



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

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE
HELIÓSTATOS PARA UNA PLANTA DE CONCENTRACIÓN SOLAR
DE POTENCIA DE TORRE DE PEQUEÑA ESCALA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

NICOLÁS IGNACIO ENCINA FLORES

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PABLO MALDONADO AYLWIN
ANDRÉS CABA RUTTE

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: NICOLÁS IGNACIO ENCINA FLORES
FECHA: ENERO DE 2019
PROF. GUÍA: PATRICIO MENDOZA ARAYA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE ORIENTACIÓN DE HELIÓSTATOS
PARA UNA PLANTA DE CONCENTRACIÓN SOLAR DE TORRE DE PEQUEÑA ESCALA

El proyecto Solarbosch, de la empresa Enerbosch, es un proyecto de una central de concentración solar de torre de pequeña escala, que busca aprovechar el gran potencial solar existente en Chile, sobre todo en su zona norte. Varios son los desafíos que deben ser abordados en el diseño de una planta de estas características; uno de ellos y tema principal del actual trabajo de memoria corresponde al control automático de los heliostatos encargados de redirigir la radiación solar hacia la torre. El requerimiento principal que estos deben cumplir corresponde a que el error de apunte sea el menor posible.

En primer lugar, se desarrolla un modelo matemático que describe el movimiento de un heliostato con geometría de movimiento de tipo *pitch/roll*. Este modelo es vital para calcular la posición que debe adoptar un heliostato con el objetivo de apuntar a la torre; pero además, es necesario para desarrollar la metodología de calibración basada en el uso de una superficie objetivo ubicada en la torre central, la cual permite realizar mediciones de error. Para lograr esto último, el modelo considera posibles errores geométricos de construcción y/o instalación del heliostato, los cuales pueden ser estimados utilizando las mediciones mencionadas.

En segundo lugar se presenta el sistema de control desarrollado, el cual funciona completamente en lazo abierto, siendo esto posible gracias a las ventajas que presentan los motores paso a paso en tal contexto. La posición del Sol se calcula con un algoritmo especial para aquello, luego, el modelo geométrico desarrollado es utilizado para calcular la posición que debe adoptar el heliostato en función de su posición relativa a la torre. El sistema diseñado fue aplicado e implementado en un heliostato prototipo, el cual fue construido en el contexto de un trabajo de memoria multidisciplinario entre las especialidades de Ingeniería Civil Eléctrica y Mecánica.

Finalmente, para validar la metodología de calibración implementada se realizan simulaciones y pruebas en terreno utilizando el heliostato prototipo construido. De las simulaciones se obtiene que la metodología permite corregir el seguimiento de los heliostatos de forma eficaz siempre y cuando las medidas de calibración sean lo más variadas posible, esto quiere decir que hayan sido tomadas durante distintos días del año y a distintas horas. Por otro lado, las pruebas en terreno validan que el sistema de control y la metodología de calibración implementados efectivamente funcionan para un heliostato real.

Como trabajo futuro se plantea que aún deben realizarse pruebas en terreno ubicando el/los heliostatos prototipos a distancias más alejadas de la superficie objetivo de calibración. Por otro lado, también debe extenderse de forma funcional el sistema de control implementado para que pueda operar en una planta con un mayor número de heliostatos.

A mis padres

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Centrales de Concentración Solar	3
2.1.1. Tipos de centrales CSP	3
2.1.2. Potencial CSP en Chile	6
2.1.3. Centrales CSP de Torre.	7
2.1.3.1. Campo solar:	7
2.1.3.2. Torre Receptora:	8
2.1.3.3. Ciclo de Potencia:	8
2.1.3.4. Almacenamiento:	8
2.2. Control del campo de helióstatos.	9
2.2.1. Posición del Sol [11]	9
2.2.2. Algoritmos de posición solar	11
2.2.3. Esquema de Control	12
2.2.3.1. Control General	12
2.2.3.1.1. Lazo Abierto	12
2.2.3.1.2. Lazo Cerrado	13
2.2.3.2. Control Local	16
2.2.3.2.1. Geometría de orientación	16
2.2.3.2.2. Mecanismo de Movimiento	18
2.3. Sistema de calibración	22
2.3.1. Errores	22
2.3.2. Metodologías comunes	25
3. Metodología	28
3.1. Planteamiento de modelo geométrico y de error	28
3.2. Diseño y construcción de helióstato prototipo	28
3.3. Adaptación de metodología de calibración y simulaciones	28
3.4. Pruebas y Validación con prototipo	29
4. Modelo de Error para helióstato con movimiento <i>Pitch/Roll</i>	30
4.1. Planteamiento matemático	30
4.1.1. Relación entre ángulos <i>pitch/roll</i> y vector normal	31
4.1.2. Adición de errores	33
4.1.3. Error de apunte	36
4.2. Modos de funcionamiento	37
4.2.1. Modo de calibración	37
4.2.2. Modo de seguimiento	39

5. Prototipo Solarbosch	41
5.1. Prototipo 1.0	41
5.2. Prototipo 2.0	42
5.3. Sistema de control	43
5.3.1. Componentes del Control Local	45
5.3.2. Programación	49
5.4. <i>Feedback</i> de orientación	52
5.4.1. Encoders	53
5.4.2. IMUs	53
5.5. Metodología de calibración	55
5.5.1. Procesamiento de imágenes	55
6. Resultados	60
6.1. Simulaciones	60
6.1.1. Calibración	60
6.1.2. Análisis de sensibilidad de errores	64
6.1.3. Tiempo de actualización de posición	67
6.2. Experimentos con prototipo	70
6.2.1. Montaje y metodología	70
6.2.2. Resultados	71
7. Conclusiones	76
8. Trabajo Futuro	77
9. Bibliografía	78
Anexos	81
A. Geometría de orientación	82
A.1. Formulación del problema	82
A.2. Solución	83
B. Validación de modelo de error	84

Índice de figuras

2.1. Colectores tipo cilindro parabólico. Fuente: Sun&Wind Energy	3
2.2. Central de tipo torre central [1].	4
2.3. Central de tipo fresnel lineal [1].	5
2.4. Concentrador de tipo disco parabólico.	5
2.5. Capitalización de los distintos tipos de tecnologías de concentración solar [5]. . .	6
2.6. Evolución de la capacidad instalada de tecnología de concentración solar en el mundo desde el año 2006 al año 2016 [3].	6
2.7. Plantas de concentración de torre con distinta disposición de los helióstatos alrededor de su torre.	8
2.8. Traslación de la Tierra alrededor del Sol sobre el plano de la eclíptica [11]. . . .	9
2.9. Trayectoria del Sol vista por un observador ubicado en el hemisferio sur en ambos solsticios y equinoccios. Fuente: Year & Science.	10
2.10. Ángulos de posición del Sol. Fuente: Sandia National Laboratories.	11
2.11. Sistema de control de lazo cerrado utilizando cámaras CCD.	14
2.12. Montaje del sistema de control de lazo cerrado propuesto en [19].	15
2.13. Geometría del problema	17
2.14. Helióstatos en planta experimental de Julich, Alemania.	19
2.15. Helióstatos en planta Torresol, España.	19
2.16. Helióstatos de Auto-R Project.	20
2.17. Ejes de rotación de dos distintos tipos de geometría de movimiento de helióstatos. .	21
2.18. Tipos de motores utilizados para el movimiento de helióstatos.	22
2.19. Inclinación de pedestal [24].	23
2.20. Error en los sistemas de referencia de los ángulos solares [24].	23
2.21. Inclinación de pedestal [25].	26
2.22. Esquema de sistema de calibración típico utilizado en CSPs mediante superficie objetivo. [28]	27
2.23. Ilustración conceptual del sistema de calibración implementado por la empresa eSolar [29].	27
3.1. Etapas de la Metodología propuesta.	28
4.1. Sistema de referencia y ubicación de elementos principales.	30
4.2. Sistema de referencia rotado θ_p grados en Pitch.	32
4.3. Diagrama funcional del modelo de error.	33
4.4. Representación gráfica del error de <i>Offset</i> de referencia de movimiento <i>pitch</i> . . .	34
4.5. Representación gráfica del error de pedestal en sus dos componentes de dirección. .	35
4.6. Coordenadas de apunte (x_a, y_a) resultado del modelo de error.	37
4.7. Diagrama funcional del modelo de error utilizado para calibración.	38
4.8. Diagrama funcional del modelo de error utilizado para el modo de operación. . .	40
5.1. Planta Solarbosch.	41
5.2. Imágenes del diseño mecánico del helióstato 1.0.	42
5.3. Sistema para movimiento en pitch.	42
5.4. Imágenes del helióstato prototipo 2.0.	43
5.5. Esquema general de control de orientación de helióstatos.	44
5.6. Arduino Uno R3. Fuente: Arduino	45
5.7. Motores paso a paso utilizados. Fuente: Pololu, <i>Robotics and Electronics</i>	46

5.8. Controladores de motores paso a paso.	47
5.9. Esquema de conexión de motores paso a paso	47
5.10. Final de carrera.	48
5.11. Prototipo y sus componentes eléctricos.	48
5.12. Ejecución del algoritmo de posición Solar.	50
5.13. Diagrama de estados/modos de funcionamiento.	51
5.14. Interfaz para controlar el movimiento del helióstato.	52
5.15. Error en las mediciones de un IMU individual para posiciones pitch entre 0° y 90°	54
5.16. Error en las mediciones de un IMU distinto al anterior para posiciones pitch entre 0° y 90°	54
5.17. Puntos notables de histograma aplicado en las imágenes de prueba.	56
5.18. Histogramas de dos imágenes con diferentes características de luminosidad y contraste.	57
5.19. Aplicación de la metodología de procesamiento de imágenes en una imagen ejemplo con una proyección nítida de la reflexión del espejo en el <i>target</i> de calibración.	58
5.20. Aplicación de la metodología de procesamiento de imágenes en una imagen ejemplo con una proyección borrosa de la reflexión del espejo en el <i>target</i> de calibración.	58
6.1. Distribución geográfica de los helióstatos que tendrá la planta de Solarbosch.	60
6.2. Representación gráfica de la metodología seguida para simular el desempeño de la metodología de calibración.	61
6.3. Ejemplo de calibración para un helióstato al centro del campo para una cierta combinación de errores geométricos.	62
6.4. Error anual promedio de calibración (en metros) considerando distintas mediciones de calibración y distintos errores del sistema de visión computacional.	63
6.5. Sensibilidad de error de referencia <i>Pitch</i>	64
6.6. Sensibilidad de error de referencia <i>Roll</i>	65
6.7. Sensibilidad de error de posición en dirección Norte-Sur.	65
6.8. Sensibilidad de error de posición en dirección Este-Oeste.	65
6.9. Sensibilidad de error de posición en altura	66
6.10. Sensibilidad de error de inclinación de pedestal hacia Este u Oeste.	66
6.11. Sensibilidad de error de inclinación de pedestal con respecto hacia Norte o Sur.	67
6.12. Sensibilidad de error de orientación azimutal	67
6.13. Error cometido durante el equinoccio de Otoño considerando distintos tiempos de actualización.	68
6.14. Error cometido durante el solsticio de Invierno considerando distintos tiempos de actualización.	68
6.15. Error cometido durante el solsticio de Verano considerando distintos tiempos de actualización.	69
6.16. Montaje para mediciones con prototipo.	70
6.17. Esquemas representativos de los dos tipos de medidas de prueba.	71
6.18. Mediciones realizadas con el prototipo 1.0 en dos diferentes días.	72
6.19. Comparación de los ángulos de posición <i>Pitch/Roll</i> para los casos sin calibración (SC), con calibración (CC) y las mediciones del día 31 de Octubre.	73
6.20. Calibración de las medidas tomadas durante el día 31 de Octubre, error de calibración: 0.097 metros.	74
6.21. Calibración de las medidas tomadas durante el día 16 de Noviembre, error de calibración: 0.287 m	74

6.22. Comparación de los ángulos de posición <i>Pitch/Roll</i> para los casos sin calibración (SC), con calibración (CC) y las mediciones del día 16 de Noviembre.	75
A.1. Geometría del problema	82
B.1. Errores de naturaleza angular, en cada caso la iteración fue entre -1.5° y 1.5° en intervalos de 0.3° para un heliostato ubicado a 50 metros de la torre.	84
B.2. Errores de posición, en cada caso la iteración fue entre -1.5 metros y 1.5 metros en intervalos de 30 centímetros.	85

Índice de tablas

- 1. Desviaciones estándar utilizadas para la generación de los set de errores. 60
- 2. Valores de los errores estimados 72
- 3. Valores de los errores estimados utilizando todas las mediciones del día 31 de Octubre. 72
- 4. Error promedio de calibración de las mediciones realizadas durante el 31 de Octubre. 73
- 5. Error promedio de calibración de las mediciones realizadas durante el 16 de Noviembre. 75

1. Introducción

El norte de Chile posee los lugares con la mayor radiación solar del mundo. Tal zona posee un elevado potencial energético que ya hace al menos una década comenzó a aprovecharse de forma significativa en el contexto de la generación eléctrica, con la instalación de varias plantas fotovoltaicas. Hoy en día, la capacidad fotovoltaica instalada asciende a 1850 MW instalados, número que sin duda continuará aumentando en los próximos años. Esto posiciona a Chile como uno de los líderes en energías renovables, destacando su actuar para combatir las causas que dan origen al cambio climático.

A pesar de lo anterior, la generación fotovoltaica presenta un gran problema, y corresponde a que sólo puede inyectar energía al sistema durante las horas de sol. Las baterías corresponden a la tecnología que promete en el futuro solucionar tal problemática. Sin embargo, existe otra forma de generar electricidad durante las 24 horas del día utilizando energía solar, tal tecnología corresponde a las centrales de concentración solar “CSP” por sus siglas en inglés (Concentrated Solar Power).

El funcionamiento de estas centrales se basa en concentrar una gran cantidad de radiación en una zona de un tamaño relativamente pequeño, de forma de utilizar la energía concentrada para generar electricidad como cualquier central térmica. Además, tal calor puede ser almacenado en sales, de manera de tener la posibilidad de generar energía eléctrica durante la noche.

Para redirigir la radiación hacia la torre se utilizan los denominados helióstatos, elementos fundamentales en este tipo de centrales. Un requerimiento que estos deben poseer para que la planta pueda funcionar de forma eficiente es el de una alta precisión (sobre todo los ubicados más lejos de la torre), junto con ser capaces de reflejar de forma continua la radiación del sol en la torre. La principal dificultad se encuentra en que pequeños errores (como por ejemplo inclinación en la instalación del helióstatos, error en determinar la dirección del norte verdadero, entre otros) pueden afectar de forma significativa la precisión de apunte.

Se pretende entonces diseñar el sistema de control de los helióstatos para una central de concentración solar de pequeña escala, en conjunto con una metodología de calibración que permita corregir errores determinísticos que pueden surgir durante la operación de estos helióstatos. Los diferentes esquemas y algoritmos serán probados y verificados en un helióstato prototipo.

1.1. Objetivos

A continuación se presentan los objetivos del presente trabajo:

1.1.1. Objetivo General

El objetivo principal corresponde a desarrollar (diseñar e implementar) el sistema de control de orientación para un heliostato de geometría de movimiento tipo *pitch/roll*.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Estudiar el estado del arte de la tecnología de los sistemas de control y calibración de heliostatos.
2. Implementar sistema de actuación y control para un heliostato prototipo.
3. Escoger, implementar y adaptar alguna metodología de calibración existente para corregir errores determinísticos típicos durante la operación.
4. Comprobar y validar eficacia de los algoritmos implementados utilizando el heliostato prototipo.

1.2. Alcances

La central de concentración solar en la cual se implementará este sistema corresponderá a una central de pequeña escala en comparación con otras centrales de este tipo, cuyas potencias nominales pueden llegar a ser del orden de decenas de megawatts. Esta última característica tiene una incidencia relevante en los alcances de este trabajo. En primer lugar, implica que el tamaño de los heliostatos es relativamente pequeño en comparación a los heliostatos del común de las plantas de este tipo, razón por la cual será prioridad el uso de motores paso a paso (y no motores de imanes permanentes comunes en aplicaciones de seguimiento solar) para realizar el movimiento. En segundo lugar, la precisión de apunte aumenta con la distancia heliostato-torre, como la escala de la planta es pequeña, se considerará esa distancia como aproximadamente 100 - 125 metros (en base a estudios preliminares), de forma de establecer un criterio base para la precisión requerida.

Por otro lado, el sistema de control a implementar es exclusivo de la orientación de los heliostatos, y por tanto, aspectos adicionales como por ejemplo, el sistema de comunicación, o el control de la temperatura y/o energía concentrada en el receptor no recaen dentro de los alcances de este trabajo.

Por último, se debe destacar que este trabajo es de tipo multidisciplinaria entre la especialidades de Ingeniería Civil Eléctrica e Ingeniería Civil Mecánica, razón por la cual aspectos de diseño mecánico están fuera del alcance de este trabajo y sólo se mencionan con el objetivo de contextualizar relaciones críticas con el sistema de control.

2. Marco Teórico

2.1. Centrales de Concentración Solar

Las plantas de energía termosolar de concentración, también conocidas como **CSP** por sus siglas en inglés - *Concentrated Solar Power*, tienen como principio de funcionamiento la concentración de la radiación directa proveniente del Sol mediante espejos en una superficie relativamente pequeña, denominada receptor. La energía concentrada puede ser utilizada directamente para producir electricidad, o también, almacenada para su uso posterior en baterías/almacenadores térmicos compuestos por sales fundidas u otros tipos de materiales con características similares. Esta última característica le da mucha relevancia a este tipo de centrales, pues le permite generar electricidad utilizando el recurso solar incluso durante la noche.

2.1.1. Tipos de centrales CSP

Existen diversos tipos de centrales de concentración dependiendo de la forma en la que la radiación es concentrada y utilizada para convertirla en energía eléctrica. A continuación se mencionan los tipos de plantas CSP más usuales [1], indicando sus principales características y detalles de su funcionamiento:

- **De colector cilindro parabólico:** En este tipo de plantas CSP, la radiación solar se concentra a lo largo de espejos con forma de parábola distribuidos a lo largo de una línea recta, cuya longitud oscila entre los 600 y los 800 metros, la Figura 2.1 muestra un ejemplo de una planta de este tipo. Los reflectores poseen un sistema de seguimiento axial para apuntar continuamente al Sol de manera de maximizar la recepción de la radiación. La energía concentrada se transporta mediante un fluido caloportador, el cual entra por uno de los extremos a una temperatura y con una velocidad determinada, y sale por el otro extremo a una temperatura superior. Finalmente, esta fluido a alta temperatura es utilizado para generar energía eléctrica. La potencia nominal de este tipo de centrales oscila entre los 50 MW y los 200 MW.



Figura 2.1: Colectores tipo cilindro parabólico. Fuente: Sun&Wind Energy

- **De torre central:** Las centrales de receptor central, denominadas normalmente centrales de concentración de torre, consisten en un gran número espejos, denominados helióstatos, dispuestos en torno a una torre central, encargados de redirigir la radiación a la torre. Para realizar tal tarea, cada uno de ellos posee un sistema de movimiento independiente que permite orientarlo de forma precisa en función de la posición actual del Sol y su posición respecto de la torre. Al igual que las de tipo cilindro parabólico, el calor concentrado se transporta mediante un fluido caloportador que puede ser agua, aire, aceite y/o sales fundidas. En la Figura 2.2 se presenta una central de este tipo.

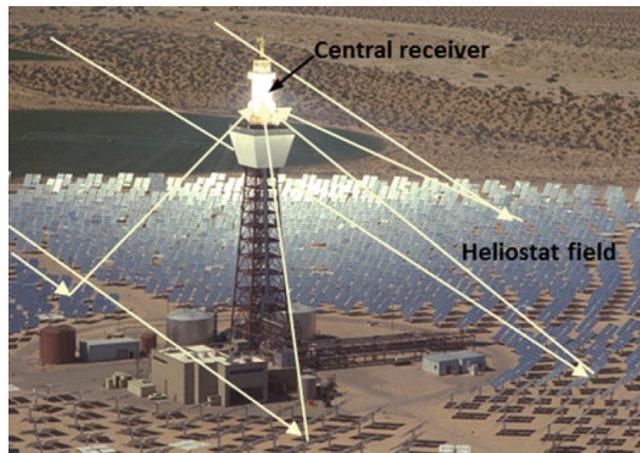


Figura 2.2: Central de tipo torre central [1].

- **Fresnel lineal:** El funcionamiento de este tipo de colectores es muy similar a los del tipo cilindro parabólico, con la diferencia de que una serie de espejos planos (y no un sólo espejo con forma parabólica) siguen la posición del Sol para redirigir la radiación a un tubo ubicado en la parte superior de estos espejos. Por construcción, esta configuración es más ineficiente que la de cilindro parabólico; sin embargo, la disminución en los costos debido al uso de espejos planos, sin la necesidad de curvarlos como en el caso de cilindro parabólico, hacen que el ahorro en costos equipare la disminución de rendimiento. Además, mencionar que en cuanto a uso de espacio/terreno disponible, las de tipo Fresnel son más eficientes. La Figura 2.3 presenta la configuración y aspecto de los concentradores de este tipo.

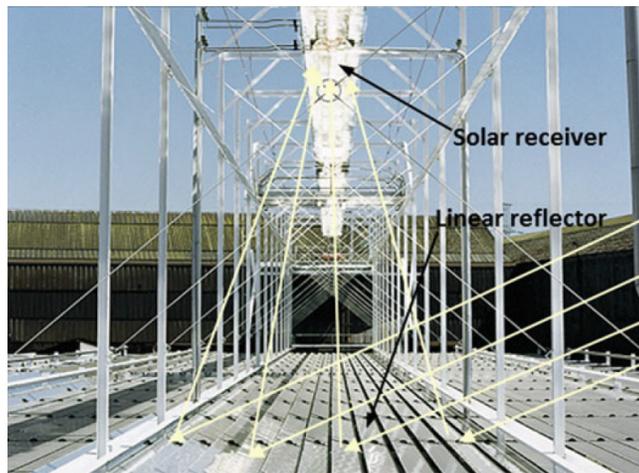


Figura 2.3: Central de tipo fresnel lineal [1].

- **De disco parabólico:** Los concentradores de tipo disco parabólico consisten en un reflector de forma cóncava con forma de sección de parábola (ver Figura 2.4) el cual apunta hacia el Sol continuamente mediante un sistema de seguimiento en dos ejes, reflejando así los rayos paralelos entrantes hacia el foco de la parábola. En tal punto, se encuentra el receptor que absorbe la radiación solar concentrada. Un motor de tipo Stirling convierte este calor en energía mecánica que, a su vez, es transformada en energía eléctrica por un generador acoplado directamente al eje de este motor. Cada unidad puede generar entre 3 y 25 kW de potencia.



Figura 2.4: Concentrador de tipo disco parabólico.

En la Figura 2.5 se resume la tendencia que se ha dado en el desarrollo de los 4 tipos de tecnologías de concentración solar presentadas a lo largo del mundo, junto con previsiones futuras hasta el año 2015 con respecto al tamaño de los mercados de centrales de concentración solar. Se observa aquí que por lejos que el tipo predominante corresponde a la de colector cilindro parabólico [2] [3]. En segundo lugar se encuentra la tecnología de tipo torre central, y se espera que esta, junto con las de tipo disco parabólico y fresnel, aumenten su capacidad instalada a medida que la tecnología madure con el paso del tiempo.

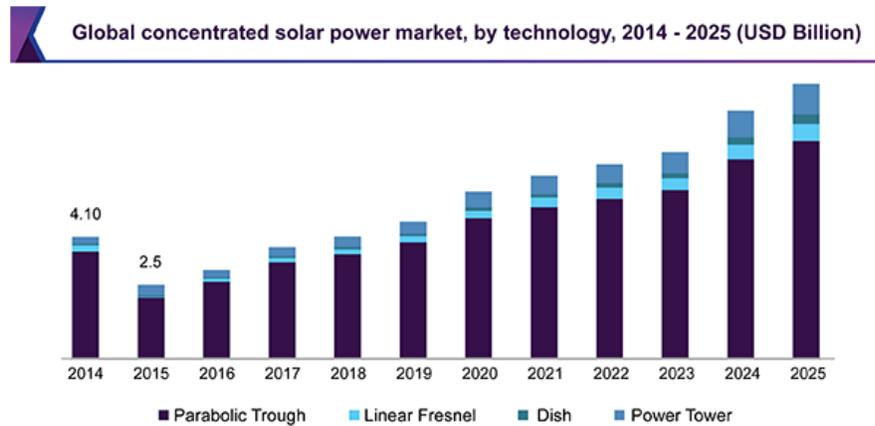


Figura 2.5: Capitalización de los distintos tipos de tecnologías de concentración solar [5].

Por otro lado, en la Figura 2.6 se aprecia la evolución de la capacidad instalada en el mundo en los últimos años. Se destaca que España corresponde al país con mayor penetración de tecnologías de concentración solar, seguido sólo por Estados Unidos, ambos con un crecimiento que comenzó hace sólo algunos años.

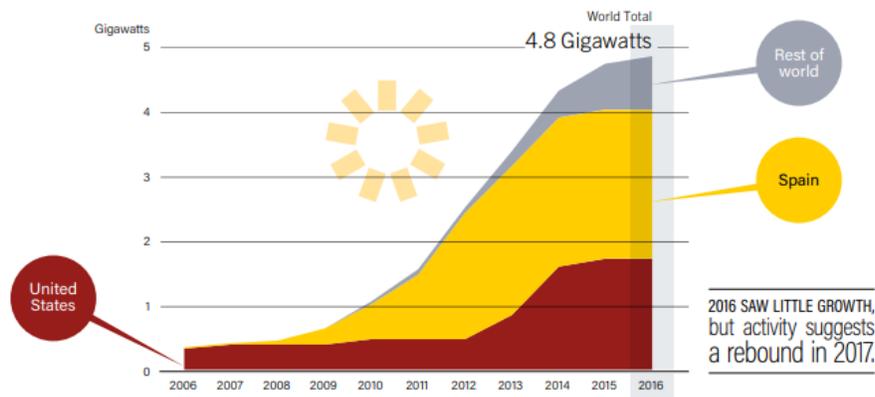


Figura 2.6: Evolución de la capacidad instalada de tecnología de concentración solar en el mundo desde el año 2006 al año 2016 [3].

