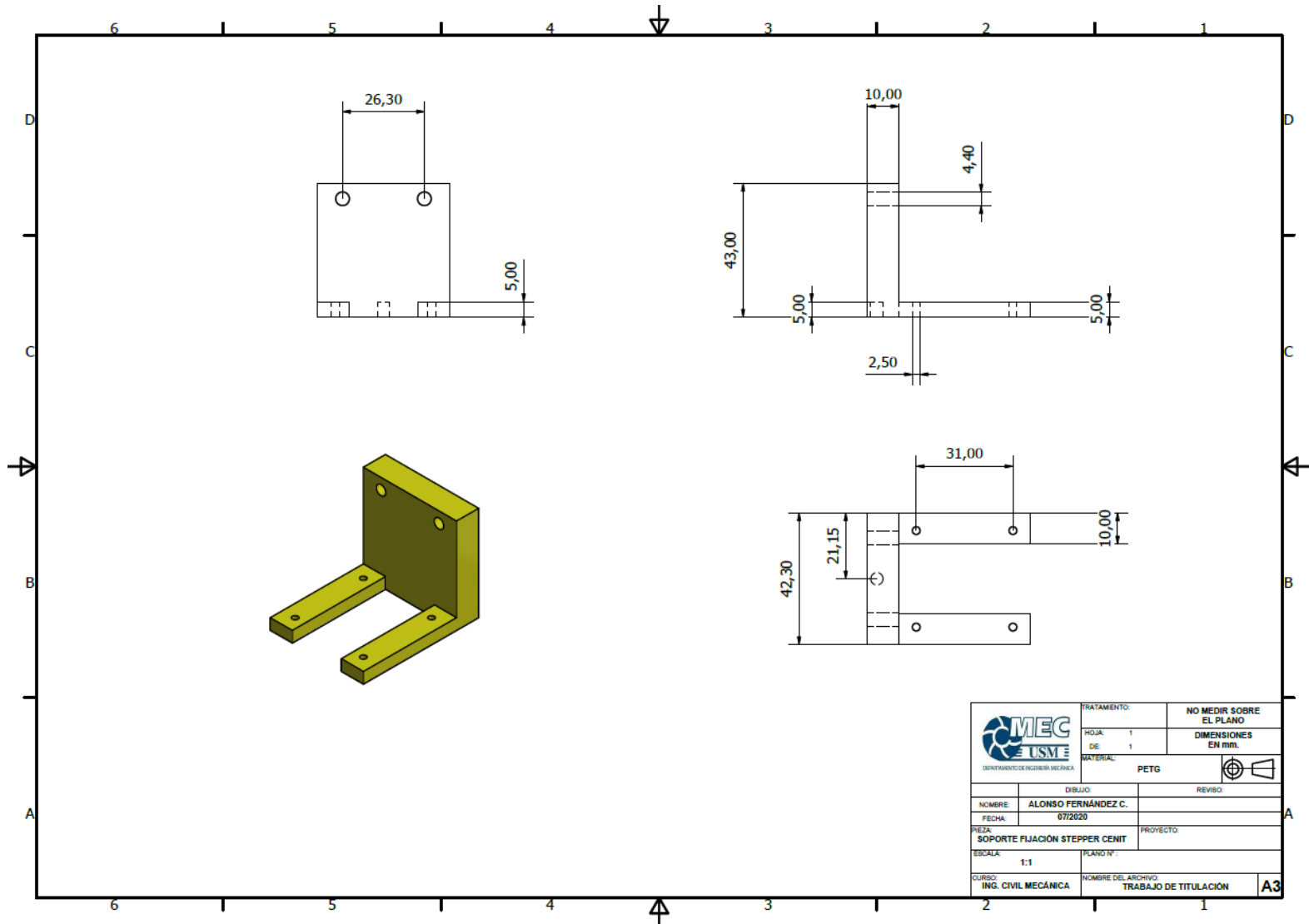
3.4. Soporte/Guía lateral



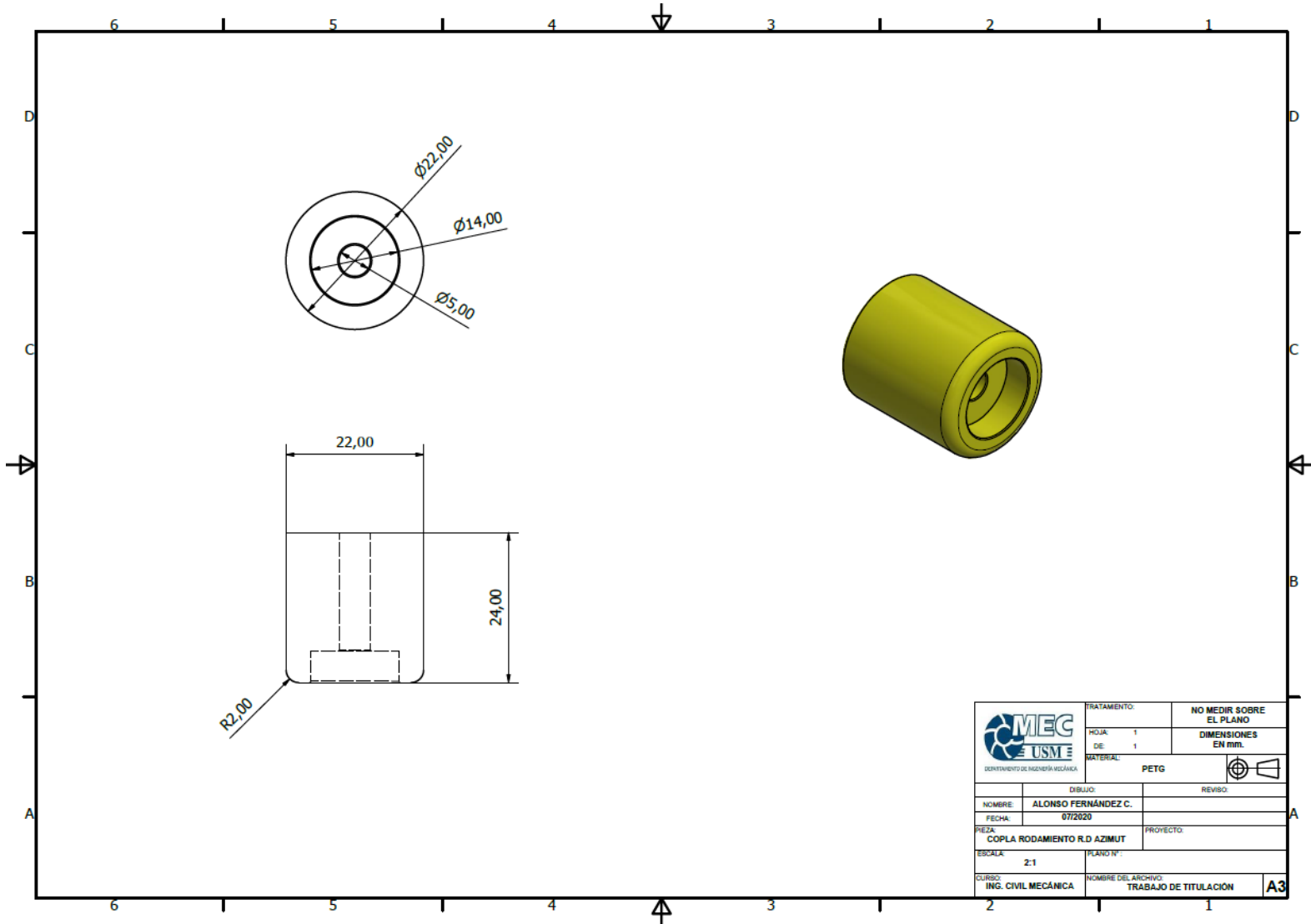
3.5. Soporte frontal stepper azimuth



3.6. Soporte de fijación stepper cenit



3.7. Copla de rodamiento para rueda dentada azimuth



Technical drawing of a mechanical part, showing front, top, and side views with dimensions and a 3D model.

Front View (Left):

- Overall width: 21,50
- Overall height: 22,00
- Top flange width: 16,00
- Bottom flange width: 1,65
- Top flange radius: R1,25

Top View (Right):

- Outer diameter: $\phi 22,00$
- Inner diameter: $\phi 13,95$
- Radius of outer fillet: R11,00
- Radius of inner fillet: R8,06
- Distance from center to top flange: 0,49
- Distance from center to bottom flange: 6,94

Side View (Bottom Right):

- Overall height: 13,00
- Bottom flange width: 9,30
- Radius of side fillet: R1,00
- Inner diameter: $\phi 2,50$

3D Model (Center):