2.1.2. Potencial CSP en Chile

Ya es sabido que Chile posee uno de los lugares con la mayor radiación del mundo: el desierto de Atacama, lo que lo ha hecho un lugar idóneo para la explotación del recurso solar. Hoy en día, la capacidad instalada de centrales fotovoltaicas en Chile es de aproximadamente 2201 MW según SERC Chile, y todo apunta a que seguirá creciendo debido a las políticas que buscan impulsar la instalación de centrales eléctricas que utilicen como fuentes primarias recursos renovables.

No obstante, prácticamente la totalidad de proyectos energéticos de carácter solar instalados en Chile corresponden a los de tipo fotovoltaico debido a sus bajos costos de inversión en comparación con las de tipo termosolar. Un factor determinante en la disminución del costo

de desarrollo de una central de concentración corresponde a la radiación directa del lugar de instalación, en donde se ha destacado en diversas conferencias como solarPACES[4] que la zona norte de Chile corresponde a un lugar idóneo para la instalación centrales de concentración solar debido a sus niveles de radiación solar directa, y que tiene el potencial de convertirse en un polo de desarrollo de esta tecnología.

De momento, el único proyecto de tipo concentración de torre en nuestro país corresponde al complejo solar Cerro Dominador (ubicado en la comuna de María Elena, Región de Antofagasta) que aún se encuentra en construcción, cuya potencia instalada corresponde a una mezcla entre 100 MW fotovoltaicos y 110 MW termosolares, esta última con una capacidad de almacenamiento térmico de 17.5 horas y 10,600 helióstatos ubicados en un total de 146 hectáreas. Se debe destacar que la finalización de la construcción de esta central se ha visto retrasada debido a serios problemas económicos de la empresa española dueña de este proyecto; no obstante, la construcción se retomó en Agosto de 2018, y se espera que a finales del 2020 esté completamente operativa.

En el contexto de los actuales altos riesgos económicos que aún posee esta tecnología surge el proyecto SolarBosch, cuya propuesta principal corresponde a implementar esta tecnología a una escala mucho menor, de no más de 1 MW, de forma de enmarcarse como un pequeño medio de generación distribuida.

2.1.3. Centrales CSP de Torre.

En esta sección, se presenta la tecnología de concentración de torre de forma más detallada considerando que el sistema de control motivo de este trabajo está destinado al movimiento de los helióstatos para este tipo de tecnología en específico. Los principales componentes de una central de torre corresponden al campo solar, torre receptora, ciclo de potencia y sistema de almacenamiento térmico [6]. A continuación se profundiza en detalle cada uno de ellos.

2.1.3.1. Campo solar: El campo solar corresponde al sistema encargado de redirigir la radiación solar hacia un punto específico. En una central de concentración de torre, el campo solar está constituido por una gran cantidad de helióstatos encargados de reflejar y concentrar la radiación a la torre central.

La cantidad de helióstatos de plantas CSP de torre depende principalmente de la capacidad en potencia de la central, pero además de la capacidad de almacenamiento térmico de esta. En general, estas plantas presentan miles de helióstatos, los cuales pueden estar ubicados incluso hasta 2 kilómetros de distancia de la torre central. Por ejemplo, la planta GemaSolar en España, cuya capacidad es de 19,9 MW presenta una cantidad de 2650 helióstatos [7].

No obstante, el tamaño de los helióstatos es relevante en la cantidad antes mencionadas, pues las dimensiones de estos varían entre 1 y 120 metros cuadrados [6]. A mayor tamaño, mayor debe ser la separación entre estos para evitar la generación de sombra y bloqueos entre ellos; un helióstato más grande significa una reflexión de mayor tamaño en la torre, lo que implica que esta debe tener una superficie receptora de mayor extensión. De todas formas, es común que la superficie reflectora de los helióstatos sea curvada de manera cóncava por diseño, esto con el

objetivo de concentrar la radiación de cada heliostato en un área más pequeña.

Por otro lado, es importante mencionar que actualmente, la mayor componente de costos de una planta de concentración tipo torre corresponde efectivamente al campo solar [8][9], llegando a valores entre el 40% y 50% del total del costo de inversión, esto como consecuencia de la gran cantidad de heliostatos y el costo a nivel de control de la alta precisión requerida, la cual aumenta con la lejanía de los heliostatos a la torre receptora.

2.1.3.2. Torre Receptora: Corresponde a la torre que recibe la radiación concentrada por los heliostatos. Su principal característica en términos de diseño corresponde a que debe ser capaz de soportar las altas temperaturas motivo de la concentración solar, las cuales pueden alcanzar valores entre 200°C y 800°C [10]. Del mismo modo, su función principal corresponde a transferir la energía concentrada al fluido de trabajo. Dependiendo de la disposición de los heliostatos en el campo solar, la superficie receptora puede ser de distinta forma: rectangular en el caso de que la totalidad de los heliostatos se ubiquen sólo en alguna dirección con respecto a la torre (en el caso de una planta en el hemisferio sur, los heliostatos se ubican al sur de la torre) como en la Figura 2.7 (a); o de tipo anillo cilíndrico cuando los heliostatos rodean completamente la torre como en el caso de la central de la Figura 2.7 (b).



(a) Planta de concentración Jülich, Alemania. Fuente: Deutsche Zentrum für Luft
(b) Planta de concentración Gemasolar, en Andalucía, España. Fuente: Torresol Energy.

Figura 2.7: Plantas de concentración de torre con distinta disposición de los heliostatos alrededor de su torre.

2.1.3.3. Ciclo de Potencia: Corresponde al sistema encargado de transformar la energía térmica en energía eléctrica. Normalmente se utilizan turbinas de vapor, u otras con distinto fluido de trabajo, como por ejemplo, gas.

2.1.3.4. Almacenamiento: Esta componente si bien es opcional es la característica distintiva de este tipo de centrales y que les da valor con respecto a una central fotovoltaica, pues les permite inyectar energía al sistema eléctrico incluso en las horas sin Sol. El almacenamiento corresponde a uno de tipo térmico, es decir, se almacena energía en forma de calor, normalmente utilizando sales fundidas u otros materiales de capacidades térmicas similares.

2.2. Control del campo de helióstatos.

Cómo ya se ha visto, parte fundamental de las centrales CSP de torre corresponde a la concentración de la radiación en el receptor durante las horas de Sol. Esto requiere que exista un sistema de control que comande todos los helióstatos del campo solar. A continuación se describen los aspectos fundamentales que se deben considerar durante el diseño de un sistema de control con los fines ya descritos.

2.2.1. Posición del Sol [11]

Sabemos que la tierra gira en forma elíptica alrededor del Sol, tardando aproximadamente 365.25 días en completar una vuelta completa. El plano de tal trayectoria se denomina plano de la eclíptica, lo que puede apreciarse en la Figura 2.8. A su vez, la tierra gira sobre su propio eje, denominado eje polar, el cual está inclinado en 23.45° con respecto al plano de la eclíptica. Esta geometría descrita es la que permite determinar la trayectoria del Sol en el cielo durante los días del año para un observador ubicado en la Tierra.

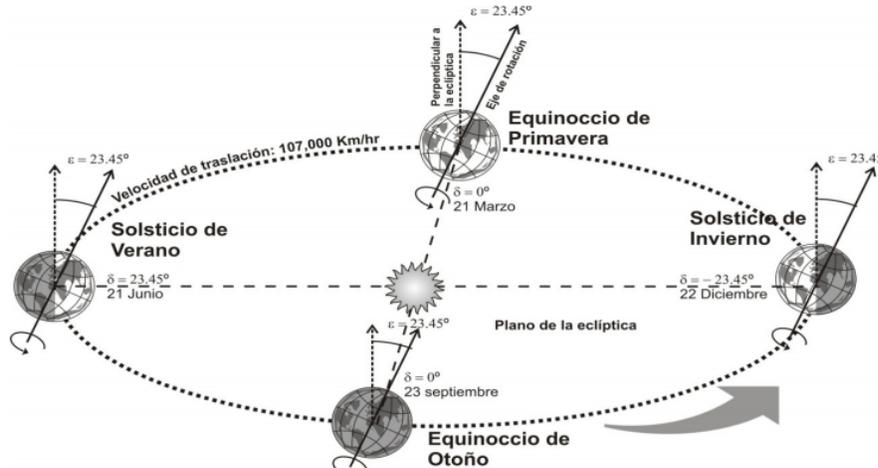


Figura 2.8: Traslación de la Tierra alrededor del Sol sobre el plano de la eclíptica [11].

Que el eje polar no sea perpendicular con el plano de la eclíptica, y a la vez permanezca prácticamente inmóvil durante todo el año, implica que el ángulo de incidencia de los rayos solares en la superficie de la Tierra cambia con el transcurso de los días de los años. Un observador en el hemisferio sur verá que el Sol recorre una trayectoria más elevada en el cielo durante los días próximos al solsticio de verano, siendo su máxima elevación el día del solsticio (21 de Diciembre). Por otro lado, la menor elevación se da durante el solsticio de invierno (21 de Junio). Al contrario, durante los equinoccios de otoño y primavera el Sol circula a una elevación intermedia entre los dos casos anteriores. La Figura 2.9 representa de forma gráfica lo recién descrito.

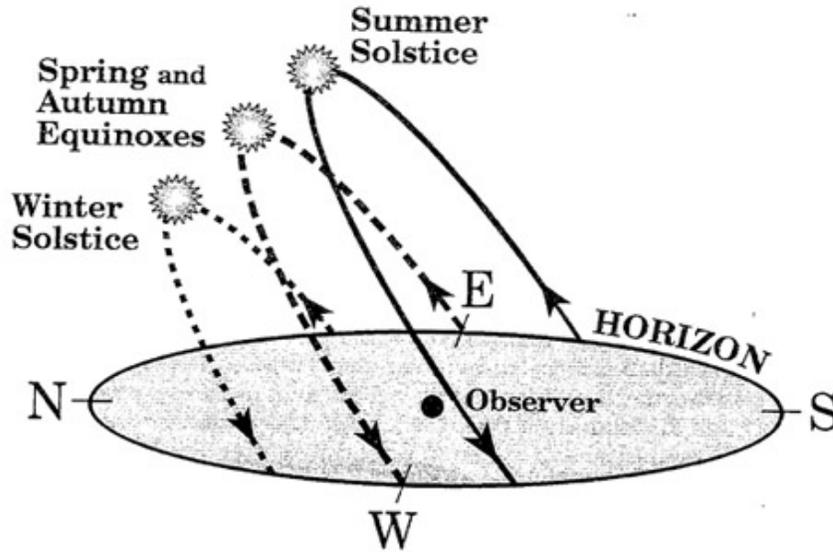


Figura 2.9: Trayectoria del Sol vista por un observador ubicado en el hemisferio sur en ambos solsticios y equinoccios. Fuente: Year & Science.

El fenómeno previamente explicado se relaciona con la denominada declinación solar, que corresponde al ángulo entre el vector Tierra-Sol y el plano ecuatorial celeste (proyección del ecuador terrestre). Este ángulo varía entre -23.45° y 23.45° durante el año, como efecto de la traslación de la Tierra alrededor del Sol, y es positivo cuando se mide hacia el norte y negativo cuando se mide hacia el sur. La siguiente ecuación permite calcular la declinación solar (δ) para cualquier día del año (N):

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + N)\right) \quad (2.2.1)$$

Por otro lado, los ángulos que definen la posición del Sol, visto por un observador ubicado en la superficie de la Tierra corresponden a los ángulos azimutal y elevación (ver Figura 2.10). El primero de ellos se mide en sentido horario, en donde el norte define los 0° , mientras que la elevación se mide desde el plano del horizonte, de forma adicional también es posible definir el ángulo zenital, el cual se mide desde la vertical hacia la posición del Sol y corresponde al complemento del ángulo de elevación.

Para calcular los ángulos anteriores en un punto específico de la Tierra, es necesario introducir la latitud del lugar (L) y la hora solar expresada en forma angular (h). Este último valor corresponde a una medida del tiempo basada en el movimiento aparente del Sol sobre el horizonte del lugar, que toma como origen el instante en el cual el Sol circula por el Meridiano del lugar, su punto más alto en el cielo, al cual se le asigna el valor de las 12 del día (mediodía solar), siendo el valor de h igual a cero grados a tal hora.

Finalmente, (2.2.2) y (2.2.3) permiten calcular los ángulos de posición del Sol, azimutal (θ_a) y elevación (θ_{el}) respectivamente.

$$\sin(\theta_a) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (2.2.2)$$

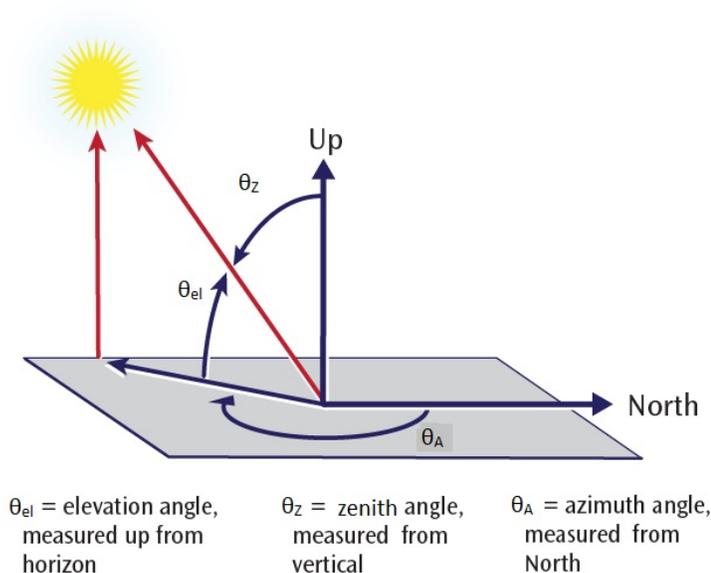


Figura 2.10: Ángulos de posición del Sol. Fuente: Sandia National Laboratories.

$$\sin(\theta_{el}) = \text{sgn}(L) \frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\theta_{el})} \quad (2.2.3)$$

Es importante destacar que la precisión de estas ecuaciones es limitada, pues no considera parámetros como la altura del lugar, variables atmosféricas, y otras más que pueden afectar la posición aparente que se ve del Sol en un lugar determinado. Por lo mismo, estas no deberían ser utilizadas en los cálculos de un sistema de control definitivo para los helióstatos de una planta de concentración. De todas formas, las fórmulas presentadas son muy útiles para una modelación rápida del movimiento del Sol y para ser utilizadas en simulaciones preliminares.

2.2.2. Algoritmos de posición solar

En la sección anterior se presentaron las ecuaciones generales que describen la posición del Sol en un lugar de la Tierra a una hora solar determinada. Sin embargo, otras variables más que las mencionadas en tal apartado entran en juego cuando se requiere determinar la posición del Sol con la precisión requerida en plantas de concentración solar, algunas de estas son, por ejemplo, la altura sobre el nivel del mar del lugar, la presión y temperatura promedio del lugar (pues inciden en la refracción de los rayos solares debido a que estos deben atravesar la atmósfera), el efecto de nutación (oscilación periódica del eje de rotación de la Tierra) entre otras.

Debido a lo anterior, diversos son los algoritmos de posición solar que se han implementado para realizar este cálculo considerando tales factores adicionales. La diferencia entre los algoritmos existentes radica principalmente en la precisión, tiempo de cálculo debido a la complejidad de cada algoritmo, y también el rango de años en el cual los resultados son confiables. A continuación se listan los algoritmos de posición solar más utilizados y mencionados en la literatura.

1. **SPA: Solar Position Algorithm [12]:** Corresponde a uno de los algoritmos más utilizados en CSP para la estimación de la posición del Sol, fue desarrollado por NREL (National Renewable Energy Laboratory) perteneciente al departamento de energía de los Estados Unidos. Es extremadamente preciso, con una incerteza de $\pm 0,00003^\circ$ dentro del período comprendido entre los años -2000 y 6000. Una gran ventaja de este algoritmo es que su código fuente está disponible en tanto en los lenguajes C, Python y MatLab.
2. **SG2: Solar Geometry-2 [13]:** Este algoritmo nace por motivo de la lentitud del algoritmo SPA, siendo su error un poco mayor comparado con el de este último, pero de todas formas pequeño, alcanzando un valor máximo igual a $0,0025^\circ$. Por otro lado, sus resultados son válidos entre los años 1980 y 2030, siendo esta su principal desventaja, pues los sistemas que usen este algoritmo requerirán una actualización en un tiempo no muy lejano.

Además de los ya mencionados, existen una cantidad no menor de otros algoritmos de posición solar [14], varios de ellos se mencionan en [15], y sus errores siguen siendo del orden de milésimas de grado sexagesimal, sin embargo, poseen la gran desventaja que los períodos en que sus cálculos son válidos no son en ningún caso tan extensos como el del algoritmo SPA, más aún, muchos ya están llegando a las fechas donde quedarán obsoletos.

A pesar de que en la mayoría de las fuentes se destaca la lentitud de cálculo del algoritmo SPA, este puede ser ejecutado sin ningún problema por un computador de características normales. Sin embargo, su ejecución en otros dispositivos (como por ejemplo en un microcontrolador como Arduino), podría no ser tan expedita, siendo necesario en tal caso recurrir a otro algoritmo de menor complejidad y mayor velocidad.

2.2.3. Esquema de Control

En esta sección se presentan una revisión de los diferentes esquemas y metodologías de control y orientación de heliostatos utilizados en centrales de concentración de torre. El objetivo de tales sistema corresponde a reflejar la radiación en la torre receptora posicionando la superficie reflectora de los heliostatos de forma adecuada.

En este contexto, es útil distinguir entre sistema de control general y sistema de control local. El primero se relaciona con la estructura general del control para la totalidad de los heliostatos del campo, mientras que el control local se refiere al sistema implementado individualmente en cada heliostato exclusivo de la orientación de su superficie reflectora.

2.2.3.1. Control General Con respecto a la estructura global del sistema de control, se distinguen en general tres esquemas típicos en este tipo de plantas, que corresponden a lazo abierto, cerrado, e híbrido [15]. A continuación se describe a grandes rasgos las peculiaridades de cada configuración.

2.2.3.1.1. Lazo Abierto :

En esta configuración no existe ninguna retroalimentación que informe sobre la correcta orientación de los heliostatos. Por tanto, este esquema requiere conocer de forma precisa la posición del Sol en todo momento durante la operación; esto se logra con alguno de los algoritmo

de posición solar ya revisados previamente. Con tal información, se calcula la posición que cada heliostato debe tener para apuntar a la torre receptora y luego se les comunica a cada uno tal información. La forma en que cada heliostato adopta tal posición es tema del esquema de control local que se verá más adelante.

Un aspecto fundamental de esta configuración corresponde a que se requiere un modelo muy preciso para conocer la orientación que debe tener la superficie reflectora. Además, su buen funcionamiento demanda una metodología de calibración precisa que debe ejecutarse cada cierto tiempo en cada uno de los heliostatos.

2.2.3.1.2. Lazo Cerrado :

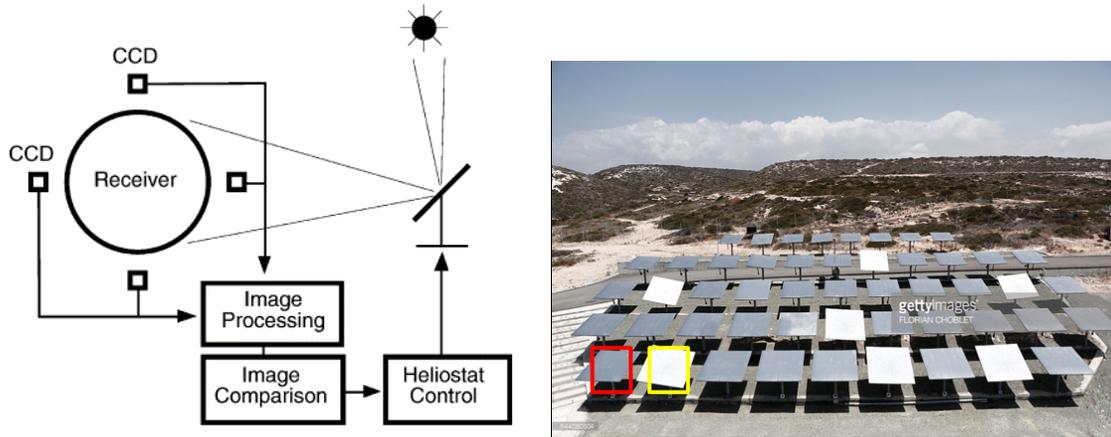
A diferencia del esquema de lazo abierto, en el caso de un lazo cerrado existe una retroalimentación que comunica errores de apunte hacia la torre. En otras palabras, es capaz de determinar si la radiación reflejada por los heliostatos efectivamente está llegando al receptor. La principal dificultad que ven estos esquemas corresponde a que los sensores para medir tales errores deben ubicarse en las cercanías de la torre receptora, la cual puede alcanzar altas temperaturas durante la operación de la planta, afectando el correcto funcionamiento y vida útil de estos dispositivos. No obstante, la gran ventaja de esta configuración corresponde a que su funcionamiento es en gran medida independiente de los posibles errores de instalación, y otros errores determinísticos que afectan a los heliostatos.

Se presentan a continuación algunas estrategias para cerrar el lazo de control destacadas en la literatura:

- Uso de cámaras CCD alrededor del receptor [16]: Este sistema utiliza cuatro cámaras (dos en la línea vertical del receptor: arriba y abajo, y dos en la línea horizontal: izquierda y derecha), lo que se aprecia en la Figura 2.11 (a), cada una de estas cámaras apunta hacia al campo de heliostatos, percibiendo una imagen como la presentada en la Figura 2.11 (b). El principio de funcionamiento es el siguiente: en primer lugar, como las cámaras se encuentran fijas, se puede determinar de forma manual cuales son los píxeles correspondientes a cada uno de los heliostatos del campo, al identificarlos de esta forma, es posible determinar la cantidad de brillo que perciben las cuatro cámaras motivo de un heliostato específico, luego, si existe un desbalance entre las medidas realizadas por cámaras ubicadas en un mismo eje (horizontal o vertical) para un heliostato en particular, significa que tal heliostato no está orientado de forma precisa. Finalmente, usando tal información se genera una señal de control para corregir la orientación del heliostato.

Hasta el momento esta propuesta sólo se ha probado de forma experimental a pequeña escala, es decir, con una cantidad baja de heliostatos. Su funcionamiento depende fuertemente de la imagen capturada por las cámaras, que esta sea clara y que no presente saturación, lo que aumenta en dificultad al incrementar la cantidad de heliostatos del campo. Del mismo modo, con el número de heliostato también se ve incrementada la probabilidad de que por un error muy grande, un heliostato refleje la totalidad de su radiación en alguna de las cámaras, saturándola y dejándola prácticamente fuera de servicio para la tarea que está realizando.

- Uso de piezoeléctricos y fotodiodos [17][18]: Esta propuesta sigue una línea similar que el caso presentado anteriormente; sin embargo, en este caso se instalan fotosensores en las



(a) Distribución de cámaras alrededor del receptor [16] (b) Ejemplo de imagen percibida por las cámaras

Figura 2.11: Sistema de control de lazo cerrado utilizando cámaras CCD.

cercanías del receptor, distribuidos de la misma forma que las cámaras del caso previo. Estos fotosensores corresponden a transductores sensibles a la radiación, cuya salida es proporcional a la cantidad de radiación que les llega, esta simpleza significa que diferenciar por heliostato la radiación percibida no pueda realizarse de forma tan directa como en el caso de la configuración con cámaras. En [17] y [18] la solución propuesta corresponde a inducir vibraciones en la superficie reflectora de los heliostatos con una frecuencia única para cada uno de ellos, de manera que tal frecuencia de vibración corresponda a un número que permita identificar a los heliostatos. Finalmente, la señal transducida por los fotosensores es sometida a un análisis de frecuencia mediante una transformada de Fourier, que permite identificar la intensidad de la radiación para cada una de las frecuencias asociadas a los heliostatos. De esta forma, es posible determinar la existencia de un desbalance entre fotosensores opuestos, y por consiguiente, generar una señal de control para corregir la orientación del heliostato.

La principal dificultad de este método corresponde al gasto energético que implica inducir las vibraciones en los heliostatos, junto con el desgaste que esto puede provocar en los mismos.

- *Novel Imaging Closed Loop* [19]: El sistema propuesto en esta publicación se inspira bastante en los elementos utilizados por los dos estudios presentados previamente, utiliza también cámaras y vibraciones inducidas en los heliostatos pero de forma distinta. En primer lugar, este montaje sólo requiere de una cámara HDR (High Dynamic Range), la cual apunta hacia el receptor de la torre, tal como se aprecia en la Figura 2.12. El principio de funcionamiento corresponde a identificar el centroide de la radiación reflejada en el receptor por cada heliostato, para distinguir entre estos últimos se utiliza un análisis en frecuencia y se identifican acorde a la frecuencia de las vibraciones inducidas. Se debe destacar que las tales vibraciones pueden ser de baja frecuencia, y por tanto, generadas por el mismo sistema de movimiento del heliostato.

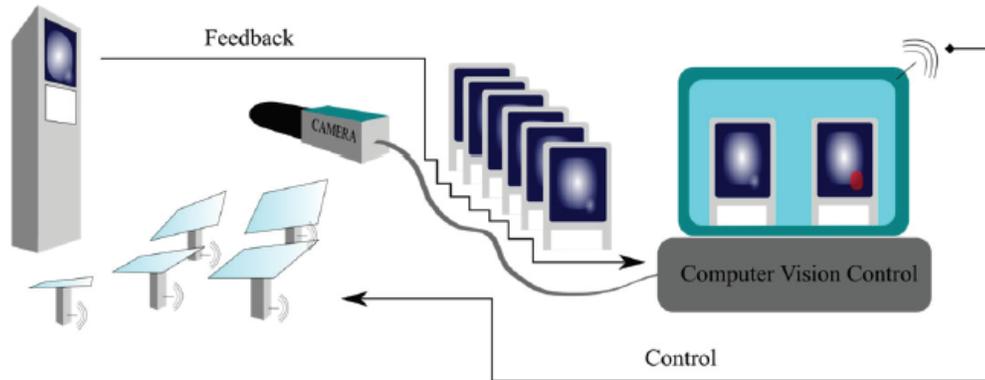


Figura 2.12: Montaje del sistema de control de lazo cerrado propuesto en [19].

Hasta el momento sólo se han realizado pruebas de esta configuración utilizando tres heliostatos, en donde los resultados fueron favorables, mostrando que es posible identificar el centro de apunte de un heliostato a pesar de que los otros dos estuviesen superponiendo su radiación en la superficie receptora. No obstante, una planta de concentración puede llegar a presentar miles de heliostatos, para este caso, en [19] se presenta una simulación considerando un alto número de heliostatos, en donde concluyen que el sistema también funciona.

A modo de conclusión de este apartado, se debe mencionar que en general, la opción más utilizada en centrales de concentración de torre corresponde a la de lazo abierto, principalmente motivado por la dificultades técnicas que implica cerrar el lazo de control, puesto que los sensores deben ubicarse en las cercanías del receptor, cuya elevada temperatura durante la operación afecta el correcto funcionamiento de estos a menos que dispongan de una protección adecuada. Por otro lado, hasta el momento las investigaciones en este ámbito no han sido tan exhaustivas, las propuestas existentes son las ya presentadas más algunas variantes muy similares, cuyo funcionamiento ha sido probado sólo ha pequeña escala, con un número de heliostatos que difícilmente se acerca a la cantidad que presentan las plantas de concentración de gran escala.

De todas formas, un sistema de lazo cerrado presenta grandes ventajas, principalmente la de disminuir o incluso prescindir de las recurrentes calibraciones necesarias en un sistema implementado en lazo abierto, esto debido a que la retroalimentación es la única información necesaria para apuntar la radiación reflejada a la zona receptora. No obstante, un sistema con lazo cerrado exclusivo presenta también desventajas importantes, como las son:

- Dificultades de funcionamiento en días nublados, debido a que la retroalimentación normalmente se realiza midiendo de alguna forma la radiación reflejada, la cual se torna más difusa en tales días. Es evidente que un sistema funcionando en lazo abierto es independiente de las condiciones climáticas.
- Los sistemas de lazo cerrado presentados requieren que al menos los heliostatos apunten si no en el receptor, en una área un poco mayor cubierta por el rango de visión de los sensores (cámaras o fotodiodos); si la radiación es reflejada fuera de la zona de alcances de estos, el sistema de control no funcionará.

En base a esta última dificultad surge la conveniencia de un esquema de control híbrido que reúna las ventajas de ambas configuraciones. Con el sistema funcionando en lazo abierto es posible orientar de forma preliminar el helióstato de manera que la radiación caiga dentro de la zona de alcance de los sensores de retroalimentación, luego de eso, el sistema es capaz de funcionar exclusivamente en lazo cerrado.

Tanto en [19] como en [21] se menciona el uso de sensores inerciales (acelerómetros más giroscopios) ubicados en la superficie reflectora del helióstato como medio para determinar la orientación del espejo reflector previo al control de lazo cerrado. La precisión del orden de un grado que puede alcanzarse con estos sensores le permite cumplir tal tarea en campo solares cuyos helióstatos no se alejan en mucha distancia de la torre receptora.

2.2.3.2. Control Local El control local corresponde al sistema que comanda cada uno de los helióstatos del campo de forma individual; en este apartado importa exclusivamente el sistema individual de movimiento de cada helióstato. Los aspectos fundamentales corresponden al sistema de movimiento y la geometría de orientación, este último aspecto es especialmente relevante cuando el esquema de control adoptado es de lazo abierto.

2.2.3.2.1. Geometría de orientación Para determinar la geometría de orientación, se requiere en primera instancia definir la geometría de movimiento del helióstato. Este se define como una superficie reflectora, separada a una distancia R del punto de giro (ver Figura 2.13); en tal punto se intersectan ambos ejes de rotación del helióstato. En base a esto, se definen los siguientes vectores:

- \hat{s} : Vector solar. Apunta desde el centro del reflector del helióstato hacia la posición del Sol. Es un vector unitario.
- \vec{d} : Apunta desde el pivote del helióstato hacia el centro del receptor.
- \hat{t} : Apunta desde el centro del reflector del helióstato hacia el centro del receptor.
- \hat{n} : Es la normal del reflector. Apunta desde el centro del reflector del helióstato hacia el punto medio entre el Sol y el receptor.

El vector normal \hat{n} corresponde al vector unitario que se desea determinar, y que describe completamente la orientación de la superficie reflectora. La separación R previamente mencionada significa un incremento en la complejidad del problema a resolver, en particular, se requiere resolver un sistema de ecuaciones no lineales. Tal desarrollo se presenta de forma completa en el Anexo A, mientras tanto, se simplificará al caso en que $R = 0$, con esto, la solución es bastante simple:

$$\hat{n} = \frac{\hat{s} + \hat{d}}{\|\hat{s} + \hat{d}\|} \quad (2.2.4)$$

Lo anterior corresponde al promedio vectorial de los vectores solar y helióstato-torre en sus formas unitarias.

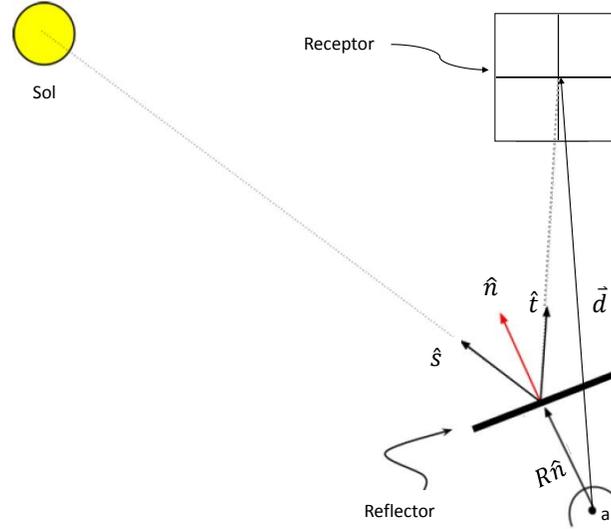


Figura 2.13: Geometría del problema

De la misma forma, es relevante conocer la ecuación que permite determinar el vector de reflexión \hat{r} (denotado como \hat{t} en la Figura 2.13) de un rayo solar conociendo la posición del helióstato, es decir, conociendo su vector \hat{n} ; y la posición del Sol. La expresión es la siguiente:

$$\hat{r} = -\hat{s} + 2(\hat{s} \cdot \hat{n})\hat{n} \quad (2.2.5)$$

Con la geometría ya planteada, se pueden definir de forma cuantificada las primeras aproximaciones en la precisión requerida en la orientación de los helióstatos. Aunque para obtener un valor exacto de este valor se debe utilizar (2.2.5), no hay mucho error al aproximar el error apunte en la torre receptora de la siguiente forma:

$$\epsilon = D \cdot \sin(\alpha_e), \quad (2.2.6)$$

en donde:

- ϵ : Error de apunte en metros.
- D : Distancia helióstato-torre en metros.
- α_e : Resolución mínima del sistema de orientación.

De la ecuación anterior se desprende que el error aumenta de forma proporcional al ángulo mínimo de resolución del sistema. Por ejemplo, para un valor de $\alpha_e = 0,1^\circ$ y una distancia $D = 100$ metros, se tiene que el error en el receptor es de 17.45 centímetros, que corresponde a un valor aceptable considerando que el receptor será una superficie cuadrada de lado no mayor a 1,5 - 2 metros según estimaciones iniciales.

Por otro lado, un aspecto importante para realizar el control de movimiento corresponde a determinar la orientación del reflector mediante la instalación de sensores, de forma de proporcionar alguna señal de retroalimentación. A continuación se mencionan las dos alternativas más comunes, junto con una opción no tan usual y ya mencionada (sensores de inercia):

- **Encoders:** Los codificadores rotatorios corresponden a dispositivos capaces de determinar el ángulo (entre 0.0° y 360.0°) en el que se encuentra un eje. Son la metodología más utilizada para determinar la orientación que poseen los helióstatos en cada uno de sus dos ejes de movimiento. Las ventajas que posee corresponde a que cuando son bien utilizados, son muy fiables; sin embargo, uno de buena calidad puede tener un costo relativamente elevado.
- **Lazo abierto:** Corresponde a tener un seguimiento preciso de las vueltas y posiciones de los motores (sólo es útil en motores que puedan funcionar en lazo abierto, como los motores paso a paso). Se requiere conocer de forma precisa la geometría de movimiento del helióstato, junto con que la confiabilidad de los motores debe ser muy elevada.
- **Sensores de inercia:** Los sensores de inercia o IMUs (*Inertial Measurement Unit*) corresponden a dispositivos que miden aceleración y velocidad angular por medio de acelerómetros y giroscopios respectivamente. Existen distintos métodos conocidos para transformar las medidas de estos sensores a ángulos de inclinación, los cuales utilizan la integración de la velocidad angular y el vector dado por la aceleración de gravedad.

La principal ventaja de utilizar estos dispositivos es que pueden medir la inclinación del reflector de manera directa independiente de fuentes de error como, por ejemplo, de instalación o calibraciones defectuosas, configurando un sistema de medida bastante robusto. Otra ventaja considerable es la gran variedad existente en el mercado, en donde se pueden encontrar dispositivos con precios de alrededor de \$3000 [CLP], lo que disminuye los costos de forma sustancial comparado al uso de *encoders*.

Un factor a considerar con la utilización de IMUs es que en la literatura no es recurrente encontrar sistemas CSP en donde sean implementados y sólo existen en fase de investigación [21].

2.2.3.2.2. Mecanismo de Movimiento En la literatura se pueden apreciar diversas formas y tamaños de helióstatos que han sido desarrollados a través de los años; sin embargo, se pueden observar sistemas de movimientos parecidos y más bien estándares entre todos ellos. En particular se pueden dividir en 3 grupos principales, los cuales se diferencian principalmente de acuerdo al uso y tamaño de la planta:

- **Actuadores hidráulicos lineales:** El movimiento es realizado por dos brazos hidráulicos lineales, uno para cada eje del sistema, alargándose y acortándose de acuerdo a la necesidad de movimiento. El sistema gira en ejes de rotación colocados en la estructura de acero que sostiene el espejo. A pesar de que es el método más fácil para diseñar el sistema de movimiento, tiene algunas desventajas como la constante necesidad de mantención del sistema hidráulico, junto con que la cinemática de movimiento no es lineal. La Figura 2.14 presenta un ejemplo de un helióstato con este tipo de movimiento.



Figura 2.14: Helióstatos en planta experimental de Jülich, Alemania.

- *Tubo de torque y rotación tras espejo*: Este sistema se utiliza principalmente en heliostatos de grandes dimensiones (como los que se aprecian en la Figura 2.15), debido a la gran resistencia mecánica que tiene este tipo de configuración. El movimiento se realiza mediante tubos que giran sobre si mismos a través de su eje principal, con ejes de movimiento con rodamientos en cada tubo. Esto implica un bajo requerimiento en mantención junto con un gran control de movimiento continuo. Sin embargo, es un sistema de muy alta complejidad en el diseño y también en construcción y montaje.



Figura 2.15: Helióstatos en planta Torresol, España.

- *Uso de rieles y cables/cadenas*: Este sistema es utilizado en heliostatos de baja escala (espejos de superficie $\leq 10[m^2]$) como el que se presenta en la Figura 2.16, puesto que requieren poco esfuerzo en sus partes para funcionar. Las ventajas de esto corresponden a que la complejidad del sistema es baja y de alta eficiencia, con cargas reducidas en sus componentes mecánicos y bajo costo general. El movimiento lo realiza el enrollado o

desenrolle de cables (o cadenas) a través de un riel; un carrete de cable gira gracias a motores eléctricos acoplados al sistema. Este acople puede tener diversos tipos: engranes, piñones, cadenas, sin fin, etc.

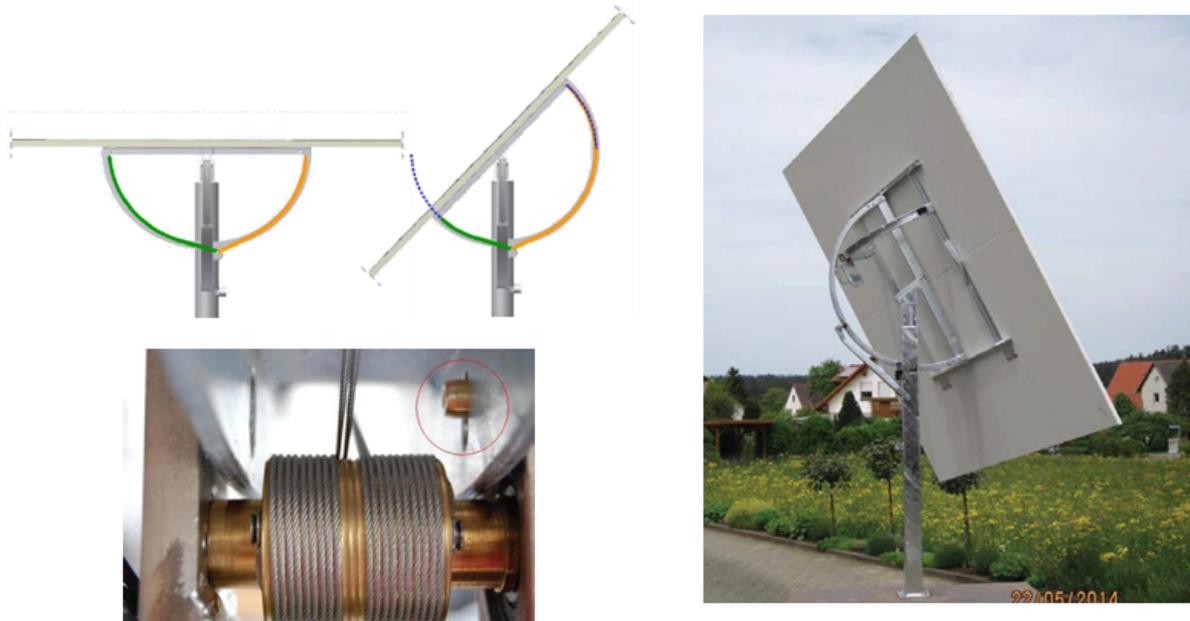


Figura 2.16: Heliostatos de Auto-R Project.

Debido al tamaño del heliostato a construir es pequeño, se considera para este trabajo la opción del uso de rieles y cables/cadenas. Por lo que el sistema de actuación eléctrico está inmerso en tal contexto.

Se debe considerar además que la implementación mecánica del movimiento tiene asociada una geometría de movimiento particular. En general, la más recurrente entre las centrales de concentración del mundo es la de tipo *azimut/elevación*, cuyos ejes de rotación se representan de forma gráfica en la Figura 2.17 (a), en esta configuración el eje de *azimut* está siempre fijo, mientras que el eje de *elevación* rota cuando el heliostato rota en sentido *azimutal*, aunque la orientación de este último es siempre paralela al piso. Por otro lado, en la geometría de tipo *pitch/roll* (ver Figura 2.17 (b)) el eje que está siempre fijo es el del movimiento *pitch* (cuyo símil del caso anterior sería el eje de *elevación*), mientras que el eje *roll* se inclina dependiendo de la rotación en *pitch*.

Una característica particular del movimiento de los heliostatos es que corresponde a un movimiento muy lento, pues es acorde a la traslación del Sol a través del cielo durante el día. Esto último, en conjunto con la precisión requerida, son los desafíos que se deben considerar en la elección del sistema de actuación. Las alternativas existentes corresponden a actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos. A continuación se realiza una revisión exclusiva de estos últimos.

Para cumplir los requerimientos de velocidad y alta precisión, en principio se puede afirmar que se necesita un motor eléctrico de baja velocidad y a la vez alto torque, lo que deja de ser tan



(a) Helióstato con geometría de movimiento tipo Azimut/Elevación. (b) Helióstato con geometría de movimiento tipo *Pitch/Roll*.

Figura 2.17: Ejes de rotación de dos distintos tipos de geometría de movimiento de helióstatos.

acertado a medida que se añade un sistema de reducción a los mecanismos de movimiento. Los ordenes comunes de reducción para helióstatos cuando se utilizan motores de corriente continua varían entre 1:10.000 y 1:20.000 [22], la decisión final de diseño depende de las características de torque y velocidad de los motores utilizados.

Según [23], los motores eléctricos más utilizados en helióstatos tanto en plantas de gran escala como en prototipos con fines de investigación corresponden a los de corriente continua sin escobillas (*brushless DC motor*) y motores paso a paso (*stepper motor*), en donde para casos de helióstatos de mayor tamaño predominan los del primer tipo. A continuación se mencionan las particularidades de cada uno de ellos:

- *Brushless DC Motor*: Son motores de una relativa alta velocidad para la aplicación (sobre 3000 RPM), razón por la cual requieren de un mecanismo de reducción. Que sea sin escobillas corresponde a una características relevante a nivel de mantención y por tanto costos; al no existir desgaste mecánico como en los que poseen escobillas o carbones rozantes no requieren mantención recurrente.
- *Stepper Motor*: Se destaca que corresponden a una excelente alternativa para esta aplicación debido a:
 - Bajo costo.
 - Funcionan en lazo abierto (pueden prescindir de un sensor que retroalimente su posición).
 - Cumplen con la característica de alto torque y baja velocidad de forma simultánea, lo que disminuye la cantidad de reducción mecánica necesaria.

Se debe mencionar también que estos se utilizan normalmente en helióstatos prototipo de tamaños reducidos [23] y no en helióstatos de gran tamaño.



(a) Motor Brushless DC. Fuente: Dunkermotoren. (b) Motor Stepper. Fuente: Juetek Shanghai Co. Ltda.

Figura 2.18: Tipos de motores utilizados para el movimiento de helióstatos.

2.3. Sistema de calibración

2.3.1. Errores

La alta precisión requerida en la orientación de los helióstatos de una planta de concentración implica que incluso errores de pequeña magnitud pueden tener como consecuencia un gran error de apunte en el receptor de la torre central. A medida que los helióstatos se ubican más alejados de la torre se ve incrementado el efecto de tales errores, los que pueden ser de naturaleza óptica, electromecánica, estructural, entre otras. El principal efecto de errores de apunte corresponde a pérdidas por derrame (*spillage losses*), lo que puede tener los siguientes efectos:

- Disminución en la cantidad de energía generada debido a que no llega la suficiente cantidad de radiación al receptor.
- Concentración de la radiación en el receptor de forma no homogénea, lo que causa puntos calientes (*hotspots*) en el receptor.
- Posibles daños en el área adyacente al receptor debido a radiación que no llega al área designada.

En busca de optimizar el funcionamiento de los helióstatos, las metodologías de calibración y control de estos deben considerar tales errores. En [24] se realiza un estudio exhaustivo de estos, en donde se explicita el tipo de error, su trascendencia y efecto, junto a posibles soluciones. A continuación se enumeran los más relevantes mencionados en tal documento:

1. Errores determinísticos:

- **Inclinación de pedestal:**

La inclinación de pedestal corresponde al error en la inclinación del soporte principal del helióstato (ver Figura 2.19); en el caso ideal debiese estar perfectamente alineado con el vector normal de la superficie del terreno. Este error puede darse por problemas iniciales de instalación, por deformaciones a lo largo del tiempo, desplazamientos de terreno motivo de lluvias, entre otros.

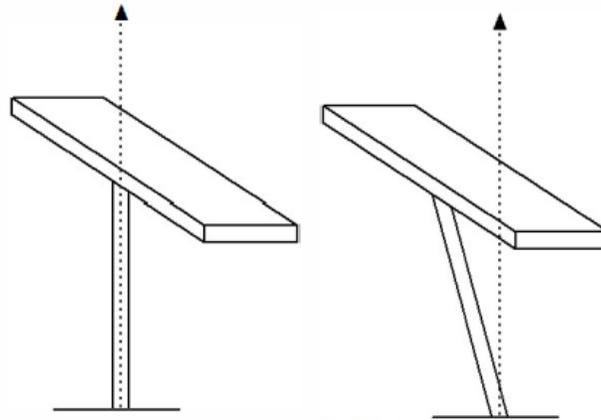
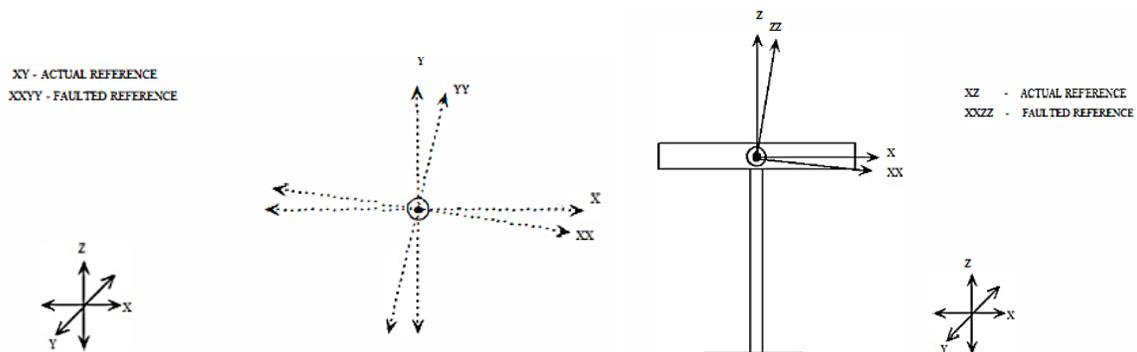


Figura 2.19: Inclinación de pedestal [24].

- **Sistema de referencias de ángulos solares:**

Los algoritmos de posición retornan los ángulos de posición solar con respecto al sistema de referencia compuesto por el norte verdadero y el vector normal del terreno. Para usar entonces tal información se debe utilizar un sistema de referencia que en lo posible coincida con este sistema de referencia verdadero; sin embargo, puede existir un error en el sistema de referencia (ver Figura 2.20), que puede deberse al error de inclinación de pedestal, orientación errónea del helióstato durante la instalación, errores en los instrumentos para determinar el norte verdadero y/o la vertical en el punto de instalación, entre otros similares.



(a) Error en el sistema de referencial azimutal.

(b) Error en el sistema de referencia de elevación.

Figura 2.20: Error en los sistemas de referencia de los ángulos solares [24].

- **Deformaciones debido al viento:**

Este error es diferente acorde a los distintos diseños de los sistemas de movimiento de helióstatos. Algunos pueden ser más sensibles a estas deformaciones debido a, por ejemplo, una mayor área del espejo o estructuras más débiles. En general, este error se puede solucionar realizando estudios previos en programas computacionales especializados que permitan verificar que el helióstato diseñado tiene la capacidad de resistir frente a los niveles de viento presentes en la zona de instalación.

- Terreno desnivelado:

En el cálculo de la orientación que debe tener el helióstato para reflejar la radiación en la torre entra en juego el vector helióstato-torre, es evidente que este depende de la posición del helióstato, en particular, de su altura relativa a la torre. En caso de un terreno plano, el error cometido en este ámbito es menor; sin embargo, en terrenos no uniformes se deben considerar estas diferencias en la altura de instalación de los helióstatos.

- *Gear Backlash*:

Este error se refiere al “juego” que pueden tener los engranajes, siendo esto más común en los helióstatos de menor calidad. Destacar además que ciertos tipos de engranes (como por ejemplo los *worm gear*) son menos susceptibles a presentar este problema.

- *Backdrive* del helióstato

Este error se refiere a que la superficie reflectora del helióstato puede desplazarse en cierto grado de la posición deseada debido a su propio peso, lo que es en general más común en helióstatos de mayor tamaño, y por tanto, de mayor peso.

- Tipo de *encoder*:

Existen dos tipos de codificadores de posición en base a la forma en que el dato de posición es retornado, estos corresponden a los *encoder* absolutos o incrementales. Los primeros devuelven exactamente la posición, mientras que los segundos devuelven una señal cada vez que existe una rotación de la resolución mínima del *encoder*. En estos últimos es necesario interpretar tales señales (por medio de un microcontrolador) para determinar la posición absoluta. En general, los *encoder* absolutos son más confiables, pero a la vez más costosos, por lo que en caso de utilizar *encoders* de tipo incremental se debe tener especial cuidado en este problema.

- Baja resolución de *encoders*:

Además del tipo de *encoder*, importa también la resolución que estos tengan; no obstante, a mayor resolución, mayor es el costo, por lo que la resolución requerida se debe calcular de forma adecuada.

2. Errores no determinísticos

- Deformación de la superficie del espejo:

Uno de los principales errores de este tipo corresponde a que la deformación de la superficie del espejo. Este puede ser causa de problemas en la construcción de la estructura del helióstato que llevará adosado el espejo, o también por deformaciones debido a la temperatura/viento, entre otros. Este problema significa que la radiación se refleja de forma dispareja en el receptor.

- Reducción de la reflectividad de los espejos con el tiempo:
Es común que con el paso del tiempo los espejos de los heliostatos vean reducida su capacidad de reflejar la radiación, principalmente debido a las condiciones en las que estos trabajan, la misma radiación que día a día reciben los deteriora y hace que pierdan sus propiedades originales.
- Reducción de precisión de sensores con el tiempo:
Como es esperable, los sensores y dispositivos electrónicos reducen sus precisión con el paso del tiempo, más aún cuando funcionan en ambientes al aire libre, sometidos a altas temperaturas u otras inclemencias. La mejor forma de sobrellevar este problema corresponde a una revisión y/o mantención cada cierto tiempo, tanto de estos dispositivos como del heliostato en general.

2.3.2. Metodologías comunes

Para hacer frente a los errores revisados previamente que pueden afectar el funcionamiento de los heliostatos se requiere una metodología de calibración que permita mediar e internalizar tales errores en el funcionamiento.

La mayoría de las metodologías de calibración están basadas en modelos de error, los que consisten en incluir como incógnita los errores que afectan el problema a tratar en el modelo matemático que lo describe, para luego estimar estos valores mediante alguna metodología y algoritmo.