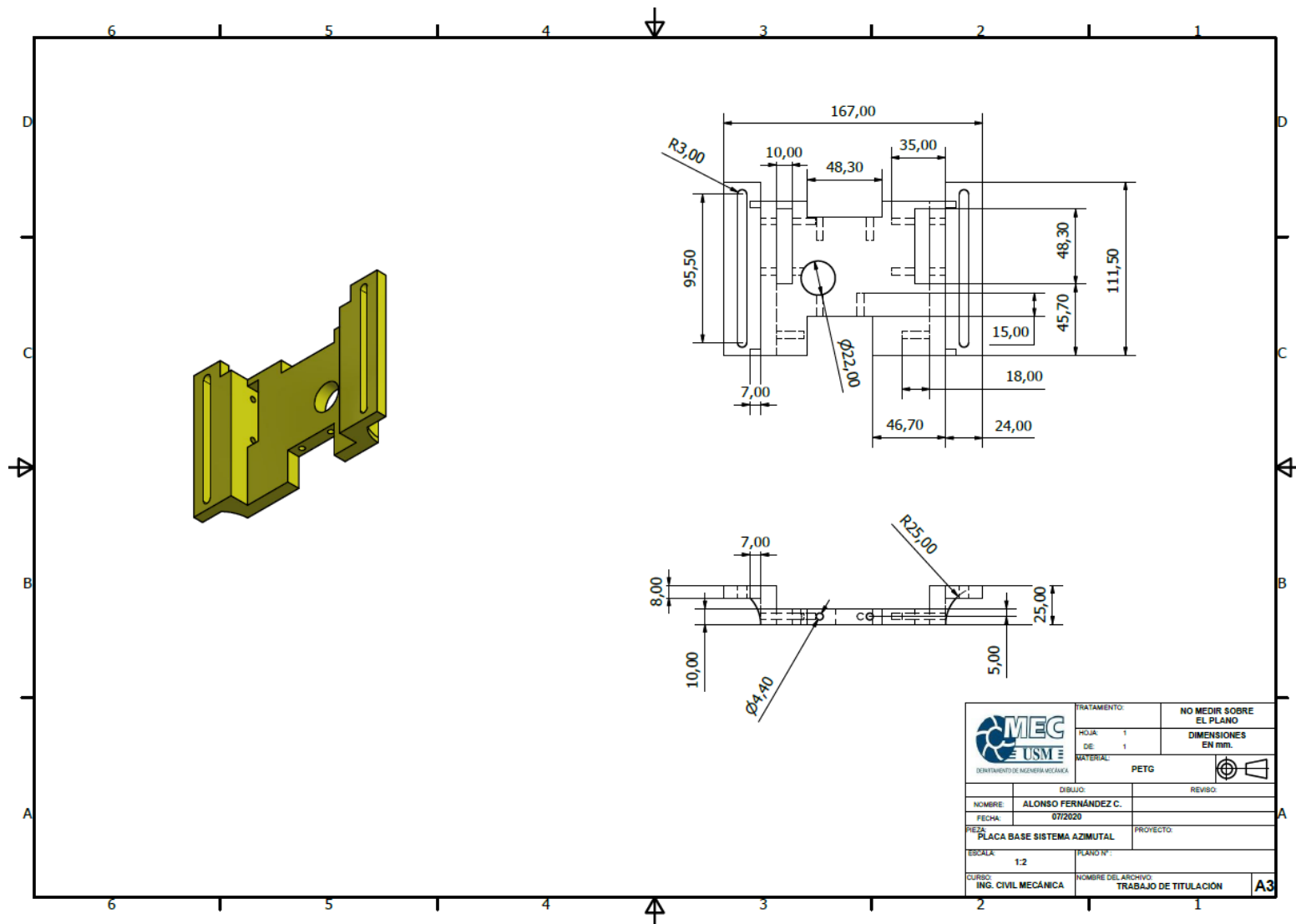
A 3D perspective view of the part, showing its L-shaped profile and the circular opening.

Metadata Table:

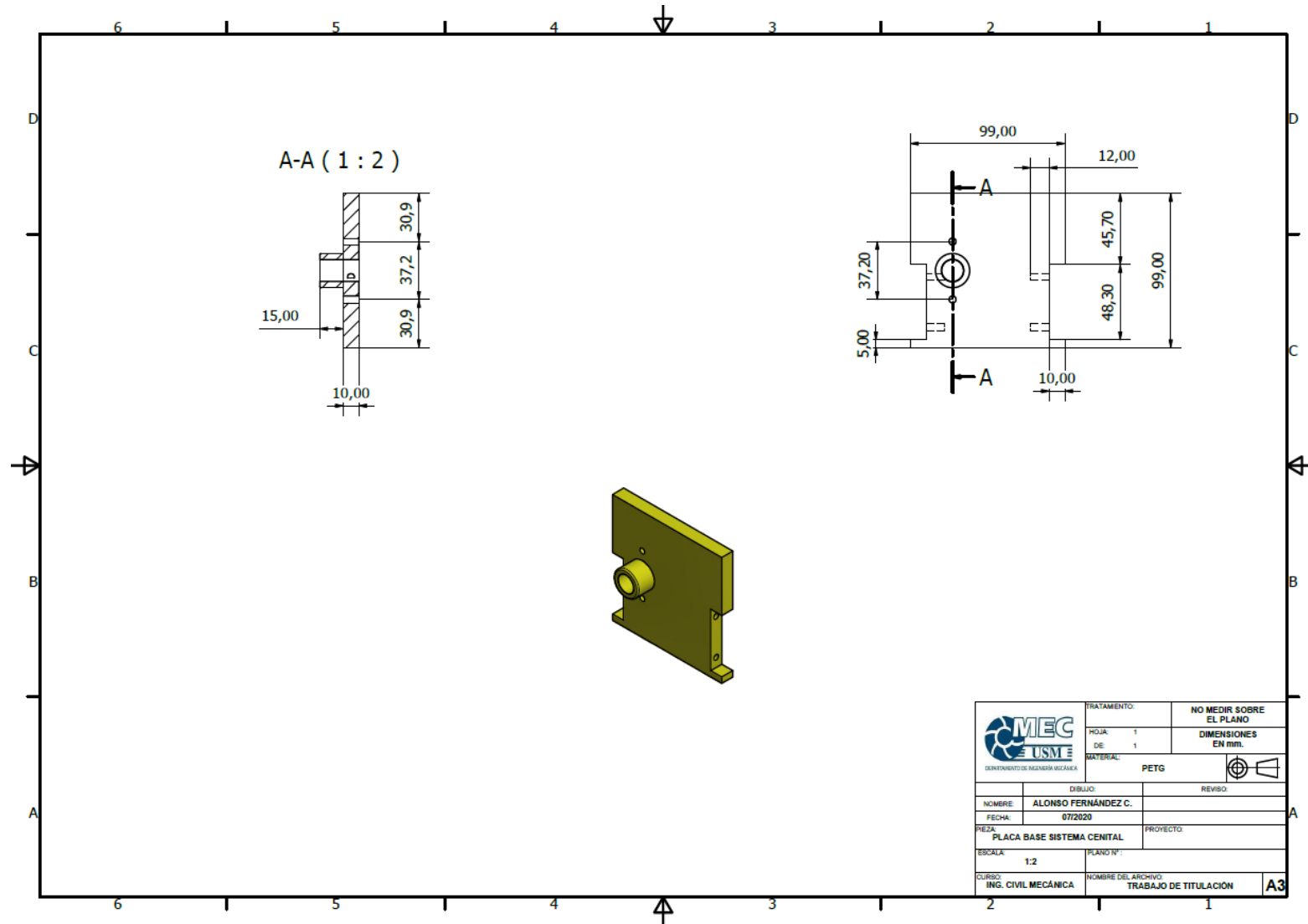
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA		TRATAMIENTO:	NO MEDIR SOBRE EL PLANO
		HOJA: 1	DIMENSIONES EN mm.
MATERIAL:		PETG	
DISEÑO:		REVISÓ:	
NOMBRE: ALONSO FERNÁNDEZ C.			
FECHA: 07/2020			
PIEZA: COPLA RODAMIENTO AZIMUT		PROYECTO:	
ESCALA: 2:1		PLANO N°:	
CURSO: ING. CIVIL MECÁNICA		NOMBRE DEL ARCHIVO: TRABAJO DE TITULACIÓN	