En el contexto de calibración de heliostatos, la referencia principal y citada por la mayoría de las investigaciones relacionadas a este tópico corresponde al trabajo realizado por Baheti y Scott [25]. Ellos consideraron tres fuentes de error: inclinación de pedestal, errores en el sistema de referencia de los ángulos solares, y las tolerancias de los engranes de movimiento, los cuales se incluyen en el modelo de error usando un total de 6 parámetros, el cual tiene la siguiente forma:

$$q(k) = H(k)a + \epsilon(k) \tag{2.3.1}$$

$$k = 1, 2, \dots, L,$$

en donde:

- $q(k)$: Vector de error de 2×1 , cuya primera componente corresponden al error en azimuth y elevación respectivamente.
- $H(k)$: Matriz de dimensiones 2×6 .
- a : Vector de 6×1 de parámetros de error.
- $\epsilon(k)$: Vector de 2×1 que representa los errores de mayor grado.

El índice k de la expresión anterior hace referencia de la medida realizada, de un total de L medidas.

Se debe destacar que este modelo de error es de carácter lineal, esto es relevante pues facilita de gran manera la posterior estimación de los parámetros de error. En caso de no poder plantear

un modelo lineal, se debe recurrir a metodologías de optimización no lineales.

El funcionamiento de esta metodología es el siguiente: se le pide al heliostato que apunte hacia el Sol, en caso ideal de calibración perfecta, el vector normal de la superficie reflectora debiese apuntar directamente a este; en caso contrario de un heliostato descalibrado, el vector solar y la normal mencionada no debiesen coincidir debido a los errores existentes. Este error se mide utilizando un sensor solar instalado en centro del espejo del heliostato (ver Figura 2.21), y corresponde a los valores e_1, e_2 del modelo de error presentado en (2.3.1).

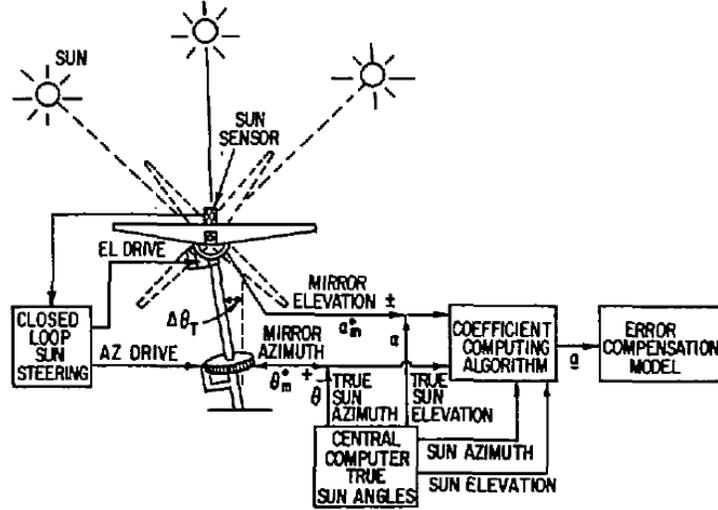


Figura 2.21: Inclinación de pedestal [25].

El penúltimo paso corresponde a estimar los parámetros de error del modelo, esto se puede llevar a cabo utilizando el método de mínimos cuadrados, en tal caso, la solución se obtiene encontrando el vector de parámetros a que minimice el error, que según este método se calcula de la siguiente forma:

$$\hat{a} = \left[\sum_{k=1}^L H^T(k)H(k) \right]^{-1} \left[\sum_{k=1}^L H^T(k)q(k) \right] \quad (2.3.2)$$

Los resultados experimentales presentados en esta publicación indican que la disminución en el error de apunte azimuthal es de 10 veces gracias a este método. Valores originales de error entre 0.65° y 0.84° fueron reducidos a valores entre 0.004° y 0.115° .

Hoy en día, la tendencia de utilizar modelos de compensación de error como el presentado originalmente por Baheti y Scott el año 1980 continúa, con algunas variaciones adicionales, principalmente en relación a la cantidad de errores que se incluyen para ser parametrizados, junto con la metodología para realizar las mediciones de error.

La opción más repetida para realizar las mediciones de error corresponde al uso de una superficie objetivo ubicada unos metros más abajo que el receptor [26][27], lo que se representa de manera gráfica en la Figura 2.22. Durante la calibración, se les indica a los heliostatos que apunten a tal superficie; luego, se utiliza un algoritmo de procesamiento de imágenes para detectar las coordenadas de la de radiación reflejada, y con esto medir en unidades de longitud

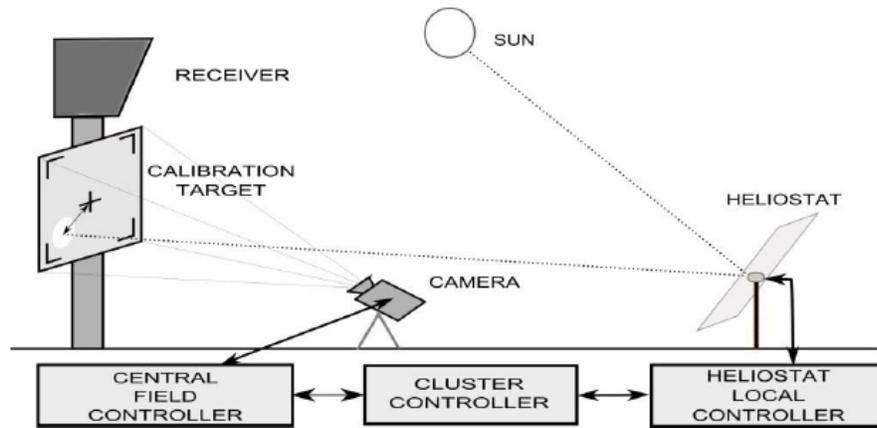


Figura 2.22: Esquema de sistema de calibración típico utilizado en CSPs mediante superficie objetivo. [28]

los errores horizontal y vertical cometidos durante este ejercicio.

Sistema de calibración en planta de prueba de eSolar [29]:

Esta metodología fue desarrollada y probada en una instalación de pruebas de la empresa eSolar, y para su funcionamiento requiere la instalación de cámaras ubicadas en torres instaladas alrededor del campo, de la forma que se muestra en la Figura 2.23. Para calibrar un heliostato se le pide que apunte la radiación a las cámaras. Tal información geométrica se utiliza para calibrar los heliostatos. En tal publicación se menciona además que las cámaras son capaces de soportar altas cantidad de flujo, lo que permite la calibración de más de un heliostato a la vez. Por lo mismo, se destaca que la calibración del 90 % de un campo de heliostatos puede ser realizada en un período de 18 días con buenas condiciones climáticas.

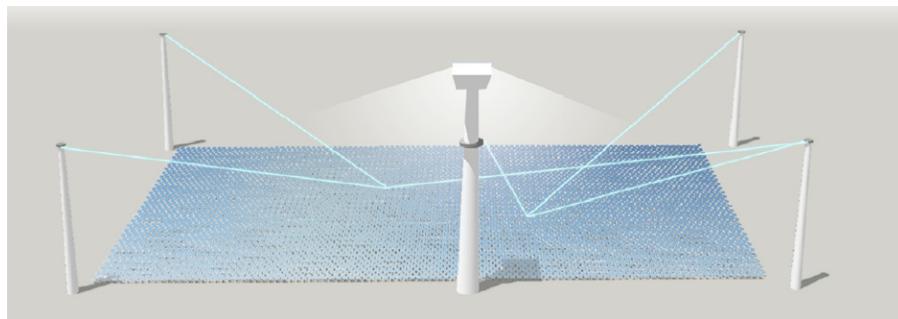


Figura 2.23: Ilustración conceptual del sistema de calibración implementado por la empresa eSolar [29].

El resto de metodologías de calibración como por ejemplo la presentada en [31] requieren la instalación de cámaras en cada heliostato, lo que inmediatamente aumenta el costo de tal sistema debido a que la cantidad de cámaras requeridas es igual a la cantidad de heliostatos del campo.

3. Metodología

A continuación se describe a grandes rasgos la metodología a seguir para lograr los objetivos planteados en el apartado anterior.

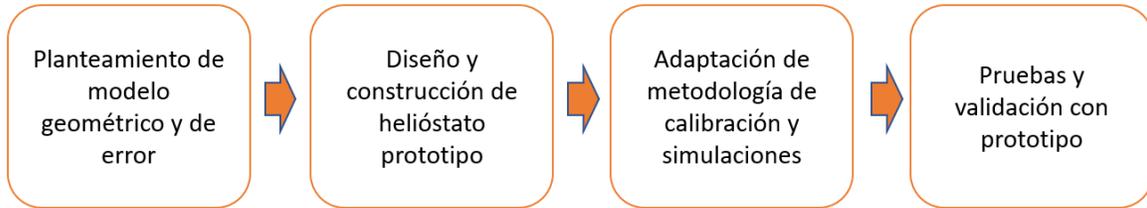


Figura 3.1: Etapas de la Metodología propuesta.

3.1. Planteamiento de modelo geométrico y de error

Definida la geometría de movimiento que tendrá el heliostato durante el proceso de diseño mecánico (que en este caso corresponde a la geometría de tipo *pitch/roll*), se plantea el modelo geométrico que relaciona el vector normal de la superficie reflectante del heliostato con los ángulos de posición *pitch/roll*. Además, tales ecuaciones planteadas deben ser extendidas para incluir los errores geométricos de construcción e instalación que pueden afectar el correcto apunte de los heliostatos de la futura planta Solarbosch, esto corresponde al planteamiento de un modelo de error, el cual será utilizado en los siguientes pasos de esta metodología.

3.2. Diseño y construcción de heliostato prototipo

En segundo lugar, se debe diseñar y construir un heliostato prototipo, en particular el sistema eléctrico y de control. Esto se refiere al sistema de actuación compuesto por un par de motores, uno para cada eje de movimiento, el sistema de alimentación, más la electrónica de control. Como la precisión de movimiento es un aspecto crítico, se valida la eficiencia del funcionamiento en lazo abierto de los motores paso a paso utilizados. Además, se realizan pruebas utilizando sensores inerciales o *encoders* rotatorios de posición con el objetivo de estudiar la posibilidad de cerrar el lazo de control.

Se implementa también una forma de controlar el heliostato de manera manual a través de una interfaz gráfica ejecutable desde un computador. También, se implementa el control local del heliostato, el cual utiliza el modelo geométrico planteado anteriormente para estimar la posición a adoptar en función de la posición del Sol y la posición relativa a la torre.

3.3. Adaptación de metodología de calibración y simulaciones

Parte fundamental para el correcto funcionamiento de los heliostatos corresponde a la calibración inicial y periódica que se les debe aplicar. Por tanto, se adapta la metodología existente basada en el uso de una superficie objetivo ubicada en la torre receptora para medir el error

de apunte (la razón de esta elección se justifica durante el capítulo 5) utilizando el modelo de error dentro de un algoritmo de optimización que permite estimar errores. Dentro de este mismo contexto, se implementa un algoritmo de visión computacional que permite estimar el centroide del reflejo incidente en la superficie de calibración. Se prueba la eficiencia de esta metodología utilizando fotografías en una superficie de calibración instalada en el lugar de pruebas.

Luego, mediante simulaciones se prueba la eficacia de la metodología planteada considerando medidas de calibración en distintas fechas. Además, el requerimiento de sincronización temporal y el efecto de los errores geométricos también es estudiado de la misma forma.

3.4. Pruebas y Validación con prototipo

Finalmente, con el heliostato prototipo y la metodología de calibración planteada, se realizan pruebas de funcionamiento para medir el desempeño del heliostato. Para ello se instala una superficie objetivo con un par de ejes coordenados dibujados en su superficie para medir el error de apunte de forma visual. Esta instalación permite, en primer lugar, ejecutar la metodología de calibración tomando medidas a distintas horas del día, y en segundo lugar, verificar los modelos geométricos, y el sistema de control mismo en los cuales se basa el funcionamiento del heliostato.

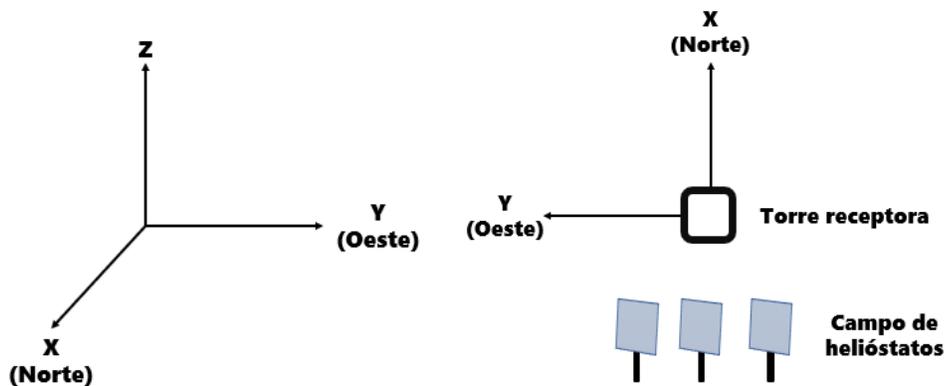
4. Modelo de Error para heliostato con movimiento *Pitch/Roll*

Tal como se mencionó en el marco teórico, la geometría de movimiento de los heliostatos de la mayoría de las plantas de concentración de tipo torre es de tipo azimuth/elevación; gran parte de la literatura sobre el movimiento y control de heliostatos está basada para tal tipo de geometría de movimiento. Sin embargo, desde el punto de vista del diseño mecánico y de actuación, el movimiento en azimuth es de gran costo, debido a que típicamente implica rotar el peso completo de la estructura en torno al eje vertical. Es por lo anterior que los esfuerzos de Solarbosh han apuntado a diseñar un heliostato con movimiento de tipo *pitch/roll*, de menor costo. En este capítulo, se describe la geometría de movimiento de un heliostato de estas características. Además, se plantea un modelo de error que permite determinar el punto de reflexión de un heliostato considerando la existencia de distintos errores geométricos determinísticos típicos revisados en el Marco Teórico (Capítulo 2). El objetivo de este modelo está orientado en primer lugar a estudiar los efectos que tienen los errores en el control de los heliostatos, y en segundo lugar, es requisito para implementar el sistema de calibración y seguimiento de estos.

4.1. Planteamiento matemático

El objetivo del modelo es calcular el punto de reflexión en la superficie objetivo o en el receptor de la torre teniendo como datos la posición relativa a la torre del heliostato, la posición del Sol, y los errores geométricos involucrados. Se presenta a continuación la derivación paso a paso de este modelo.

Se define el sistema de coordenadas de la Figura 4.1 (a), en donde el eje X es positivo hacia el Norte, el eje Y es positivo hacia el oeste, y el eje Z es positivo hacia arriba. Además, se considera que la torre receptora se ubica en el origen de este sistema de coordenadas, y por tanto la componente X de la ubicación de cada heliostato es negativa al considerar que estos siempre se ubican al sur de la torre (ver Figura 4.1 (b)).



(a) Sistema de referencia global utilizado. (b) Distribución de la torre receptora y el campo de heliostatos (Vista superior).

Figura 4.1: Sistema de referencia y ubicación de elementos principales.

4.1.1. Relación entre ángulos *pitch/roll* y vector normal

Con el propósito de orientar el heliostato de forma precisa para reflejar la radiación solar en el receptor, quedó establecido en el marco teórico que en primer lugar se debe conocer el vector normal que debe adoptar la superficie reflectora del heliostato como función de la posición del Sol y la posición del heliostato relativa a la torre, que se calcula usando (2.2.4). Con tal dato conocido, el siguiente paso corresponde a orientar el heliostato a tal posición en función de las particularidades de la geometría de movimiento, que en este caso corresponde al movimiento de tipo *pitch/roll*.

En primera instancia, se plantean las ecuaciones matemáticas para resolver el problema directo, el cual consiste en obtener el vector normal de apunte dados los ángulos de *pitch* y *roll*. Este ejercicio es útil para comprender este tipo de movimiento, pero además permite resolver el problema inverso (dados un vector normal, obtener los valores de los ángulos *pitch* y *roll*) que es lo que se desea como resultado principal.

■ Cálculo de vector normal dada una posición *pitch/roll*

Se define el estado inicial del sistema (ángulo *pitch* y *roll* iguales a $0,0^\circ$) como la posición perfectamente vertical de la superficie reflectora del heliostato apuntando hacia el Norte. En tales condiciones, el vector normal es igual al vector $(1, 0, 0)^T$ según el sistema de referencia establecido.

Además, se denominan como R_p y R_r las matrices que definen la rotación en *pitch* (rotación en torno al eje Y) y *roll* (rotación en torno al eje Z) respectivamente, las cuales son función de los ángulos de giro en *pitch* (θ_p) y *roll* (θ_r):

$$R_p = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & 0 & \sin(\theta_p) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_p) & 0 & \cos(\theta_p) \end{bmatrix} \quad (4.1.1)$$

$$R_r = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & 0 \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.2)$$

Se debe considerar que el orden de multiplicación de las matrices R_p y R_r es de suma importancia. Para facilitar esta deducción, la rotación en *roll* se realiza con el sistema de coordenadas original rotado en (θ_p) grados, el cual se representa en color rojo en la Figura 4.2. El eje X_p ($(1, 0, 0)_p^T$) de tal sistema coincide con el vector normal del heliostato, luego, una rotación en *roll* corresponde a una rotación con respecto al eje Z_p representado en la misma imagen. El vector normal rotado en *roll* expresado en este sistema de referencia (\vec{n}) es igual a:

$$\vec{n}_r = R_r \cdot (1, 0, 0)^T \quad (4.1.3)$$

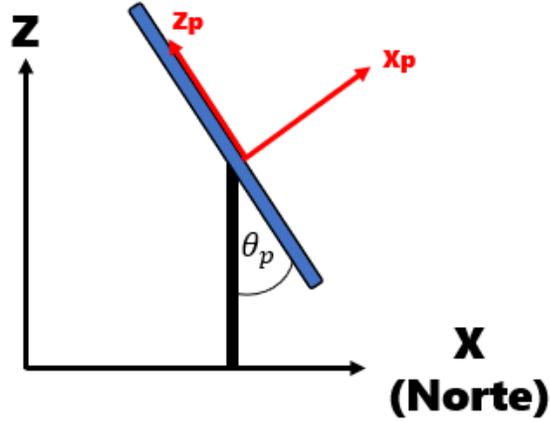


Figura 4.2: Sistema de referencia rotado θ_p grados en Pitch.

En segundo lugar, se realiza un cambio de base para obtener el este vector expresado en el sistema de coordenadas original, esto último corresponde a multiplicar por la matriz de rotación del eje *pitch*, lo que da como resultado el vector normal (\vec{n}) que se deseaba calcular en un principio:

$$\vec{n} = R_p \cdot \vec{n}_r = R_p \cdot R_r \cdot (1, 0, 0)^T \quad (4.1.4)$$

Se debe destacar que el orden de multiplicación contrario de las matrices R_p y R_r describe el movimiento de tipo *azimuth/elevation*.

- **Cálculo de los ángulos *pitch/roll* dado un vector normal**

Ya planteadas las ecuaciones que describen el movimiento del helióstato dada una posición *pitch/roll*, corresponde resolver el problema inverso, es decir, dado un vector normal de componentes (n_x, n_y, n_z) , obtener los ángulos *pitch/roll* que definen tal vector normal.

En primer lugar se determina el ángulo *pitch*, el cual se calcula de manera directa utilizando las componentes X y Z del vector normal, y es resultado de la siguiente ecuación:

$$\theta_p = \text{atan}\left(\frac{n_z}{n_x}\right) \quad (4.1.5)$$

Conociendo el ángulo *pitch*, se obtiene la respectiva matriz de rotación asociada evaluando el valor obtenido de θ_p en la ecuación 4.1.2, matriz que permite calcular el vector normal expresando en el sistema de referencia rotado según *pitch* (\vec{n}_r), que se despeja de (4.1.4):

$$\vec{n}_r = R_p^{-1} \cdot \vec{n} \quad (4.1.6)$$

Finalmente, este vector permite calcular el ángulo *roll* según sus coordenadas X e Y:

$$\theta_r = \text{atan}(n_{ry}/n_{rx}) \quad (4.1.7)$$

4.1.2. Adición de errores

Durante el capítulo del marco teórico se presentaron una serie de errores que influyen en el correcto seguimiento y reflexión del sol en la torre. De aquellos, se seleccionaron los más importantes en el sentido que permiten describir con mayor detalle y de la forma más general posible la orientación real de los espejos de los heliostatos. Estos son los siguientes:

- Error de referencia (*Offset*) en *Pitch* y *Roll* (b_p, b_r)
- Error de rotación proporcional del eje *Pitch* y *Roll* (k_p, k_r)
- Errores de posición ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)
- Error de orientación azimutal (ϵ_α)
- Error de inclinación de pedestal ($\epsilon_{pt_x}, \epsilon_{pt_x}$)

La Figura 4.3 resume el objetivo del modelo, en donde los errores considerados corresponden a entradas de este junto con el vector solar y la posición del heliostato, mientras que el resultado de salida del modelo corresponde a las coordenadas de apunte en el plano de la superficie objetivo (con X_a e Y_a los errores horizontal y vertical respectivamente, que con son coincidentes con los ejes Y e Z del sistema de referencia global). Se destaca en color rojo el *input* de los ángulos *pitch/roll*, pues según el uso que se le dará al modelo (que será visto en las siguientes secciones) pueden omitirse o no como entradas.

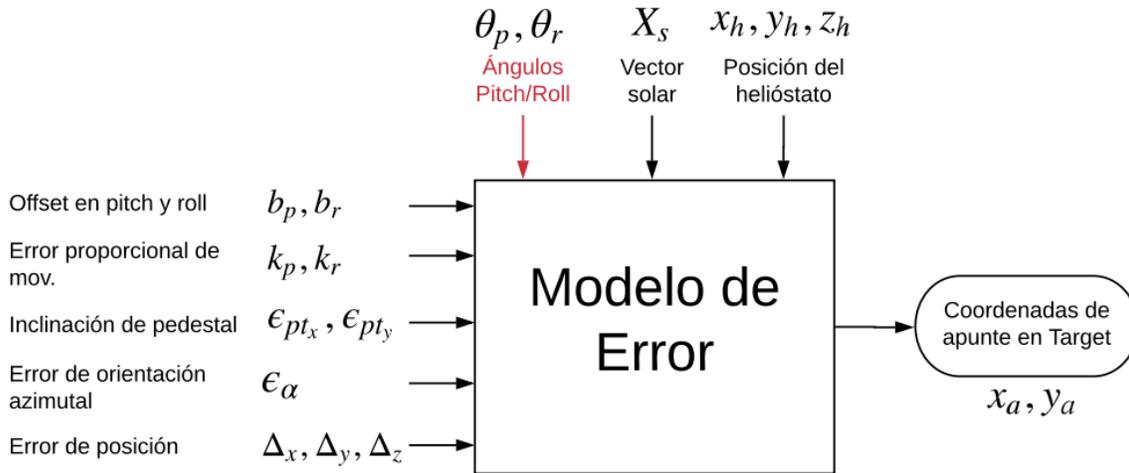


Figura 4.3: Diagrama funcional del modelo de error.

Se procede a agregar los errores geométricos considerados, en donde se debe tener particular cuidado con el orden de aplicación, pues entre si la mayoría no son conmutativos. El elemento principal sobre el cual se agrega el efecto de estos errores corresponde al vector normal de orientación de la superficie reflectora del heliostato.

1. **Añadir errores de offset y proporcional a ángulos *pitch* y *roll*.**

Los errores de referencia tienen relación con la ubicación de la posición angular igual a cero grados. En la Figura 4.4 se representa el efecto que significa un desplazamiento de la referencia en b_p grados respecto a la referencia verdadera (que para el caso del movimiento en *pitch* corresponde al plano perpendicular al pedestal del heliostato). Si la referencia está desplazada, la posición final adoptada estará desplazada en los mismos b_p grados. El caso del movimiento en *roll* es análogo, sólo que la referencia es distinta.

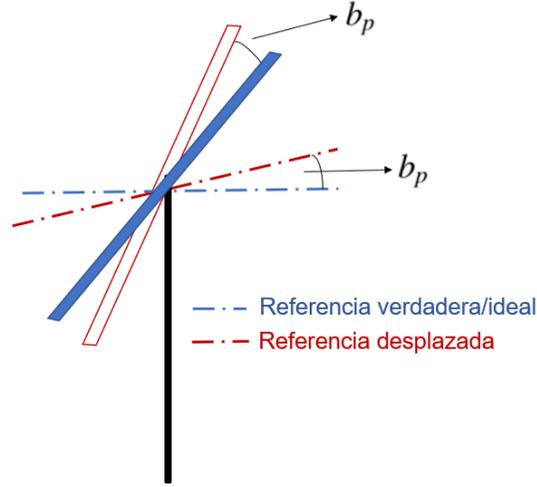


Figura 4.4: Representación gráfica del error de *Offset* de referencia de movimiento *pitch*.

Por otro lado, el error de tipo proporcional está relacionado directamente con la calidad de la calibración entre el movimiento de los actuadores y el movimiento angular real del heliostato. Si es deficiente, sucederá que si se comanda un movimiento de X grados, el movimiento real será de $X \pm k$ grados. Si bien el valor de k puede ser pequeño, para grandes movimientos angulares el error acumulado puede ser significativo.

Para añadir estos errores, se debe actualizar el valor de los ángulos *pitch* y *roll* de entrada del modelo (θ_p y θ_r respectivamente). En primer lugar, los errores de *offset* simplemente se suman a los ángulos originales. Por otra parte, en los errores de tipo proporcional se debe considerar ángulos de referencia (θ_p^{ref} , θ_r^{ref}), pues a medida que el heliostato adopta posiciones más alejadas de tal referencia, el error de tipo proporcional es mayor (a nivel constructivo, estos ángulos de referencia corresponden a la posición origen del heliostato dada por los finales de carrera u *encoders*, a tratarse en el siguiente Capítulo).

En base a lo anterior, los ángulos actualizados con estos errores se expresan según:

$$\theta_p^{new} = \theta_p + (\theta_p - \theta_p^{ref}) \cdot k_p + b_p$$

$$\theta_r^{new} = \theta_r + (\theta_r - \theta_r^{ref}) \cdot k_r + b_r$$

Utilizando nuevos ángulos θ_p^{new} y θ_r^{new} se recalculan las matrices de rotación según (4.1.2) y (4.1.1), y con esto se actualiza el vector normal del espejo del heliostato utilizando (4.1.4).

2. Añadir error de inclinación de pedestal.

Este error representa la posibilidad de que el pedestal del heliostato este inclinado hacia alguna dirección, lo que puede ser en sentido Este-Oeste y/o hacia el Norte o Sur; esto significa que se requiere dos variables para representar cada una de las inclinaciones mencionadas, ϵ_{pt_x} y ϵ_{pt_y} respectivamente. Lo anterior se representa gráficamente en la Figura 4.5:

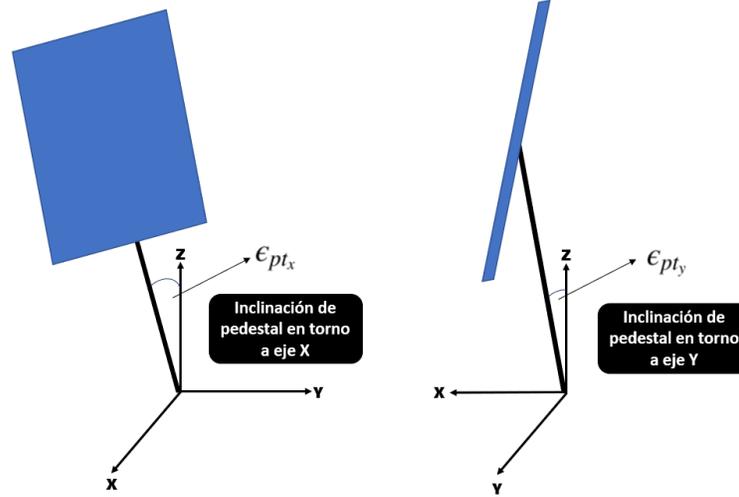


Figura 4.5: Representación gráfica del error de pedestal en sus dos componentes de dirección.

Matemáticamente este error se expresa mediante la siguiente matriz de rotación:

$$R_{pt} = \begin{bmatrix} \cos(\epsilon_{pt_y}) & 0 & \sin(\epsilon_{pt_y}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\epsilon_{pt_y}) & 0 & \cos(\epsilon_{pt_y}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\epsilon_{pt_x}) & -\sin(\epsilon_{pt_x}) \\ 0 & \sin(\epsilon_{pt_x}) & \cos(\epsilon_{pt_x}) \end{bmatrix}$$

El vector normal de la etapa previa (\vec{n}) se actualiza utilizando la matriz de rotación recién descrita según:

$$\vec{n}_{pt} = R_{pt} \cdot \vec{n}$$

3. Añadir error de orientación azimuthal.

A su vez, el error de orientación azimuthal busca representar el error que se comete durante la instalación cuando este debe orientarse hacia el Norte o hacia la torre, por tanto, corresponde a una rotación con respecto al eje vertical Z, la cual está definida por la siguiente matriz de rotación:

$$R_{\alpha} = \begin{bmatrix} \cos(\epsilon_a) & -\sin(\epsilon_a) & 0 \\ \sin(\epsilon_a) & \cos(\epsilon_a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.8)$$

El vector normal de la etapa anterior se actualiza al multiplicarlo por

$$\vec{n}_e = R_{\alpha} \cdot \vec{n}_{pt}$$

4. Añadir error de posición.

Este error se refiere a que la posición real del heliostato no se corresponde con la utilizada para realizar los cálculos de orientación. La relación entre estas la posición real del heliostato en el campo (x_h^r, y_h^r, z_h^r) y la utilizada en el modelo (x_h, y_h, z_h) es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_h^r \\ y_h^r \\ z_h^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{bmatrix} \quad (4.1.9)$$

Este error por si mismo no presenta un efecto en el vector normal como los casos anteriores, su efecto quedará en evidencia en el siguiente paso del modelo.

4.1.3. Error de apunte

Finalmente, para calcular las coordenadas de apunte en la superficie objetivo se debe calcular el vector que describe al rayo reflejado, que es función del vector normal con todos los errores añadidos (\vec{n}_e) y el vector solar (X_s); y se obtiene utilizando (4.1.10):

$$\hat{r} = -X_s + 2(X_s \cdot \vec{n}_e) \cdot \vec{n}_e \quad (4.1.10)$$

Se tiene además, que la ecuación de la recta teniendo un vector de dirección (\vec{v}) y un punto de ella (P), es la que se presenta en la ecuación 4.1.11, en donde λ es un real.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (4.1.11)$$

Para el caso de estudio, el vector de dirección viene dado por el vector del rayo reflejado, mientras que el punto de la recta a utilizar corresponde al centro de la superficie reflectora del heliostato, es decir, la posición del heliostato considerando los errores incluidos, es decir, se utiliza la posición real del heliostato (x_h^r, y_h^r, z_h^r) .

Además, como se definió que el receptor se encuentra en origen del sistema de coordenadas, el plano que define su superficie corresponde al plano descrito por la ecuación $x = 0$. Al introducir esto último a (4.1.11) se obtiene un sistema de 3 ecuaciones (Ecuación 4.1.12) que permite calcular el punto de impacto definido en las coordenadas I_y e I_z , que corresponde al apunte horizontal y vertical respectivamente:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h^r \\ y_h^r \\ z_h^r \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (4.1.12)$$

De la ecuación asociada a la primera componente se obtiene que el valor de λ es:

$$\lambda = -\frac{x_h^r}{r_x} \quad (4.1.13)$$

Con esto, I_y e I_z son iguales a:

$$I_y = y_h^r - \frac{x_h^r}{r_x} \cdot r_y$$

$$I_z = z_h^r - \frac{x_h^r}{r_x} \cdot r_y$$

Finalmente, para obtener el error de apunte (representado en la Figura 4.6) se restan las coordenadas del centro de la superficie objetivo ($R_x = 0, R_y, R_z$).

$$X_a = I_y - R_y \quad (4.1.14)$$

$$Y_a = I_z - R_z \quad (4.1.15)$$

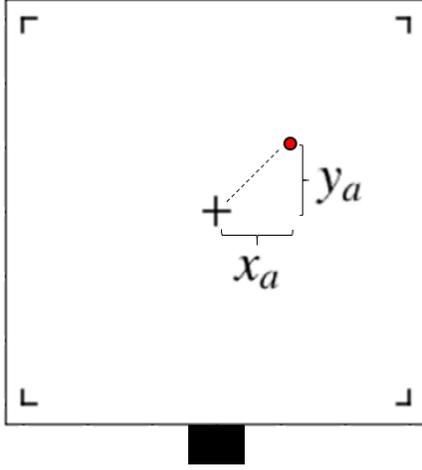


Figura 4.6: Coordenadas de apunte (x_a, y_a) resultado del modelo de error.

El Anexo B presenta un análisis de sensibilidad cuyo objetivo corresponde a validar a través de la intuición el correcto planteamiento de este modelo de error.

4.2. Modos de funcionamiento

El modelo de error recién planteado tiene una gran importancia, corresponde a la base de la simulaciones a realizar en el capítulo siguiente, y también es fundamental en la calibración de los heliostatos y en la operación de cada uno de ellos, en ambos escenarios, el modelo de error se utiliza de forma distinta y particular.

4.2.1. Modo de calibración

En esta forma de uso del modelo de error, el objetivo corresponde a estimar los errores geométricos reales del heliostato, teniendo como entrada un vector de medidas con el error de apunte en el *target*, cada una con su respectivo vector solar asociado más los ángulos de posición comandados para la medición. Lo anterior se representa de forma esquemática en la Figura 4.7.

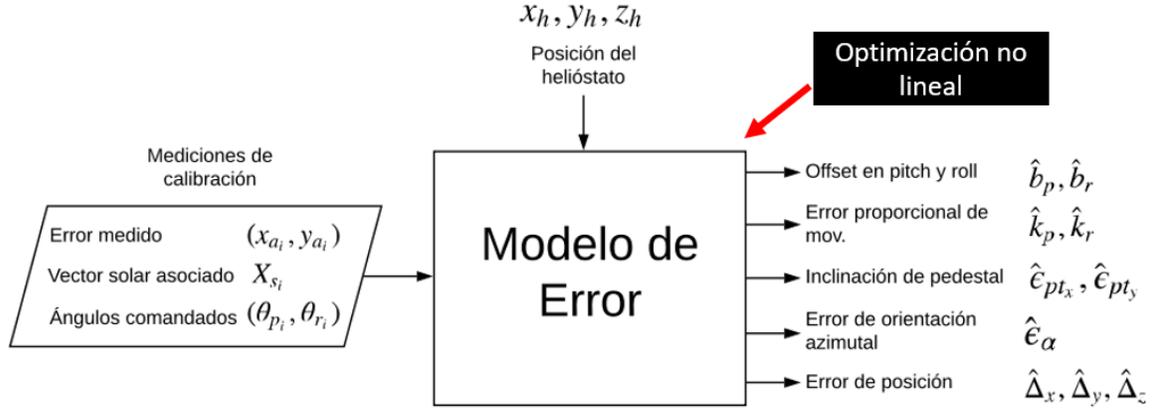


Figura 4.7: Diagrama funcional del modelo de error utilizado para calibración.

La premisa fundamental para llevar a cabo esta estimación corresponde a encontrar la combinación de valores de errores que mejor describan una serie de mediciones realizadas en el *target* de calibración, lo que puede lograrse mediante un problema de optimización que minimice la distancias entre los puntos medidos y los del modelo. Matemáticamente, lo anterior significa que la función objetivo a minimizar es la siguiente:

$$f(\vec{x}_e) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \sqrt{(X_{m_i} - X_{a_i}(\vec{x}_e, X_{s_i}, \theta_{p_i}, \theta_{r_i}))^2 + (Y_{m_i} - Y_{a_i}(\vec{x}_e, X_{s_i}, \theta_{p_i}, \theta_{r_i}))^2}$$

En donde:

- \vec{x}_e : Vector de errores.
- $\theta_{p_i}, \theta_{r_i}$: Posición *pitch/roll* de la *i*-ésima medición.
- X_{m_i}, Y_{m_i} : Coordenadas de *i*-ésima medición de error
- X_{s_i} : Vector Solar asociado a la *i*-ésima medición.
- $X_{a_i}(), Y_{a_i}()$: Coordenadas de apunte del modelo matemático de error para el *i*-ésimo vector solar.
- N : Cantidad de mediciones

Y el problema de minimización a resolver el siguiente:

$$\begin{aligned} &\underset{\vec{x}}{\text{minimizar}} && f(\vec{x}_e) \\ &\text{sujeto a} && |\vec{x}_e| \leq \bar{x}_e \end{aligned}$$

El alto grado de no linealidad del modelo de error implica que se requiere un método de optimización adecuado para obtener soluciones precisas. La mayoría de los métodos de optimización no lineal tienen como requisito una estimación inicial de las variables de decisión, que para este caso será el vector con cero en todas sus componentes dada la naturaleza de la distribución de los errores considerados (pues en el caso ideal son todos iguales a cero).

Además, es importante destacar la restricción asociada al vector de errores del problema de minimización, necesaria para limitar el espacio de soluciones. Dependiendo de la naturaleza

de cada error es posible acotarlo en un distinto valor, por ejemplo, un error de inclinación de pedestal nunca será mayor que $2 - 3^\circ$ pues sería muy notorio durante la instalación; del mismo modo, los errores de posición deben acotarse en base a la metodología de medición de distancias utilizada durante la instalación de los heliostatos, es más, estos errores pueden eliminarse del modelo si se utiliza topografía de alta precisión durante la instalación de estos.

4.2.2. Modo de seguimiento

Durante la operación normal del heliostato día a día, los errores estimados previamente en la etapa de calibración son utilizados como entradas para calcular la posición *pitch/roll* que debe adoptar para apuntar a la torre dado un vector solar (ver Figura 4.8). Debido a la no linealidad del modelo, no es posible despejar directamente los ángulos de apunte. Por lo que al igual que el caso anterior, se debe recurrir a la utilización de un método de optimización no lineal para obtenerlos, la función objetivo a minimizar es bastante similar, pues es la distancia entre el punto de apunte deseado y el del modelo; no obstante, la variable de decisión corresponde a los ángulos *pitch* y *roll* y no a los errores como en el caso anterior.

$$f(\vec{x}_a) = \sqrt{(X_{a_i}(\vec{x}_a))^2 + (Y_{a_i}(\vec{x}_a))^2}$$

En este problema de optimización, la variable de decisión corresponde al vector \vec{x}_a , el cual es bidimensional y está compuesto por los ángulos θ_p y θ_r , que serán los ángulos definitivos que se le deberán comandar al heliostato para apuntar hacia el receptor de la torre.

En base a lo anterior el problema de minimización a resolver es el siguiente:

$$\begin{aligned} \underset{\vec{x}_a}{\text{minimize}} \quad & f(\vec{x}_a) = \sqrt{(X_{a_i}(\vec{x}_a))^2 + (Y_{a_i}(\vec{x}_a))^2} \\ \text{sujeto a} \quad & 0,0^\circ \leq \theta_p \leq 90,0^\circ \\ & -70,0^\circ \leq \theta_r \leq 70,0^\circ \end{aligned}$$

Se destaca que los ángulos están restringidos en el intervalo de su rango de operación común, que corresponde entre 0.0° y 90.0° para el caso del ángulo *pitch* debido a que por restricciones constructivas no puede adoptar posiciones fuera de tal rango; lo mismo aplica para el caso del movimiento *roll* en donde como primera aproximación se considera como rango las posiciones entre -70.0° y 70.0° , aunque tales valores pueden aumentar o disminuir dependiendo del diseño mecánico del heliostato.

Del mismo modo que el caso anterior, lo ideal es tener un estimación inicial, en primera instancia se puede proponer las posición $(45.0^\circ, 0.0^\circ)$ debido a que es la posición intermedia; no obstante, es más adecuado utilizar los ángulos *pitch/roll* calculándolos sin la existencia de errores utilizando (4.1.5) para el caso del ángulo *pitch*, y (4.1.7) en el caso del ángulo *roll*.

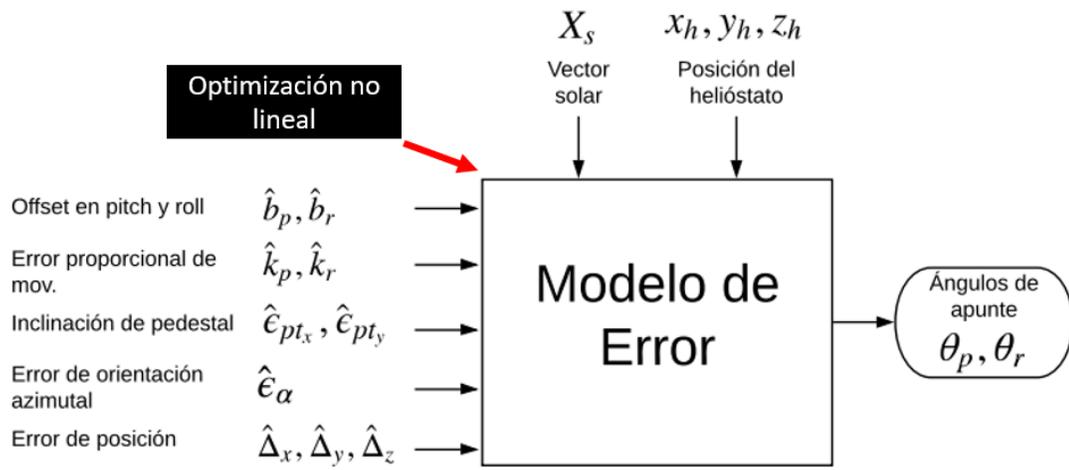


Figura 4.8: Diagrama funcional del modelo de error utilizado para el modo de operación.

5. Prototipo Solarbosch

El proyecto Solarbosch corresponde a una planta de tipo concentración solar de torre de la empresa Enerbosch. La particular característica del proyecto en comparación al común de estas centrales corresponde a que apunta a disminuir los costos de inversión disminuyendo la escala y tamaño de la planta en relación a la potencia nominal a generar. La Figura 5.1 presenta en forma conceptual la planta Solarbosch, con una torre de no mucha altura, y un campo de aproximadamente 300 helióstatos.



Figura 5.1: Planta Solarbosch.

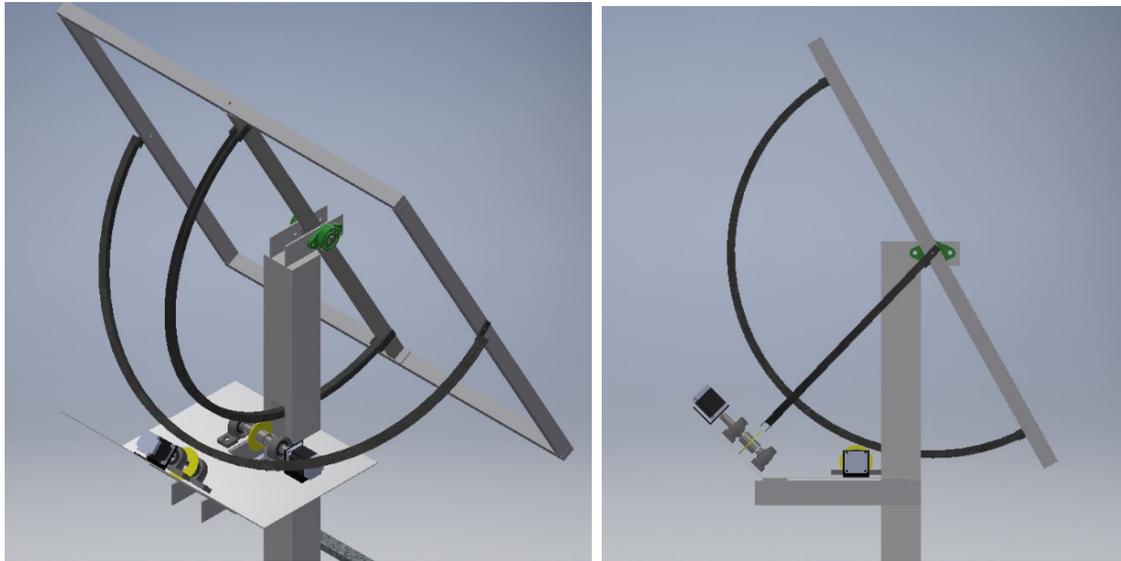
A continuación se presenta el trabajo realizado en la implementación de los helióstatos prototipo para Solarbosch.

5.1. Prototipo 1.0

En conjunto con un memorista de Ingeniería Civil Mecánica se construyó un helióstato prototipo, el cual obedece a la geometría del tipo *pitch/roll* presentada en el capítulo anterior. A continuación se realiza una breve descripción mecánica de este diseño, haciendo especial énfasis en los aspectos que se relacionan directamente con el sistema de control.

La Figura 5.2 presenta dos imágenes del diseño mecánico del helióstato, en estas es posible apreciar a grandes rasgos el funcionamiento general de este. Existen dos rieles de movimiento, el más pequeño de estos permite el movimiento *pitch*, mientras que el más grande e inclinado permite el movimiento *roll*.

En particular, el movimiento se logra utilizando una cadena típica de bicicleta adosada en la parte interna de cada uno de los rieles, la cadena pasa a través de un piñón que rota solidario al eje de movimiento. Para realizar el movimiento, este eje rota al estar conectado con el motor paso a paso. La Figura 5.3 muestra la configuración descrita para el caso del movimiento en el eje *pitch*, además de la unión del eje principal con el eje del motor que se observa en el lado



(a) Vista Isométrica

(b) Vista Lateral

Figura 5.2: Imágenes del diseño mecánico del heliostato 1.0.

derecho de la imagen, se aprecia en el lado izquierdo la instalación de un *encoder* en el mismo eje.

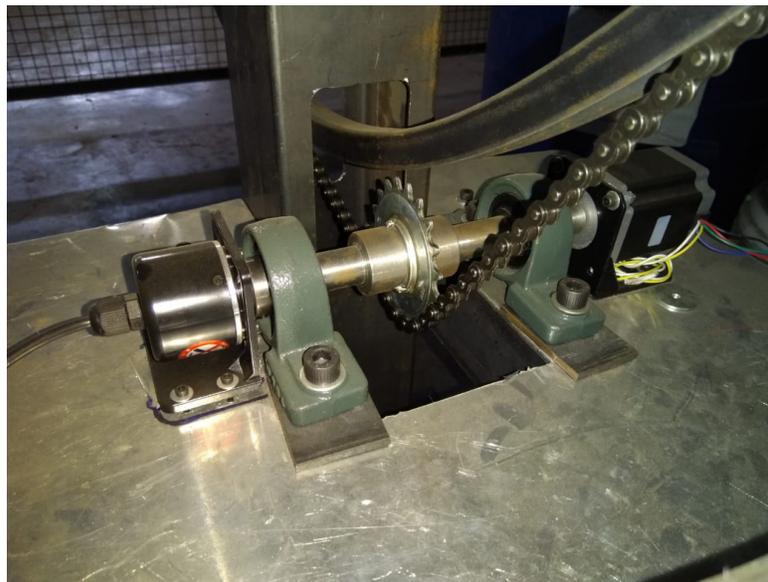


Figura 5.3: Sistema para movimiento en pitch.

5.2. Prototipo 2.0

Este prototipo fue diseñado por Solarbosch y construido en una maestranza de la ciudad de Santiago. Si bien la mayoría de la implementación y pruebas (presentadas en el siguiente capítulo) fueron realizadas con el prototipo descrito previamente, el prototipo 2.0 presenta características extra que tendrá el diseño mecánico final del heliostato, las cuales deben ser

consideradas para el diseño del sistema de control.

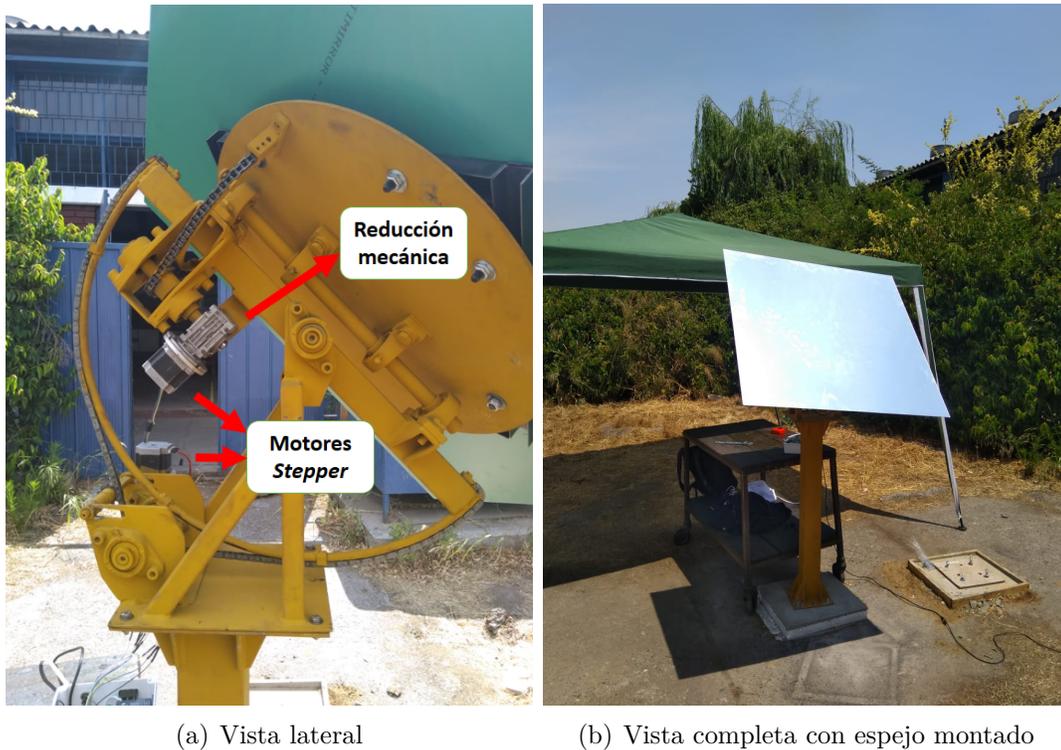


Figura 5.4: Imágenes del heliostato prototipo 2.0.

La gran diferencia de este prototipo con el presentado previamente se aprecia en la Figura 5.4 (a), en donde los motores paso a paso no están conectados directamente a los ejes con los respectivos piñones que generan el movimiento, sino que existe una caja de reducción intermedia. Esta última es de tipo sinfín corona, la cual tiene dos ventajas en relación a la utilización de los motores: en primer lugar, multiplica el torque aplicado, lo que disminuye el requerimiento de torque nominal de los motores; y en segundo lugar, sólo permite que exista movimiento cuando el torque es aplicado en los ejes a través de los motores y no por fuerzas externas (como por ejemplo viento) en el marco que sostiene al espejo.

5.3. Sistema de control

El sistema de control de orientación de los heliostatos para la planta tipo CSP Solarbosch presenta como requerimiento principal que los heliostatos sean capaces de reflejar la radiación solar en la torre con el mínimo error posible. Por lo mismo, el diseño de este, en cuanto a la estructura general y componentes eléctricos utilizados, debe responder a tal requerimiento/necesidad. A continuación se presenta el sistema de control implementado, el cual toma en consideración la experiencia en otras plantas del mismo tipo, contenido revisado en el capítulo del Marco Teórico.

La Figura 5.5 presenta el esquema general del sistema de control para los heliostatos del campo, se aprecia que existen dos bloques fundamentales: el control central (amarillo) y el control local en cada heliostato (azul).