Sheet Label: A3

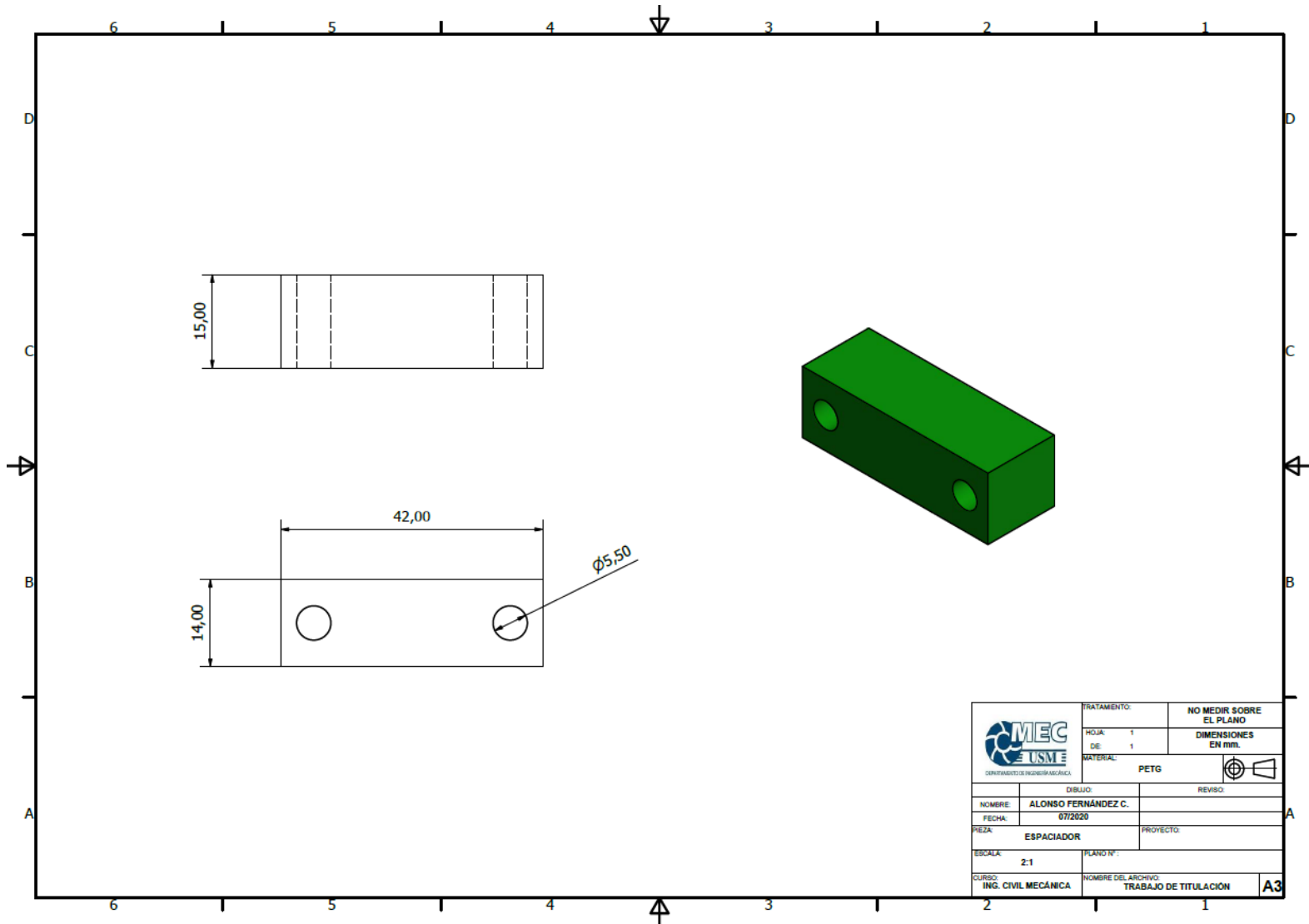
3.9. Placa base de sistema azimutal



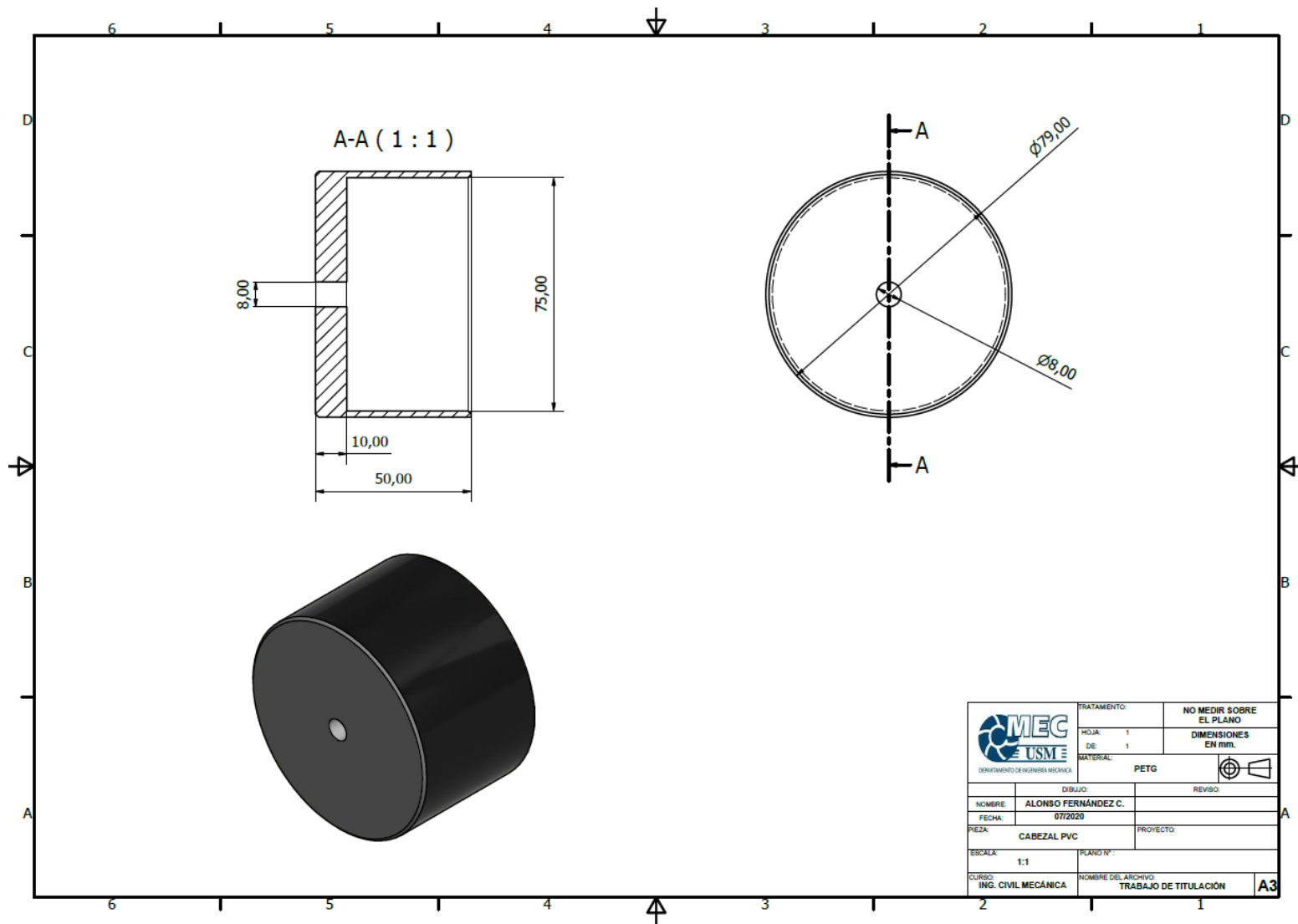