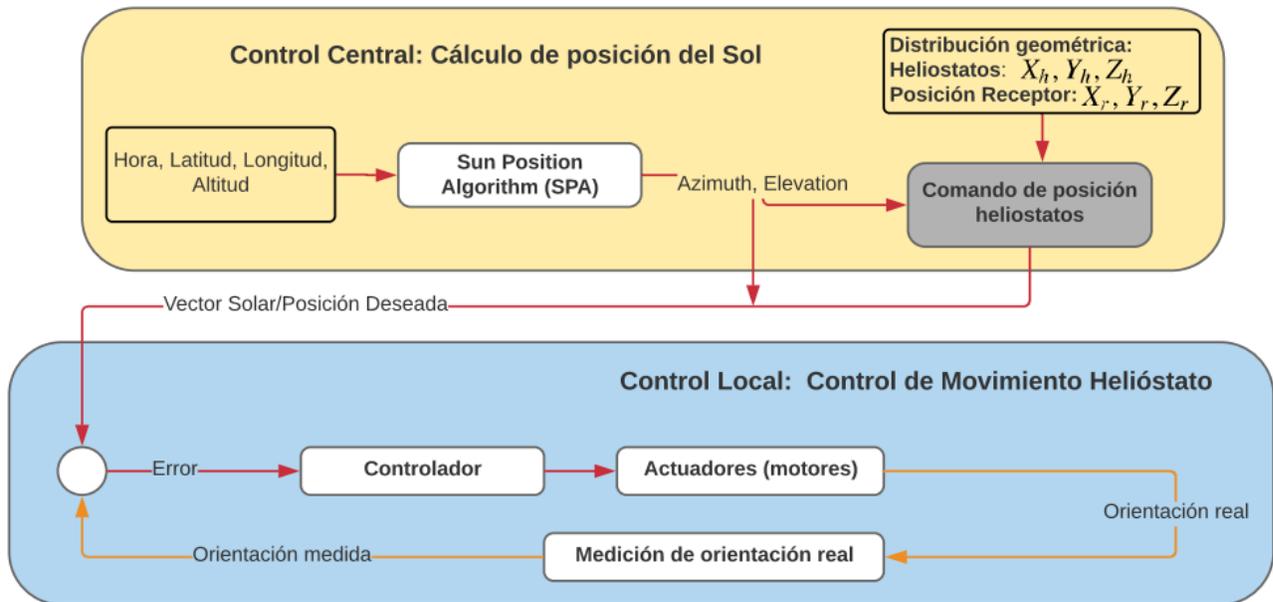


Figura 5.5: Esquema general de control de orientación de helióstatos.

La función del control central es calcular la posición del Sol utilizando el algoritmo de posición solar (SPA). Además, el bloque de color gris corresponde al sub-componente encargado de calcular la posición deseada de cada uno de los helióstato teniendo como información de entrada la posición del Sol y la ubicación de cada helióstato relativa a la torre, y utilizando el modelo matemático planteado en el capítulo anterior. Luego, esta información debe ser transmitida a cada uno de los helióstatos; en el esquema se destaca que tanto el vector solar como la posición deseada puede ser la información transmitida, en particular cual será la información a transmitir dependerá del diseño, capacidad y fiabilidad del sistema de comunicaciones (fuera del alcance de este trabajo de memoria), pero de todos modos se plantean dos opciones:

1. **Sólo transmitir posición solar:** Desde el punto de vista de control, esta alternativa requiere que el cálculo de la orientación a adoptar sea realizada de forma local en cada helióstato. El principal contrapíe corresponde a que la optimización no lineal que debe realizarse al utilizar el modelo de error en modo de seguimiento tiene que efectuarse en el microcontrolador de cada helióstato. No obstante, corresponde a la opción que menos sobrecarga al sistema de comunicaciones, puesto que es el mismo dato que se transmite a cada uno de los helióstatos del campo.
2. **Transmitir las posiciones que deben adoptar todos los helióstatos:** En esta opción el control central calcula las posiciones de todos los helióstatos y las trasmite a cada uno de ellos; esto puede realizarse en tiempo real (*on-demand*) o también puede ser, por ejemplo, previo al amanecer, en donde cada helióstato guarda la totalidad de posiciones que deberá adoptar durante el día completo. Esta alternativa es la que más demanda y fiabilidad impone al sistema de comunicaciones debido a la alta cantidad de información a transmitir, la cual es proporcional a la cantidad de helióstatos del campo.

Adicionalmente, se debe destacar que este esquema no presenta otras funcionalidades del control central, como lo es coordinar la calibración de los helióstatos y realizar los cálculos

correspondientes para aquello, esto último significa estimar los errores geométricos de los helióstatos y transmitirlos para que estos puedan utilizarlos en el cálculo de sus posiciones de apunte (en caso de escoger la primera alternativa de comunicación de las mencionadas previamente).

En segunda instancia, se encuentra el control local, representado en color azul en el esquema de la Figura 5.5, el cual es exclusivo de cada helióstato. En el caso de que el control central transmita únicamente el vector solar, entonces es aquí donde se realiza el cálculo de la posición que debe adquirir el espejo del helióstato; además, es el encargado de controlar tal movimiento de forma precisa y eficiente (en términos de energía utilizada). En el mismo esquema, se muestra el cierre del lazo de control mediante una medición de la orientación real del helióstato, lo que se representa en un color distinto denotando que no es una característica definitiva del control local, en la sección 5.4 de este mismo capítulo se presentan las pruebas y conclusiones sobre las alternativas para cerrar el lazo de control.

A continuación se presentan los componentes fundamentales del control local, destacando en cada caso las razones de su elección y características específicas de cada uno.

5.3.1. Componentes del Control Local

■ Microcontrolador

Se utiliza un Arduino como microcontrolador debido a la facilidad de uso y reducido costo, en particular se hace uso de su variante Uno considerando que la cantidad de *Input/Output* que se necesitan en esta etapa inicial de pruebas no es elevada, además de que el poder de procesamiento y memoria que este posee es suficiente para la aplicación. De todas formas, no se descarta el uso a futuro de un Arduino Mega, cuyo microcontrolador (ATmega2560) tiene mejores características que el del Arduino UNO (ATmega328P).



Figura 5.6: Arduino Uno R3. Fuente: Arduino

■ Motores

Los motores utilizados son de tipo paso a paso, marca Pololu ¹; este tipo de motores presenta grandes ventajas en relación a su funcionamiento en lazo abierto, ya que su principal característica que poseen es la capacidad de que el eje adopte cierta posición angular sin

¹<https://www.pololu.com/product/1475>

la necesidad de retroalimentación de posición. Por otra parte, las velocidades de estos motores concuerdan con que el prototipo 1.0 fue concebido sin reducción mecánica (el eje del motor va conectado directamente al eje del engranaje, ver Figura 5.3), y por tanto requiere un motor de no muy elevadas RPM. Del mismo modo, el motor paso a paso también juega el rol de mantener el marco del espejo en una posición fija al mantenerse energizado, lo que es ideal considerando la inexistencia de un freno de tipo mecánico en el prototipo 1.0.

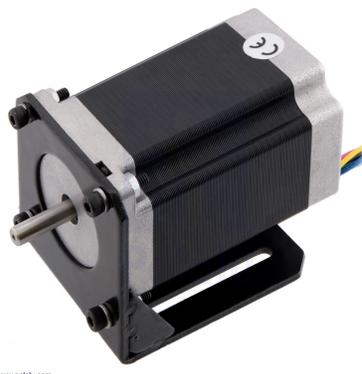


Figura 5.7: Motores paso a paso utilizados. Fuente: Pololu, *Robotics and Electronics*.

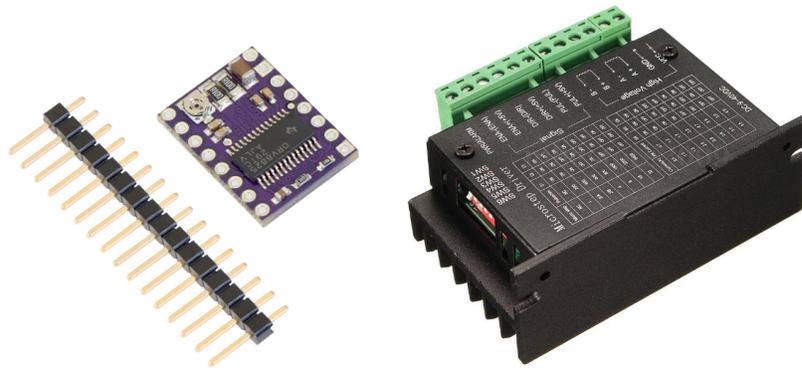
■ Accionamientos de motores

Con respecto al control de estos motores, el mismo fabricante ofrece una serie de *drivers* para controlarlos (Figura 5.8(a))², los cuales tienen un bajo costo, pero que presentan el problema de alcanzar elevadas temperaturas al ser utilizados con este motor debido al consumo de 2 [A] por fase. Por esta razón, se utiliza un *driver* más robusto constructivamente, en el sentido de que es más capaz de disipar calor (Figura 5.8(b)). No obstante, no se descarta el uso del controlador DRV8825 con motivo de ahorro de costos para el diseño final, esto considerando que en tal instancia sólo será necesario encender los motores al momento de ejecutar movimiento gracias a la existencia de un freno de tipo mecánico como el que posee el prototipo 2.0.

Se debe mencionar también que ambos *drivers* presentan la posibilidad de realizar *microstepping*, lo que permite disminuir la resolución angular de movimiento más allá de los $1,8[^\circ/\text{paso}]$, lo que significa una mejora en la “suavidad” de las transiciones entre las distintas posiciones, a costa de una disminución del torque (normalmente se habla de un 70 % del torque nominal). En el caso del *driver* DRV8825, la configuración del *microstepping* se puede realizar mediante pines digitales, lo que significa que se puede controlar de forma dinámica directamente por el microcontrolador; por otro lado, en el segundo *driver* presentado, la configuración del *microstepping* se realiza mediante interruptores ubicado a un costado que deben ser activados manualmente.

Un diagrama de conexiones simplificado se presenta en la Figura 5.9, en donde la alimentación (V_{cc}) se realiza utilizando 2 baterías de plomo-ácido (12 V y 7.2 Ah cada una)

²<https://www.pololu.com/product/2133>



(a) Driver Pololu DRV8825. (b) Driver normalmente utilizado para máquinas CNC *DIY* [33].

Figura 5.8: Controladores de motores paso a paso.

conectadas en serie para lograr aproximadamente 24 V, valor que se encuentra en el rango de 9 - 40 VDC que acepta este controlador.

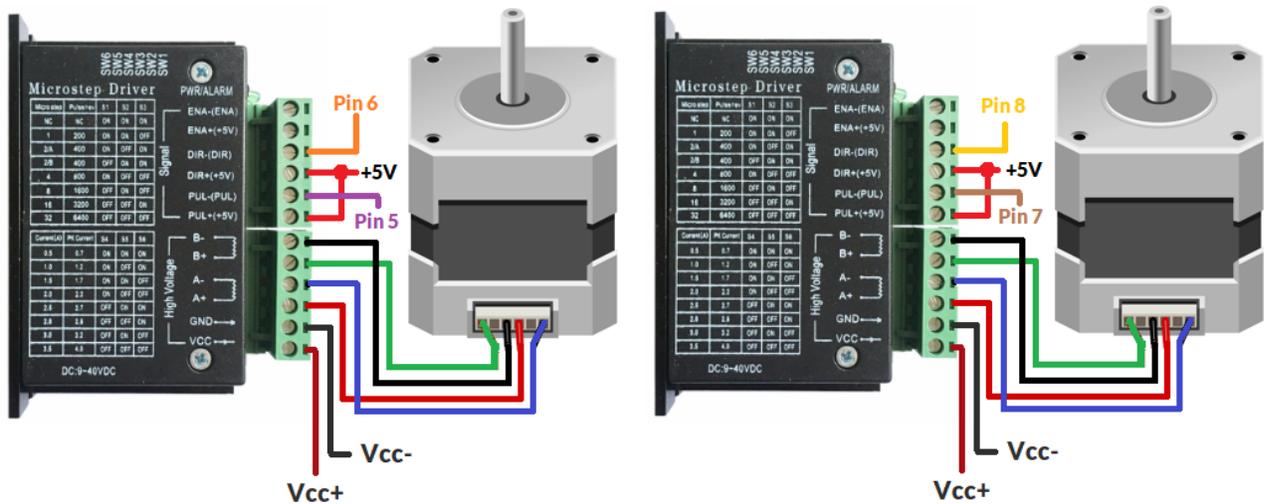


Figura 5.9: Esquema de conexión de motores paso a paso .

- **Finales de carrera**

Los finales de carrera son un tipo de sensor electrónico que básicamente funciona como un interruptor, que cuando es presionado cambia su estado de abierto a cerrado o viceversa, lo que es puede ser fácilmente interpretado por el microcontrolador. La función que cumplen estos dispositivos en los helióstatos corresponde a la de brindar las referencias de ángulos en ambos ejes; al momento de iniciar/reiniciar el helióstato, se comanda que se mueva completamente hacia la dirección donde se ubican los finales de carrera, cuando existe contacto se detiene el movimiento y se actualizan los ángulos de posición del helióstato por los valores conocidos de esa posición en particular.



Figura 5.10: Final de carrera.

■ Adicionales

Además de los elementos mencionados, otros que son necesarios pero no precisan de una descripción exhaustiva corresponden a:

- Módulo Lector SD (más memoria SD): Útil para guardar datos importantes, como la lista de posiciones a adoptar transmitidas desde el control central. Se debe destacar que la memoria interna del microcontrolador es insuficiente para aquello y es lo que motiva el uso de una memoria externa.
- Relés: Se utilizan para encender/apagar los motores.
- Módulo de comunicaciones: Fundamental para las comunicaciones con el control central, entre las alternativas posible se encuentran módulos de radiofrecuencia, *ZigBee*, *LoRa*, entre otros.

Por último, la Figura 5.11 muestra una fotografía del prototipo construido indicando la ubicación de algunos de los componentes previamente descritos.

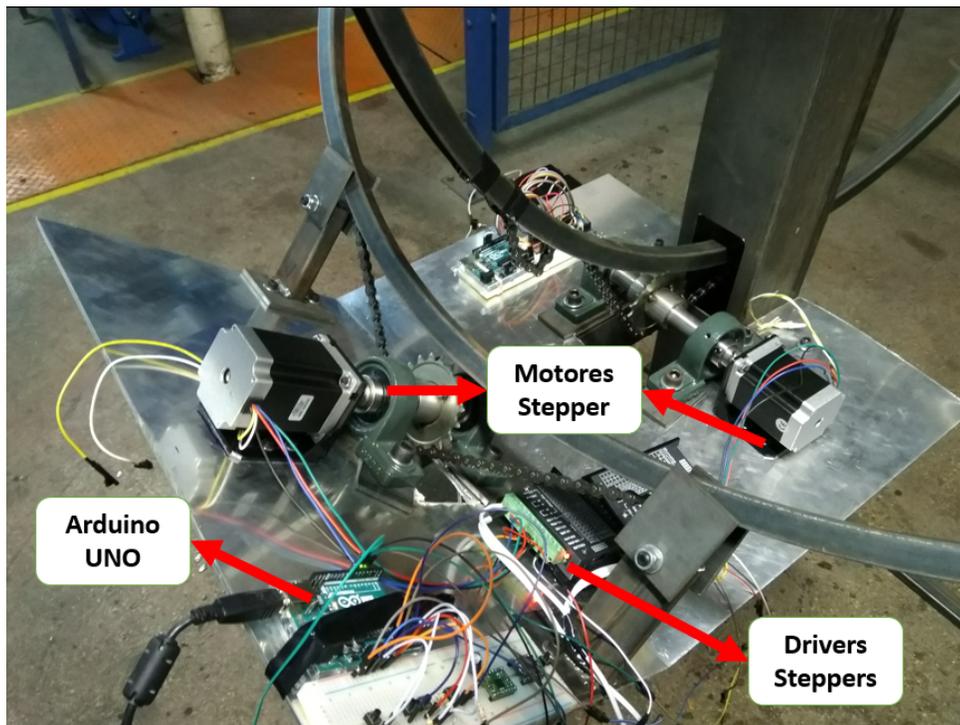


Figura 5.11: Prototipo y sus componentes eléctricos.

5.3.2. Programación

■ Algoritmo solar

Como ya se describió en el capítulo del marco teórico, el algoritmo de posición solar es de suma importancia en el esquema de control en lazo abierto. De los algoritmos revisados, se escogió Sun Position Algorithm (SPA) de NREL por ser el más preciso y más utilizado. En Internet se encuentra este algoritmo implementado en distintos lenguajes de programación (C ³, Python ⁴ y Matlab ⁵. De momento se ha adaptado su versión en lenguaje C.

Las variables que se deben definir para obtener resultados precisos utilizando este algoritmo corresponden a las siguientes:

- Tiempo: Tiempo con nivel de detalle de: (Año, Mes, Día, Hora, Minuto y Segundo). Además, se debe especificar la zona horaria (para Chile corresponde a GMT -3). Por el momento, la hora se obtiene directamente desde la hora computador, por lo que es vital que este bien coordinada con la hora universal.
- Ubicación: Lugar donde se desea calcular la posición del Sol, en latitud y longitud geográficas. Las coordenadas del lugar de pruebas son: Longitud = -70.674° , Latitud = -33.457° .
- Correcciones debido a irregularidades de la rotación terrestre: Corresponden a dos datos denominados como UT1 y ΔT según la documentación del algoritmo de posición solar. Estos valores provienen de observaciones y se obtienen de la página Web ⁶.
- Datos atmosféricos: Los datos atmosféricos corresponde a la presión promedio anual, temperatura promedio anual y refracción atmosférica del lugar. Para el caso de Santiago, los valores utilizados son respectivamente: 1000 mbar, 14.6° C y 0.5667 (los dos primeros datos se obtuvieron en ⁷, mientras que el último es recomendado como valor típico por NREL).

Al configurar el algoritmo con los parámetros anteriores, se obtiene como resultado los ángulos de azimut e incidencia del Sol para cada segundo, como los presentados en la Figura 5.12. Por el momento, se utilizaron los datos de posición del sitio de pruebas ubicado en el taller mecánico de la Universidad de Chile.

■ Control de Motores

El control de los motores utilizando cualquiera de los *drivers* mencionados previamente es bastante directo, pues requiere dos señales digitales, una asociadas a la instrucción de dar un paso, y el segundo asociado a la dirección de giro. Un esquema detallado de conexiones fue presentado en la Figura 5.9.

Lo más importante a nivel de programación corresponde a mantener actualizadas las variables que mantienen la cantidad de pasos y vueltas que ha dado cada motor. Del

³<https://midcdmz.nrel.gov/spa/>

⁴<https://pvlib-python.readthedocs.io/en/latest/generated/pvlib.spa.html>

⁵Disponible en File Exchange: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>

⁶<http://maia.usno.navy.mil/ser7/ser7.dat>

⁷<https://es.climate-data.org/americas-del-sur/chile/region-metropolitana-de-santiago/santiago-938/>

```

C:\Users\Nico\Desktop\SPA.exe
Azimuth: 275.568706 degrees
Incidence: 76.119918 degrees
Now: 2018-9-30 18:34:17
Azimuth: 275.566322 degrees
Incidence: 76.123360 degrees
Now: 2018-9-30 18:34:18
Azimuth: 275.563937 degrees
Incidence: 76.126802 degrees
Now: 2018-9-30 18:34:19
Azimuth: 275.561553 degrees
Incidence: 76.130245 degrees
Now: 2018-9-30 18:34:20
Azimuth: 275.559169 degrees
Incidence: 76.133687 degrees

```

Figura 5.12: Ejecución del algoritmo de posición Solar.

mismo modo, también es fundamental tener en consideración que el movimiento de los motores es discreto. La conversión entre los pasos dados y el la posición angular real (θ) *pitch* o *roll* viene dada por la siguiente ecuación:

$$\theta = k \cdot pasos \tag{5.3.1}$$

En donde la constante k debe calibrarse y es distinta para el movimiento en *pitch* y en *roll* y hace relación a la cantidad de movimiento angular por cada paso del motor. Si bien en diseño todos los helióstatos del campo serán iguales, a nivel constructivo pueden existir pequeñas diferencias, lo que implica que cada helióstato tendrá sus propias constantes de calibración. La forma de estimarlas corresponde a utilizar un nivel de burbuja u inclinómetro de precisión para mover el helióstato un cierto arco angular conocido, luego, como se conocen los pasos dados por el motor (junto con el supuesto de que no existe pérdida de pasos), la constante k será igual al cociente entre estos últimos dos valores. Lo ideal corresponde a repetir este ejercicio varias veces y tomar un promedio de la cantidad de pasos dados.

En el caso del prototipo 1.0, las constantes de calibración calculadas para el movimiento *pitch* (k_p) y *roll* (k_r):

$$k_{p1} = 0,08 \text{ [}^\circ/\text{step]} \qquad k_{r1} = 0,0\bar{6} \text{ [}^\circ/\text{step]} \tag{5.3.2}$$

Mientras que en el prototipo 2.0 fueron iguales a (valores truncados a 5 decimales con respecto a los originales):

$$k_{r2} = 0,00246 \text{ [}^\circ/\text{step]} \qquad k_{p2} = 0,00702 \text{ [}^\circ/\text{step]} \tag{5.3.3}$$

De lo anterior se desprende que la precisión de movimiento del segundo prototipo es mucho mayor que la del primero gracias a los reductores mecánicos que presenta, y además, supera con creces la precisión de movimiento propuesta como requerimiento inicial igual a 0.1° . En base a los presentado, es posible orientar el helióstato en cualquier posición si es que las referencias angulares son correctas. Estas se obtienen gracias a los finales de carrera, lo cual se explica en mayor detalle en el siguiente apartado.

■ Diagrama de estados

La Figura 5.13 representa de forma general los modos y estados de funcionamiento dentro del control local. A continuación se describe cada uno de ellos.

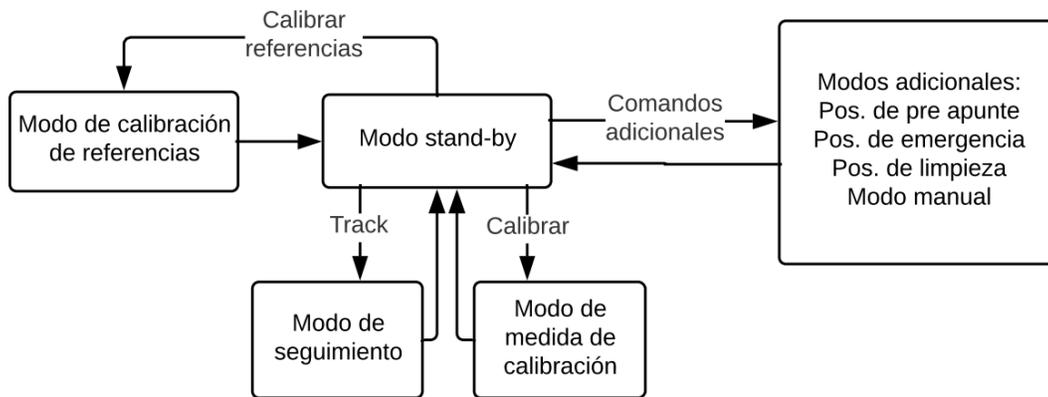


Figura 5.13: Diagrama de estados/modos de funcionamiento.

1. **Modo stand-by:** Modo de espera y de recepción de comandos.
2. **Modo de calibración de referencias:** Corresponde a la metodología que permite fijar las referencias angulares, esto se lleva a cabo comandando movimiento hacia la dirección donde se ubica el final de carrera tanto en *pitch* y en *roll*. Una vez exista contacto, se fija la referencia por la conocida dada por el final de carrera. Lo ideal sería que previo a cada día de operación el helióstato entre en modo de calibración de referencias.
3. **Modo de seguimiento:** Permite apuntar al receptor de la torre, una vez activado, se calcula la posición a adoptar con el modelo de error y es comandada a los motores.
4. **Modo de medida de calibración:** Idéntica a la anterior, sólo que el apunte no es hacia el receptor, si no que hacia la superficie objetivo de calibración.
5. **Posición de pre-apunte:** También idéntica a la anterior, pero el apunte es sobre la torre, de forma que el helióstato pueda entrar rápidamente en operación cuando sea requerido.
6. **Posición de emergencia:** Corresponde a la posición a adoptar cuando el helióstato no está en operación (durante la noche) o en caso de fuerte vientos.
7. **Posición de limpieza:** Útil para que el helióstato adopte una posición que permita a un persona de estatura promedio limpiar la superficie del espejo.
8. **Modo manual:** Permite orientar el helióstato a cualquier posición deseada. En el siguiente apartado se presenta una interfaz gráfica implementada útil para el funcionamiento del helióstato en este modo.

Durante la operación normal del helióstato, lo típico corresponderá a operar en el modo de seguimiento para corregir la posición y apuntar hacia la torre. En particular, este tiempo de actualización de posición corresponde a un parámetro importante a determinar pues si no se actualiza la posición del helióstato este comienza a acumular error de apunte motivo de la traslación del Sol en el cielo. En el siguiente capítulo se presentan simulaciones para estimar cual es tiempo de actualización óptimo.

■ Interfaz gráfica

Para facilitar las pruebas a realizar con el prototipo, se implementaron diferentes formas de controlar los motores. La primera consiste en una serie de botones de tipo pulsador que permiten que los motores den uno o más pasos (configurable) en una u otra dirección; la segunda opción corresponde a una interfaz gráfica que se ejecuta desde un computador, la cual se presenta en la Figura 5.14.

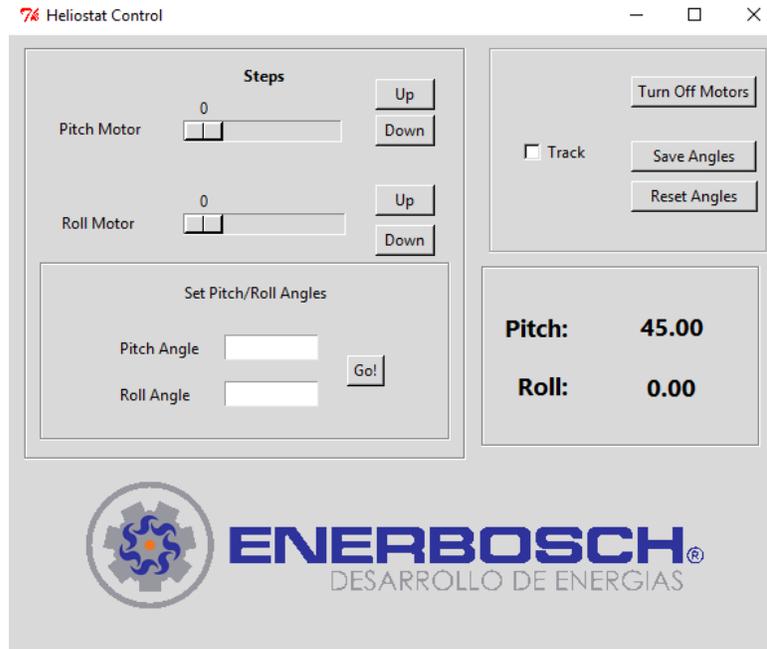


Figura 5.14: Interfaz para controlar el movimiento del heliostato.

En la parte superior izquierda de la interfaz, se ubican las opciones que permiten mover de forma manual cada uno de los motores, aquí se puede ajustar el número de pasos que dará cada motor cada vez que se presionen los botones *Up* o *Down*. Directamente bajo este cuadro se encuentra la opción denominada *Set Pitch/Roll Angles*, la cual permite enviar como comando los ángulos *Pitch/Roll* que se deseen, los cuales se actualizan y muestran en el cuadro ubicado a la derecha. Finalmente, en la parte superior derecha de la interfaz, se encuentra la opción de *Track* que permite activar o desactivar el modo de seguimiento, *Turn Off Motors* permite apagar los motores (a través de relés) y los botones *Save Angles* (guarda los ángulos actuales en la EEPROM del Arduino) y *Reset Angles* (reinicia a los ángulos por defecto, útil durante la recalibración del heliostato).

5.4. *Feedback* de orientación

En este apartado se presentan las opciones que se probaron para cerrar el lazo de control de orientación en busca de aumentar la fiabilidad del sistema de movimiento. En base a lo visto durante la revisión bibliográfica, las opciones a considerar son dos, uso de *encoders* o uso de sensores de inercia, a continuación se presentan las pruebas realizadas y las conclusiones obtenidas.

5.4.1. Encoders

La instalación de *encoders* rotatorios se vio motivada por la problemática inicial (que luego pudo ser solucionada) respecto a la pérdida de pasos de los motores paso a paso. Se instaló un *encoder* de tipo incremental directamente conectado al eje del motor que proporciona el movimiento en Pitch (ver Figura 5.3). Se hicieron pruebas con dos *encoder* distintos, uno de 1024 pulsos por revolución (PPR) marca Yumo [33], y otro más robusto en términos constructivos (de metal y no de plástico como el primero) de 360 PPR y de marca Autonics [35].

La programación de estos se realiza utilizando interrupciones, lo que es imperativo en los de tipo incremental debido al principio de funcionamiento de estos. Por otro lado, como la medición del *encoder* es de la rotación del eje del motor, se debe realizar la conversión entre el ángulo real medido por este dispositivo y el ángulo *pitch* real del heliostato, esto se logra calibrar de forma relativamente fácil haciendo uso de un nivel y observando la distancia angular medida por el *encoder* entre los 0° y 90° del heliostato. Muy similar a la calibración del movimiento de los motores utilizando (5.3.1).

Al realizar pruebas con los estos dispositivos, el principal resultado fue que las vibraciones (generadas por consecuencia del movimiento de los motores) afectaban de sobremanera las mediciones obtenidas, durante un movimiento en *pitch* desde los 0.0° a 90.0° el error acumulado alcanzaba 1.0° o 2.0° en el peor de los casos; siendo mayor el efecto e imprecisión obtenida para el *encoder* de Yumo 1024 pulsos por revolución. Estos resultados directamente descartaron la posibilidad del uso de *encoders* de tipo incremental como *feedback de orientación*. La recomendación final es que en caso de requerir utilizar *encoders*, estos deben ser de tipo absoluto. Sin embargo, esto entra en conflicto con el objetivo de disminución de precios del proyecto Solarbosch, puesto que el alto costo de este tipo de *encoders* es contradictorio con tal premisa.

Por último, se debe mencionar que el desempeño de los dos *encoders* utilizados no presentaba acumulación de error cuando el movimiento del marco del heliostato era realizado delicadamente de forma manual, y por tanto las mediciones obtenidas con este de esta manera fueron utilizadas como *ground truth* durante las pruebas realizadas utilizando los sensores de inercia.

5.4.2. IMUs

La segunda opción barajada como medida de retroalimentación de la orientación de la superficie reflectora del heliostato fue la utilización de sensores inerciales (IMUs), pues a través de los acelerómetros y giroscopios que contienen estos integrados es posible determinar la orientación en términos de los ángulos *pitch* y *roll*. Se programaron para tal propósito los IMUs con el chip MPU 6050 [36].

Para que estos dispositivos funcionen de forma óptima precisan de calibración, esta se lleva a cabo al momento de la inicialización del código, y debe realizarse con los IMUs quietos idealmente. Existen formas más avanzadas de calibrar estos dispositivos pero que requieren realizar mediciones con los acelerómetros en distintas posiciones del sensor, y también, medida del giroscopio con el IMU rotando a velocidades conocidas con gran exactitud, un ejemplo del sistema como el descrito se presenta en [37].

Para las pruebas, cuatro IMUs funcionan en conjunto, y se toma el promedio simple de sus medidas para estimar la medición de los ángulos *pitch/roll*. La forma de validar las medidas se ha llevado a cabo haciendo uso de la medida angular que devuelve el *encoder*, tomando tal valor como *ground truth*. En la Figuras 5.15 se presenta el error de medición obtenido para dos mediciones distintas utilizando cuatro IMUs, mientras que las mediciones de la Figura 5.16 fueron obtenidas utilizando dos de los cuatros sensores. En ambos casos se presenta el error de medición cuando el ángulo *pitch* del heliostato transita entre los valores 0° y 90° . Lo relevante de observar corresponde a la similitud entre las curvas de las dos mediciones para cada uno de los IMU, pues indica que si bien existe un error de medición en el ángulo medido, es en general el mismo para una determinada posición, y por tanto puede corregirse si se conocen las curvas mostradas en las figuras, que son distintas para cada uno de los IMUs.

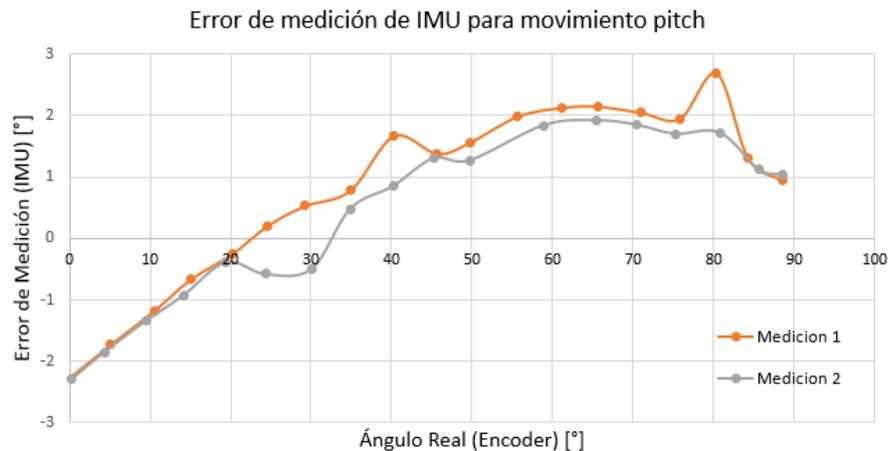


Figura 5.15: Error en las mediciones de un IMU individual para posiciones pitch entre 0° y 90° .

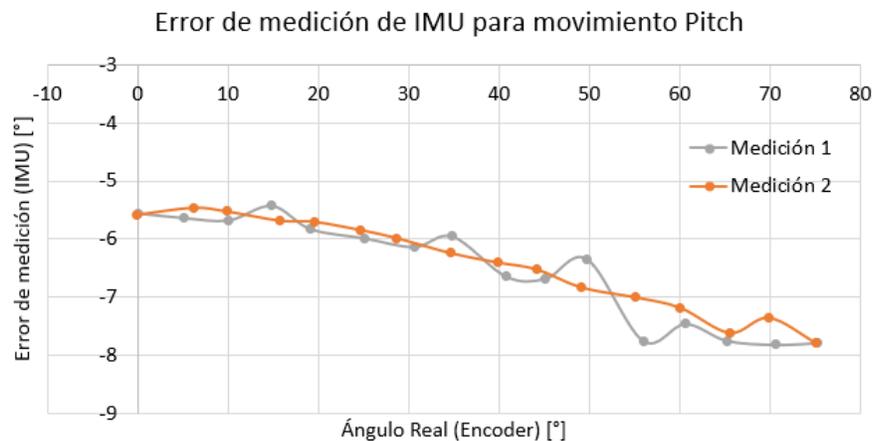


Figura 5.16: Error en las mediciones de un IMU distinto al anterior para posiciones pitch entre 0° y 90° .

Si bien, se podrían calibrar las mediciones de los IMUs repitiendo el ejercicio realizado una suficiente cantidad de veces y tomando un promedio de las mediciones, la precisión de tal proceso queda en duda, debido a la variabilidad de las mediciones, que si bien es pequeña, no es menor

a la requerida (de 0.1°), y también por la dependencia de las mediciones con la temperatura ([32]) a causa de las características constructivas de estos sensores.

Debido a que solamente se instaló un *encoder* en el motor asociado al movimiento *pitch*, no se pudieron realizar pruebas como las presentadas acerca de la eficacia de los IMUs midiendo el movimiento *roll*. No obstante, se observó que la medición del ángulos *roll* de los IMUs depende fuertemente de la posición *pitch* en que se encuentre, siendo esto otro de los motivos de peso para descartar de forma definitiva el uso de estos sensores en el diseño final del sistema de control de los helióstatos.

5.5. Metodología de calibración

En base a la revisión bibliográfica realizada, la metodología de calibración implementada y adaptada para el caso particular del diseño y prototipo de helióstato de Solarbosch corresponde a la del uso de una superficie objetivo para medir errores de apunte utilizando un sistema de visión computacional. La principal razón de esta elección corresponde a que es una metodología bastante estudiada, cuya eficacia ya ha sido probada en varias centrales de concentración, junto con que es de muy bajo costo debido a que solamente requiere la instalación de la superficie objetivo y una cámara adecuada para detectar los errores de apunte.

Además del modelo de error y su funcionalidad de calibración descritos durante el capítulo anterior, el único aspecto extra necesario para la implementación de esta metodología corresponde al algoritmo de procesamiento de imágenes. A continuación se presenta la implementación de este.

5.5.1. Procesamiento de imágenes

En este apartado se presenta a grandes rasgos el algoritmo de visión computacional implementado, haciendo especial énfasis en las particularidades y detalles que se deben considerar cuando se adapte y refine el algoritmo definitivo que se utilizará en la planta a construir.

De forma resumida, el algoritmo presenta 4 etapas fundamentales, las que se detallan a continuación:

1. Pre-procesamiento

En primer lugar se debe corregir la perspectiva de la fotografía tomada, de forma que la imagen resultado sea la superficie objetivo vista perfectamente de frente, lo cual es necesario para los cálculos posteriores relativos a la medición de distancias. Esto se realiza mediante una transformación homográfica, que requiere las coordenadas de las cuatro esquinas del objetivo de calibración. La alternativa simple para detectar estos puntos corresponde a que la cámara siempre este fija, de forma que las coordenadas no varíen de fotografía en fotografía, aunque también existe la posibilidad de utilizar métodos más complejos de detección de esquinas. Con respecto al algoritmo implementado, estos puntos se designan de forma manual puesto que las imágenes fueron tomadas de distintos ángulos.

Durante esta misma etapa, también se debe redimensionar la imagen para que siempre exista la misma relación entre las distancias de la imagen (píxeles) y las reales (metros).

Finalmente, el último paso de la etapa de pre-procesamiento corresponde a convertir la imagen tomada a escala de grises.

2. Aplicación de *Threshold* adaptativo

Al utilizar la imagen transformada a escala de grises, la reflexión del espejo del helióstato en la superficie objetivo se verá de un color blanco, con una intensidad de brillo superior al resto de los píxeles de la imagen, esta característica es la que es aprovechada para detectar las coordenadas de apunte.

Una de las opciones para detectar los píxeles más intensos corresponde a seleccionar los píxeles cuyo valor sea mayores a un valor determinado (fijo); no obstante, lo anterior es poco robusto y muy dependiente de las características de luminosidad y contraste de la imagen, que son resultado de las condiciones con las que fue tomada la fotografía, como nivel de nubosidad, hora del día, estación del año, nivel de contaminación, entre otras. En base a esto, la mejor opción corresponde aplicar un *threshold* adaptativo que sea capaz de considerar las variaciones descritas.

Se comienza calculando el histograma de la imagen (representa la cantidad de píxeles con cierto valor), la Figura 5.17 presenta el histograma de una fotografía preprocesada, se aprecia la existencia de 3 puntos notables en este, el número 1 corresponde al borde oscuro del *target*; el número 2 representa prácticamente la totalidad de la superficie, al ser de una tonalidad relativamente uniforme se ve en histograma como un máximo de píxeles de la misma intensidad; y por último, el número 3 representa los píxeles más intensos del centro.

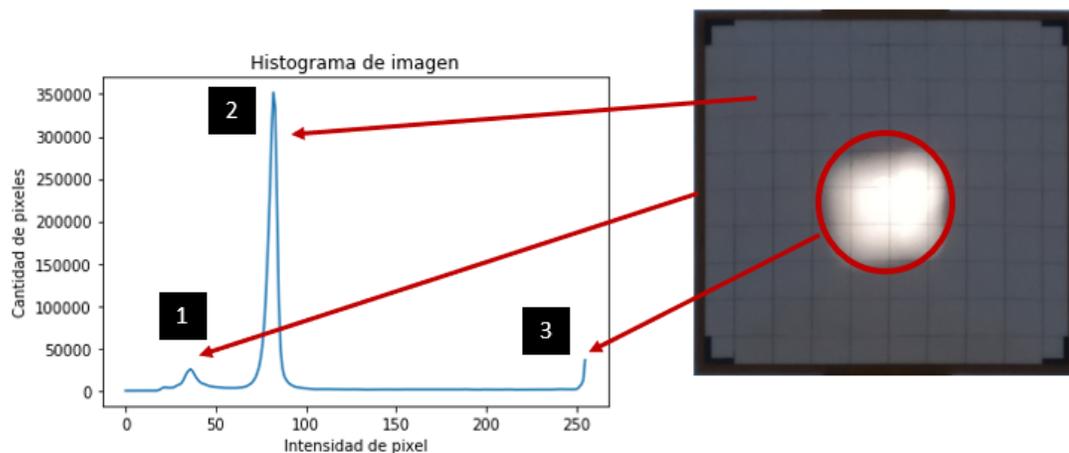


Figura 5.17: Puntos notables de histograma aplicado en las imágenes de prueba.

La elección del *threshold* debe ser siempre al menos mayor que el segundo punto notable mencionado, pues de lo contrario prácticamente toda la imagen sería detectada. Por otro lado, se podría pensar que se debiese fijar el *threshold* un poco bajo el valor máximo (255); sin embargo, esto no es correcto pues dependiendo de la intensidad de brillo el punto 3 tendrá una distinta ubicación en el histograma. Lo anterior se observa con mayor claridad en los dos ejemplos de la Figura 5.18, en donde el punto 3 se ubica más hacia la derecha

en el histograma para la imagen superior debido a la mayor intensidad del reflejo del espejo.

En base a lo recién establecido, la mejor estrategia es fijar el *threshold* un poco sobre el punto 2, que puede ser obtenido calculando la moda del histograma. Se debe calibrar la magnitud del *threshold* sobre este valor en base a fotografías de prueba. Para el caso de las utilizadas durante esta implementación, un valor igual a 20 funciona bien para el total de 50 imágenes de prueba. Dos resultados ejemplo se presentan en la Figura 5.18, en donde el *threshold* aplicado en cada caso se representa por las líneas verticales de color rojo. En ambos casos la detección de la zona de importancia es exitosa.

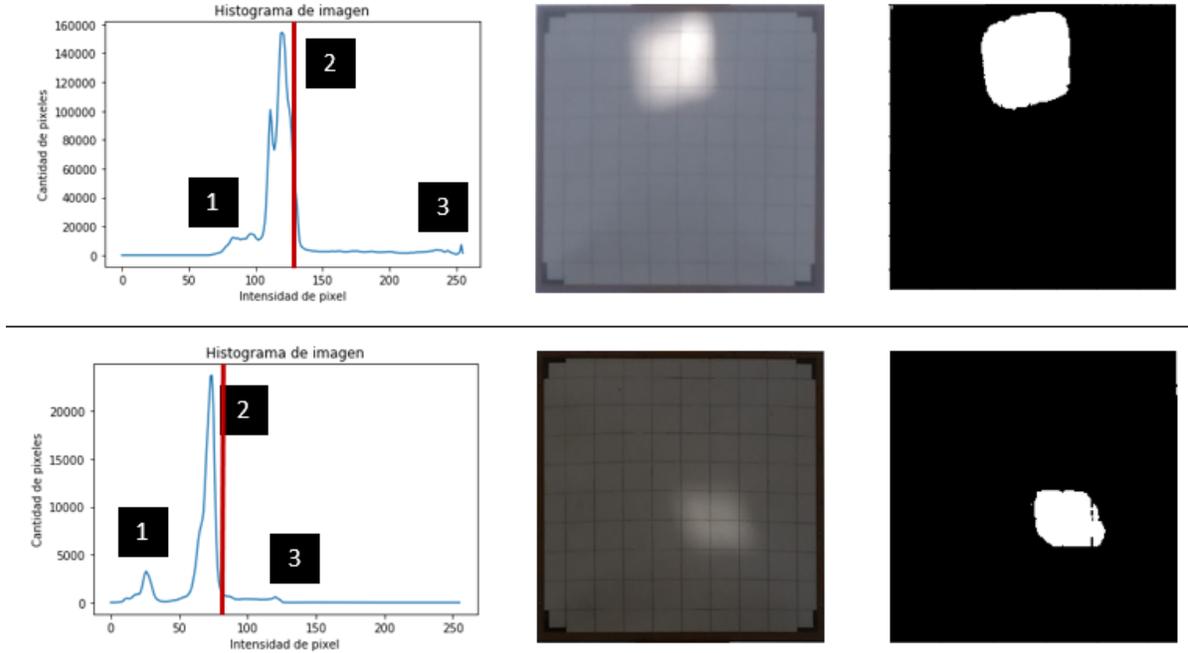


Figura 5.18: Histogramas de dos imágenes con diferentes características de luminosidad y contraste.

3. Detección de centroide

Finalmente, con el filtro de la parte anterior aplicado, se deben obtener las coordenadas de apunte, que corresponde al centroide de la mancha obtenida en la etapa anterior. Este se calcula como una analogía del centro de masa de los píxeles blancos de la imagen. El cálculo de las coordenadas de apunte (X_a, Y_a) con origen del sistema de coordenadas en el centro, expresado en metros se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$X_a = \frac{D_x}{L_x} \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N P_{i_x} \right) - \frac{D_x}{2} \quad (5.5.1)$$

$$Y_a = -\frac{D_y}{L_y} \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N P_{i_y} \right) + \frac{D_y}{2}, \quad (5.5.2)$$

en donde:

- D_x, D_y : Longitudes de la superficie de calibración (ancho y alto respectivamente) en metros.
- L_x, L_y : Longitudes de la imagen (en píxeles) luego de la etapa de preprocesamiento.
- P_i : i -ésimo píxel detectado como radiación reflejada, cuyas coordenadas corresponden a: (P_{i_x}, P_{i_y})
- N : Cantidad de píxeles detectados como radiación reflejada.

A modo de conclusión, las Figuras 5.19 y 5.20 presentan los resultados de la metodología implementada para dos imágenes con distintas características.

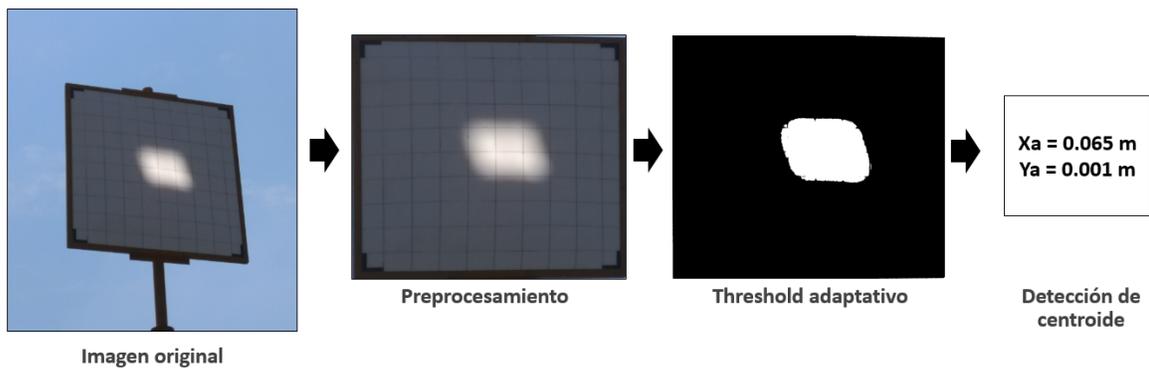


Figura 5.19: Aplicación de la metodología de procesamiento de imágenes en una imagen ejemplo con una proyección nítida de la reflexión del espejo en el *target* de calibración.

En los resultados de la Figura 5.19, se aprecia que luego de la etapa de preprocesamiento la detección de la reflexión es efectiva, siendo el error de apunte obtenido por el algoritmo de 6.5 centímetros hacia la derecha, y prácticamente cero error en el eje vertical, lo cual puede ser verificado visualmente en la imagen imagen preprocesada (las líneas dibujadas en el objetivo de calibración están separadas entre si por 10 cm).

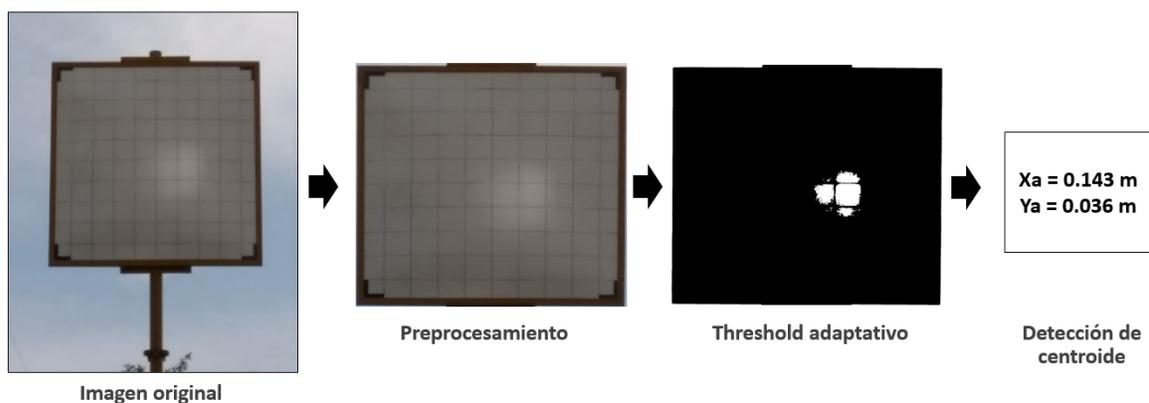


Figura 5.20: Aplicación de la metodología de procesamiento de imágenes en una imagen ejemplo con una proyección borrosa de la reflexión del espejo en el *target* de calibración.

En el caso de los resultados de la Figura 5.20, el reflejo en el *target* de calibración es mucho más tenue, no obstante, la detección del centroide se realiza de todas formas bastante efectivamente.

A modo de cierre de esta sección, se debe mencionar que debido la forma geométrica de la reflexión en la superficie de calibración, que a veces puede ser difusa y/o poco homogénea, junto con sensibilidades propias de la implementación de este algoritmo, implican que puede existir un error en la determinación de la coordenadas de apunte con respecto a las coordenadas reales, y que será clave durante el proceso de calibración.

6. Resultados

En busca de validar el sistema de control y calibración implementado se realizaron distintas simulaciones para estudiar la eficacia de la metodología de calibración bajo diferentes escenarios, además, se realizaron pruebas en terreno utilizando los helióstatos prototipo construidos.

La extensión del campo de helióstatos a considerar para las simulaciones consideradas se basa en la propuesta de la distribución espacial de los helióstatos dada por Solarbosch, y se presenta en la Figura 6.1.

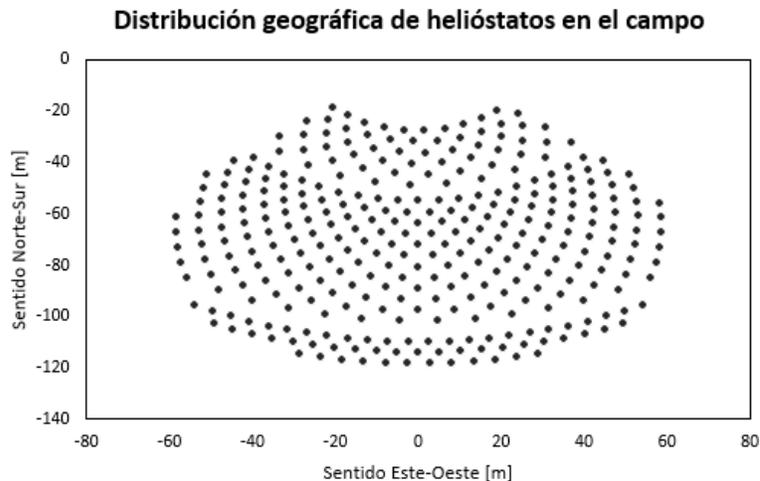


Figura 6.1: Distribución geográfica de los helióstatos que tendrá la planta de Solarbosch.

6.1. Simulaciones

6.1.1. Calibración

En primer lugar, se estudió la efectividad de la metodología de calibración planteada considerando un helióstato en el centro del campo de helióstatos, es decir, a 60 metros directamente al sur de la torre ($X = -60$ metros, $Y = 0$ metros).

Como el error de calibración depende de los errores geométricos presentes, cuya combinación puede ser muy variada, se considera que estos tienen una distribución normal, todos con esperanza igual a cero, y con las desviaciones estándar que se presentan en la Tabla 1. Del mismo modo, otro supuesto importante corresponde a que el error en la determinación del centroide por parte del sistema de visión computacional también presenta una distribución normal bidimensional, cuya desviación estándar es un parámetro de cambia en las simulaciones.

b_p [°]	b_r [°]	k_r	Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]	ϵ_{pt_x} [°]	ϵ_{pt_y} [°]	ϵ_α [°]
0.1	0.1	0.001	0.1	0.1	0.1	0.125	0.125	0.5

Tabla 1: Desviaciones estándar utilizadas para la generación de los set de errores.

A continuación se detalla la metodología para simular la calibración de un heliostato, la cual también se representa de forma esquemática en la Figura 6.2.