3.10. Placa base de sistema cenital



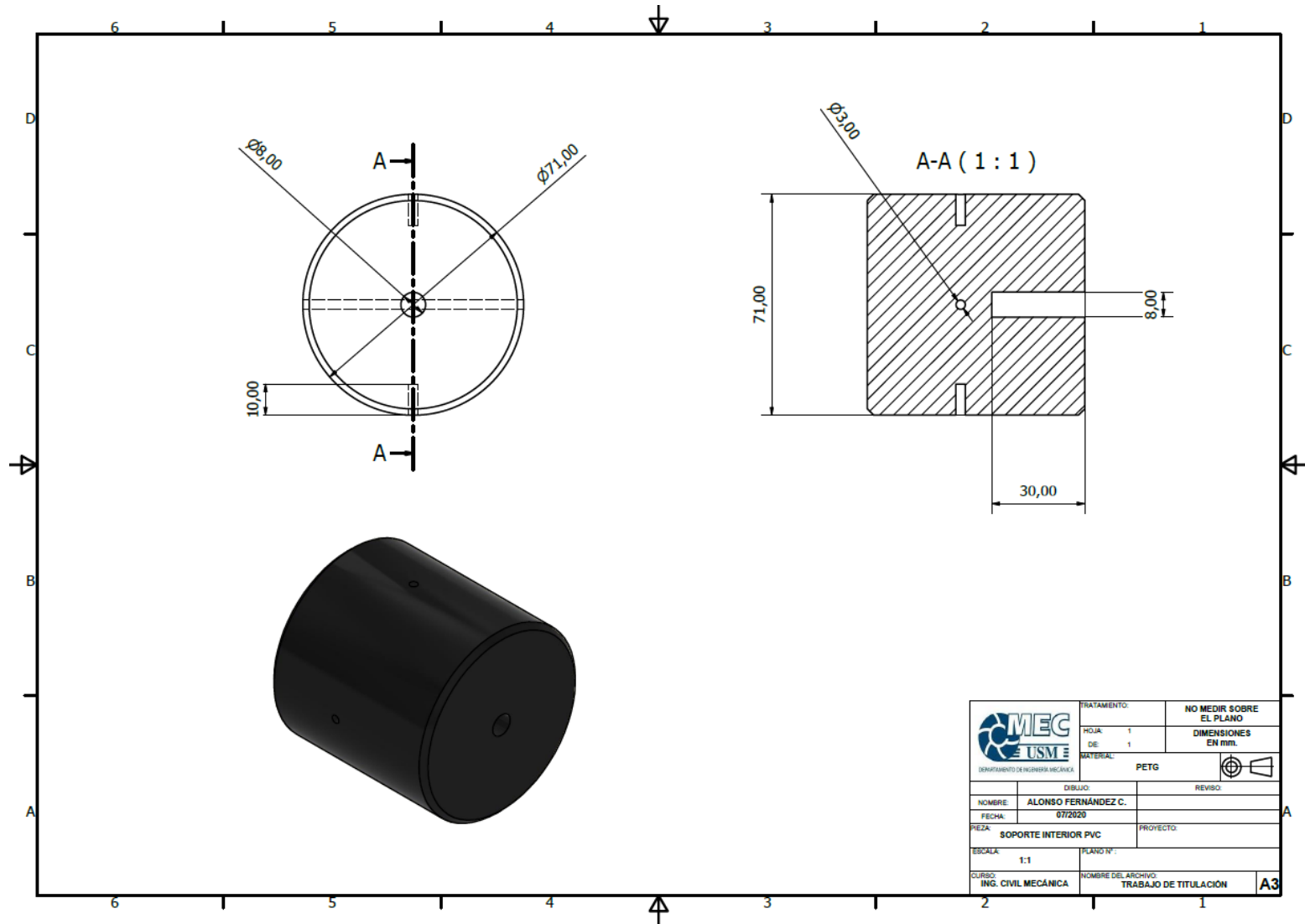
3.11. Espaciador



3.12. Cabezal PVC

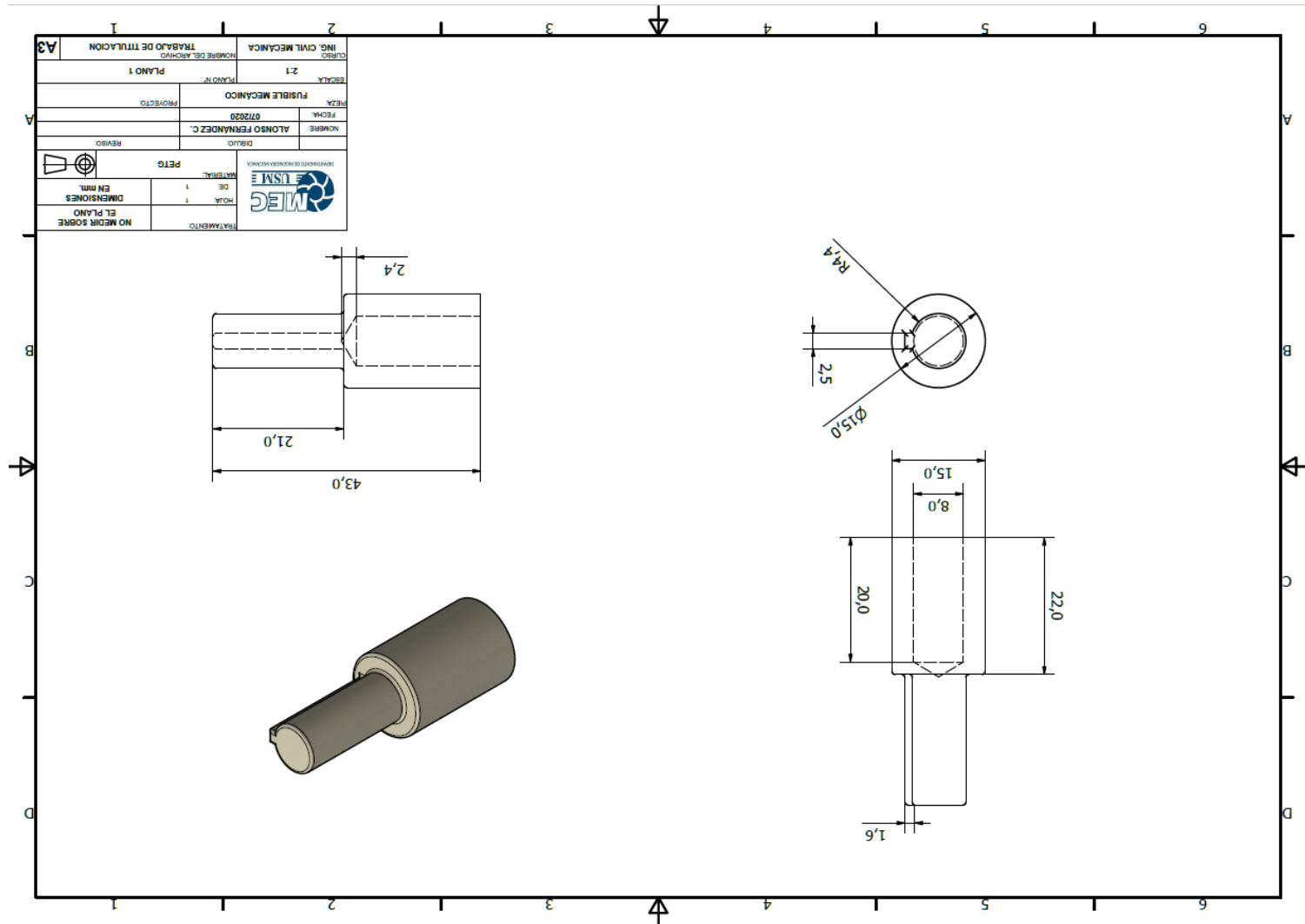


3.13. Soporte interior PVC

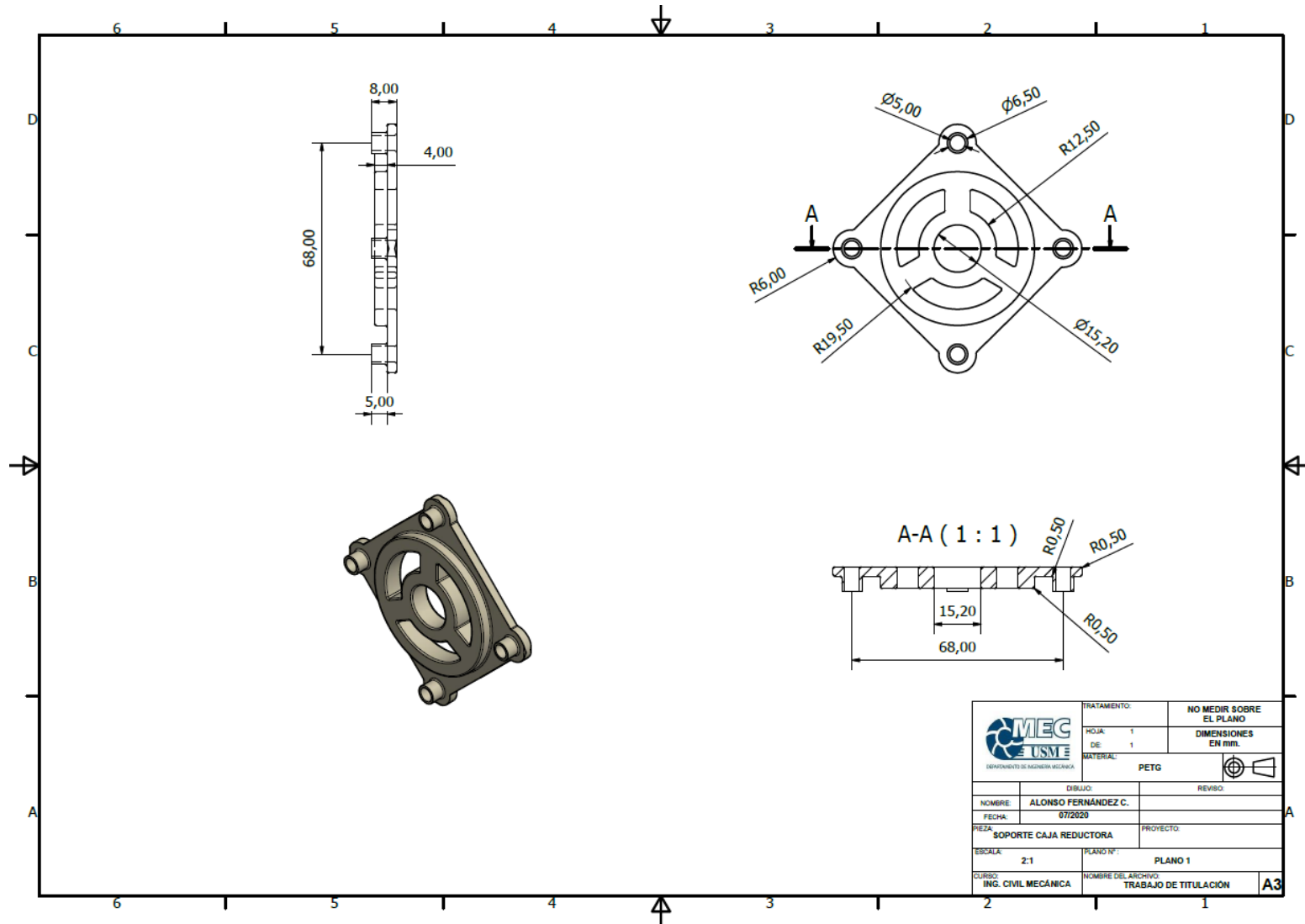


4. Planos de conjunto para ensamblaje de motor stepper del primer heliostato implementado

4.1. Fusible mecánico



4.2. Soporte caja reductora



4.3. Soporte de motor Stepper