1. Generar *set* de errores geométricos, a través de distribuciones normales.
2. Utilizar el modelo de error para calcular las coordenadas de apunte de un set de posiciones solares a utilizar exclusivamente para calibración.
3. Añadir a los puntos anteriores un error asociado a la imprecisión del sistema de visión computacional en la determinación del centroide de la imagen reflejada. Se considera que la máxima desviación estándar de este error puede ser de 15 centímetros, lo que significa que en el peor de los casos el error será de aproximadamente 30 centímetros.
4. Estimar los errores utilizando el modelo de error en su modo de calibración.
5. Para cada posición solar de un set de evaluación anual, utilizar el modelo de error en su forma de seguimiento para calcular los ángulos de apunte calibrados, y con esto, calcular el error de apunte cometido.
6. Calcular el promedio de los errores cometidos de todo el set de posiciones solares de evaluación.

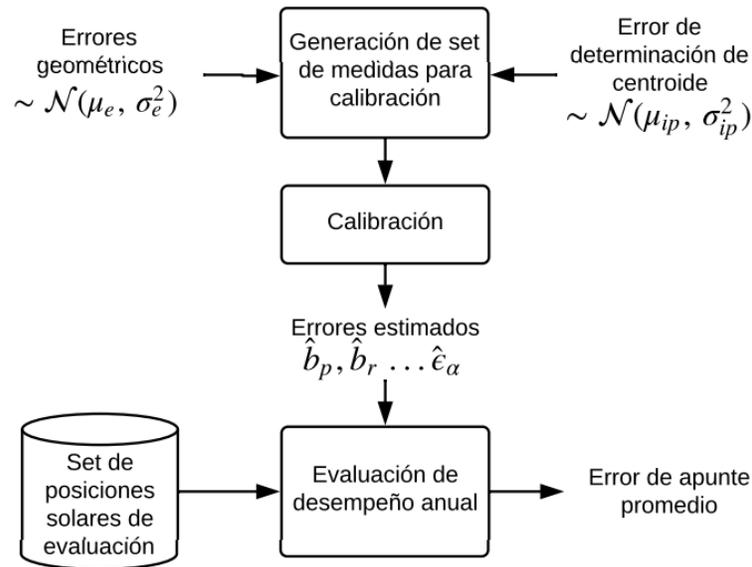
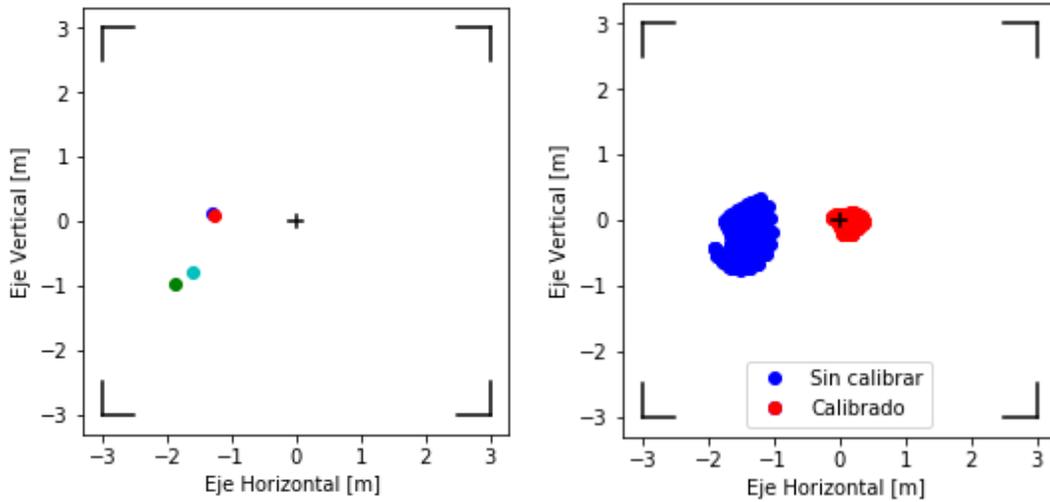


Figura 6.2: Representación gráfica de la metodología seguida para simular el desempeño de la metodología de calibración.

La premisa para medir el desempeño o eficacia del proceso de calibración corresponde a evaluar que tan preciso es el apunte del heliostato para todo un año de operación. En busca de minimizar los tiempo de simulación, el set de posiciones solares de evaluación está conformado por las posiciones solares entre las 08:00 y las 17:00 horas (separadas entre si en intervalos de 1 hora) de los primeros días de cada uno de los 12 meses del año. Esto significa que el total de vectores solares del set de evaluación es igual a 120.

Un ejemplo de simulación de calibración es presentado en la Figura 6.3, en donde a la izquierda se aprecia un conjunto de cuatro mediciones de error generadas a distintas horas del día 21 de Diciembre, destacar que estas medidas ya tienen agregado el error del sistema de visión computacional. Luego, se estiman los errores, se calibra el heliostato, y se evalúa el seguimiento anual de este, lo que se presenta en la Figura 6.3 (b). En color azul se presentan las coordenadas de apunte del heliostato sin calibrar (en particular se aprecia que las mediciones de calibración son un subconjunto de estos, pues se encuentran en la misma zona); mientras que en color rojo, se presentan las coordenadas de apunte con el heliostato calibrado, se destaca que estos están mucho más cercanos al centro, siendo el error promedio igual a 19 centímetros.



(a) Mediciones de error a utilizar para calibrar. (b) Desempeño anual de la calibración. Error sin calibración: 1.57 metros; Error con calibración: 0.19 metros.

Figura 6.3: Ejemplo de calibración para un heliostato al centro del campo para una cierta combinación de errores geométricos.

Si bien en el resultado del ejemplo se observa que la calibración logra reducir el error de 1.57 a 0.19 metros, este resultado es exclusivo y particular de la combinación de errores con la que se realizó. En busca de considerar las distintas combinaciones que se pueden dar, se debe proceder con el método de Monte Carlo, es decir, repetir el proceso descrito una cierta cantidad de veces, generando un *set* de errores distinto en cada caso, para finalmente tomar el promedio del total de iteraciones.

Por otro lado, es importante mencionar que dependiendo de la variedad de medidas de calibración que se tengan, la eficiencia de calibración será distinta, por ejemplo, muchas medidas tomadas dentro de un intervalo de 5 minutos no añaden demasiada información, como si lo harían dos medidas tomadas con 6 horas de separación entre ellas, esto por que en este último caso el Sol se encuentra en una posición completamente diferente, beneficiando la ganancia de información. En base a lo anterior, se consideraron las siguientes alternativas para generar los conjuntos de medidas de calibración:

- Días cercanos, misma hora.
- Diferentes horas durante un mismo día.

- Diferentes meses y horas.

En busca de estandarizar las simulaciones y las posibles combinaciones, se consideraron como horas de medición las 09:00, 12:00 y 16:00 horas. Del mismo modo, los días considerados corresponden a los solsticios de Verano (21 de Diciembre) e Invierno (21 de Junio), y el equinoccio de Otoño (21 de Marzo).

Los resultados obtenidos realizando simulaciones de Monte Carlo de 40 iteraciones para cada unas de las combinaciones de medidas de calibración y distinto error (desviación estándar) del sistema de visión computacional se presentan en la Figura 6.4.

		Error del sistema de visión computacional [m]			
		0	0.05	0.1	0.15
Días cercanos, misma hora					
19, 21, 23 de Diciembre	12 del día	0.061	3.395	2.812	6.323
Diferentes horas, mismo día					
21 de Diciembre	9, 12 y 16 horas	0.024	0.144	0.248	0.404
21 de Marzo	9, 12 y 16 horas	0.021	0.129	0.250	0.321
21 de Junio	9, 12 y 16 horas	0.022	0.315	0.483	0.534
Diferentes meses y horas					
21's de Diciembre y Marzo	9, 12 y 16 horas	0.006	0.131	0.264	0.330
21's de Diciembre y Junio	9, 12 y 16 horas	0.001	0.047	0.090	0.138
21's de Diciembre, Marzo y Junio	9, 12 y 16 horas	0.001	0.040	0.076	0.118

Figura 6.4: Error anual promedio de calibración (en metros) considerando distintas mediciones de calibración y distintos errores del sistema de visión computacional.

En primer lugar, se observa que si la desviación estándar del error del sistema de visión computacional es igual a cero, la calibración es en la práctica perfecta pues el error de desempeño anual es muy cercano a cero en todos los casos. No obstante, si es que esto ya no es cierto y este parámetro aumenta, se percibe que la eficiencia de la calibración comienza a disminuir para cada uno de los casos de medidas de calibración considerados.

En segundo lugar, se destaca que utilizar mediciones de calibración tomadas durante días muy cercanos y a la misma hora trae pésimos resultados, pues el error de calibración supera fácilmente los 3 metros (que supera las dimensiones típicas del receptor, que corresponde a un cuadrado de lado no mayor a 1,5 - 2 metros), e incluso llega a los 6 metros considerando el peor caso de desempeño del sistema de visión computacional. Sin embargo, la eficacia de la calibración mejora con tan sólo incluir mediciones a distintas horas de un mismo día, aunque nuevamente, si consideramos el peor de los casos, un error de calibración de más de 30 centímetros continúa siendo elevado. Finalmente, la adición de mediciones en diferentes meses implica una gran mejora, en particular si es que se añaden mediciones en Junio, de esta forma, la metodología de calibración puede permitir errores de apunte anuales cercanos a los 12 centímetros.

En base a estos resultados, la recomendación para la estrategia a seguir durante la calibración del campo de helióstatos es clara: se debe considerar la cantidad de mediciones más variada posible, y en lo posible agregar nuevas mediciones en la medida que estas puedan ir siendo tomadas.

6.1.2. Análisis de sensibilidad de errores

Con la intención de estudiar de forma cuantitativa el efecto que significa en la precisión de apunte cada uno de los errores geométricos considerados, se realiza un análisis de sensibilidad respecto a cada uno de ellos.

Cada uno de los errores es asignado de forma independiente a un helióstato ubicado en el centro del campo de heliostatos. Para considerar que el error final de apunte puede ser distinto dependiendo de la posición solar, se simula durante todos los días del año en las horas comprendidas entre las 10 y 16 horas; en cada día se guarda el máximo error (en valor absoluto) en coordenadas X e Y.

A continuación se presentan los resultados obtenidos, representando en cada caso los máximos errores diarios en el eje horizontal y vertical para 6 valores distintos de cada error.

1. Error de referencia *Pitch*

En este caso, los resultados obtenidos y presentados en la Figura 6.5 indican que este error tiene un efecto mucho más notorio en la dirección vertical, lo que es esperable debido a la característica de movimiento en *pitch*. Por otro lado, en el eje horizontal se aprecia una dependencia del error con respecto al día del año, en donde existe una pronunciada disminución durante los meses de invierno, probablemente debido a que el rango de elevación del Sol durante sus trayecto en el día es menor comparado con los días cercanos al solsticio de Verano.

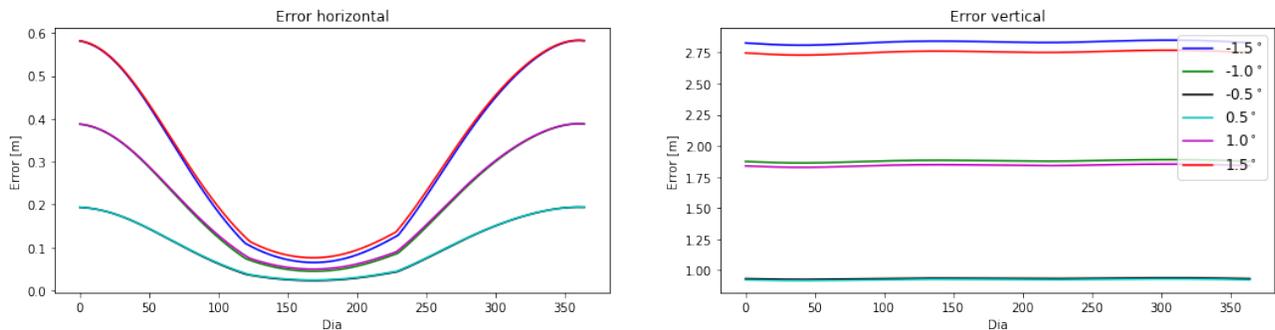


Figura 6.5: Sensibilidad de error de referencia *Pitch*.

2. Error de referencia *Roll*

Según los gráficos de la Figura 6.6 se desprende que el efecto de un offset de *roll* tiene un efecto mucho mayor en la componente horizontal del error de apunte, que se mantiene relativamente constante durante todo el año. Si bien en el gráfico de la derecha se observa que durante el invierno el error vertical disminuye, la escala indica que sólo es una disminución de 3 a 1 centímetros, es decir, despreciable en la práctica.

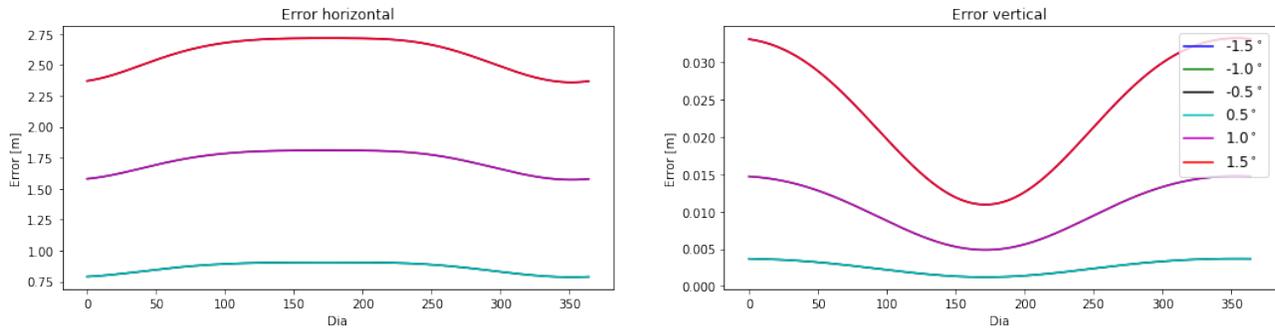


Figura 6.6: Sensibilidad de error de referencia *Roll*.

3. Error de posición en dirección Norte-Sur

En el caso de que durante la instalación el heliostato haya sido ubicado más hacia el norte o sur de la torre, según la Figura 6.7 el error cometido es exclusivamente en la dirección vertical en el receptor de la torre. En general, se destaca que un error de instalación de 1.5 metros implican errores de apunte del orden de los 40 centímetros.

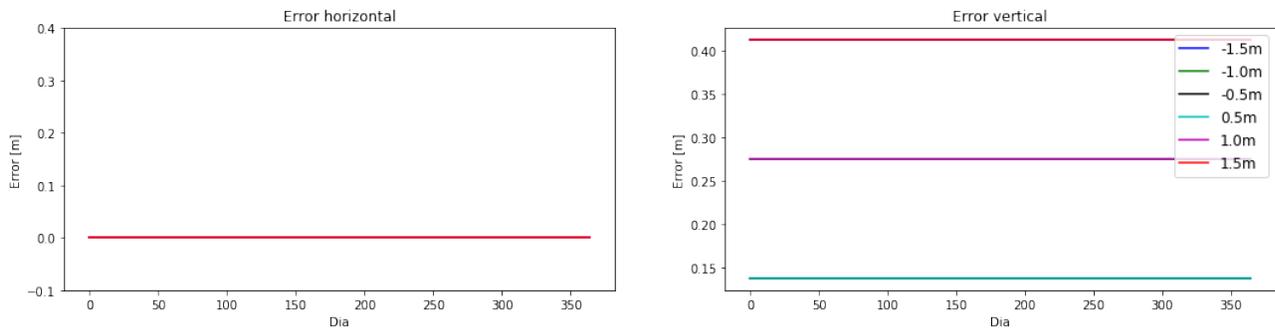


Figura 6.7: Sensibilidad de error de posición en dirección Norte-Sur.

4. Error de posición en dirección Este-Oeste

Similar al caso anterior, pero en este caso el error de apunte es exclusivo en la dirección horizontal y es igual en magnitud al error de instalación en la dirección Este-Oeste (ver Figura 6.8).

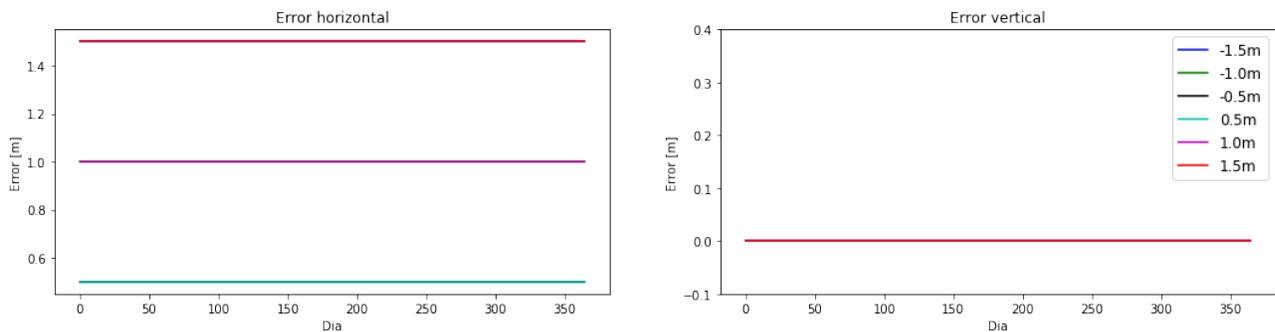


Figura 6.8: Sensibilidad de error de posición en dirección Este-Oeste.

5. Error de posición en altura

Según lo presentado en la Figura 6.9, se observa que este error significa una imprecisión de apunte exclusiva en el eje vertical, en donde se repite el comportamiento del error anterior, correspondiente a que la magnitud del error del error de apunte cometido es igual al error de posición.

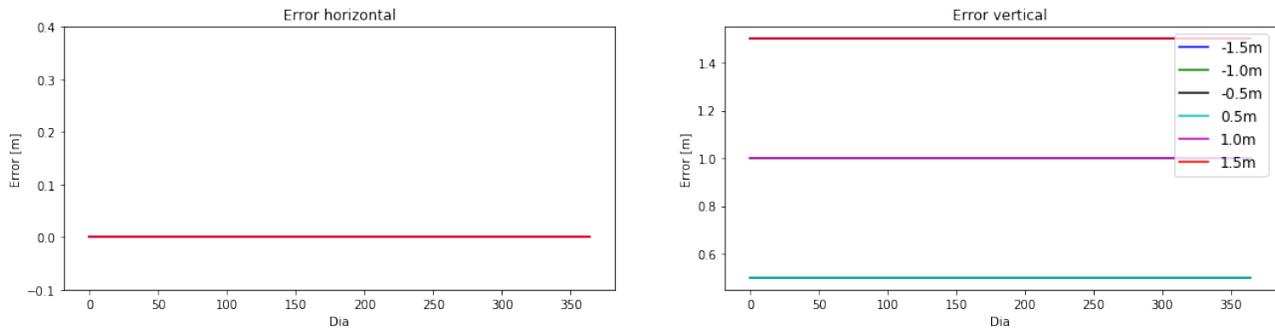


Figura 6.9: Sensibilidad de error de posición en altura

6. Error de inclinación de pedestal hacia Este u Oeste

El efecto de este error es destacable en comparación con el resto pues es el único que afecta en iguales proporciones el apunte horizontal y vertical. Se aprecia también que para un helióstato al centro del campo, los errores son no menores, pues para inclinaciones de $1,5^\circ$ el error de apunte puede llegar a valores superiores a 1 metro.

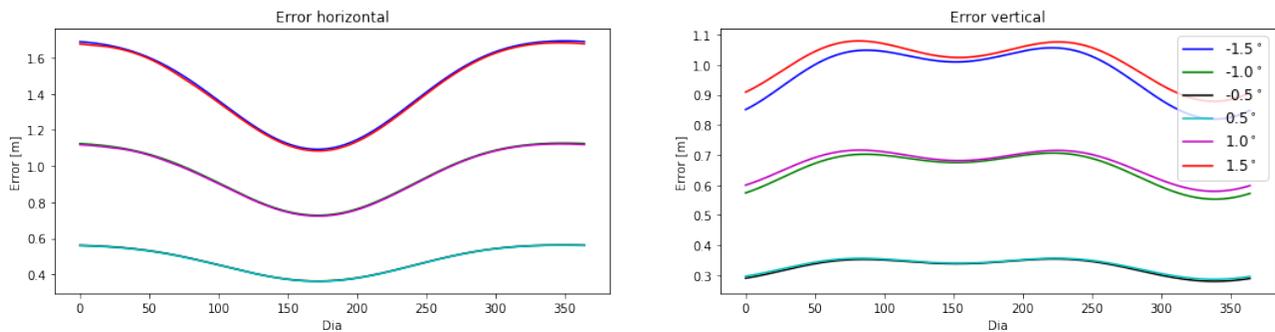


Figura 6.10: Sensibilidad de error de inclinación de pedestal hacia Este u Oeste.

7. Error de inclinación de pedestal con respecto hacia Norte o Sur

Si se comparan los resultados de sensibilidad de este error (Figura 6.11) con los obtenidos para el error de offset de *pitch* (Figura 6.5) se observa que son exactamente iguales, esto se debe a que el planteamiento matemático de ambos es idéntico cuando el helióstato está orientado hacia el Norte, pues una inclinación en este sentido es análogo a que la referencia del movimiento en *pitch* este desplazada.

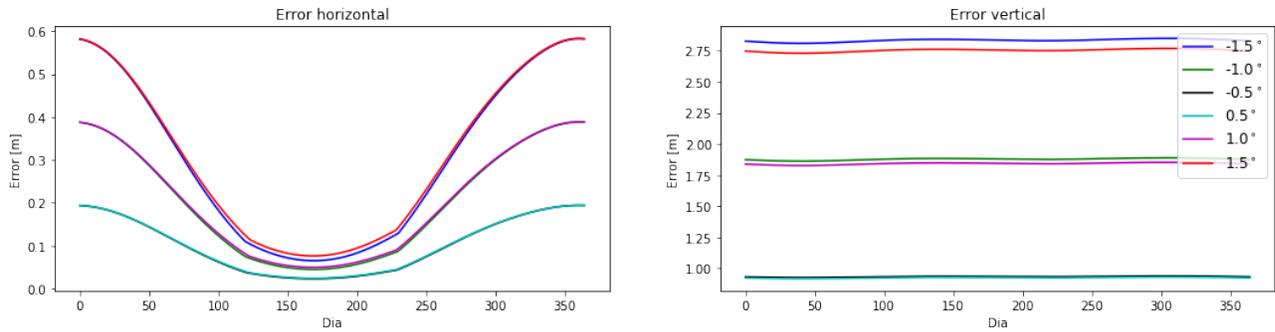


Figura 6.11: Sensibilidad de error de inclinación de pedestal con respecto hacia Norte o Sur.

8. Error de orientación azimutal

El último error bajo estudio corresponde al de una incorrecta orientación del helióstato durante la instalación. Como es esperable, el efecto de este error es más notorio en el eje horizontal, alcanzando valores de más de 2 metros cuando el error de orientación es mayor o igual $1,5^\circ$. En base a esto, durante la instalación se debe tener especial cuidado en disminuir lo más posible este error.

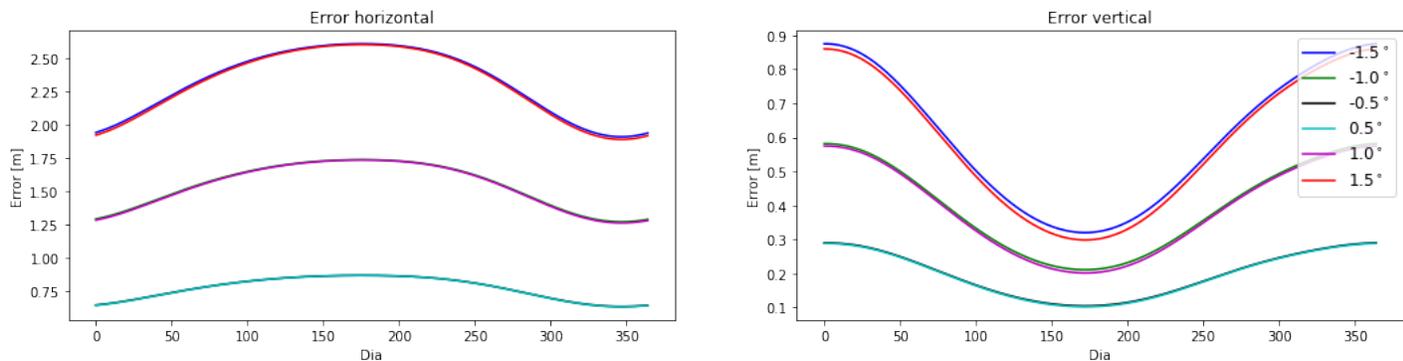


Figura 6.12: Sensibilidad de error de orientación azimutal

6.1.3. Tiempo de actualización de posición

En la operación de los helióstatos del campo es importante conocer cada cuánto tiempo estos deben actualizar su posición, pues la reflexión en la torre comienza a desplazarse si es que el helióstato continua en una posición fija.

En principio, es claro que entre más lejano se encuentre el helióstato de la torre, mayor será el error acumulado debido a la falta de actualización de posición comparado con un helióstato más cercano a la torre. El propósito de esta simulación corresponde a obtener específicamente cual debe ser el tiempo de actualización óptimo para mantener el error de apunte dentro de márgenes aceptables.

Considerando helióstatos sin errores geométricos, esparcidos en una superficie de dimensiones similar a la que abarca la distribución espacial de helióstatos de la Figura 6.1, se simula el error de apunte considerando la orientación del helióstato calculada para la posición solar de Δt

minutos antes, esto para el intervalo temporal desde las 09:00 hasta las 17:00 horas de un día en particular, para cada ubicación se guarda el máximo error cometido durante este período de tiempo.

Se consideraron tres días de simulación (Equinoccio de Otoño y ambos solsticios de Invierno y Verano) y tres diferentes tiempos de actualización: 1 minuto, 30 segundos y 15 segundos. Los resultados se presentan en las figuras 6.13, 6.14 y 6.15, en donde cada una presenta a la izquierda el error acumulado para un tiempo de actualización de 1 minuto, al centro un tiempo de actualización de 30 segundos, y a la derecha de 15 segundos.

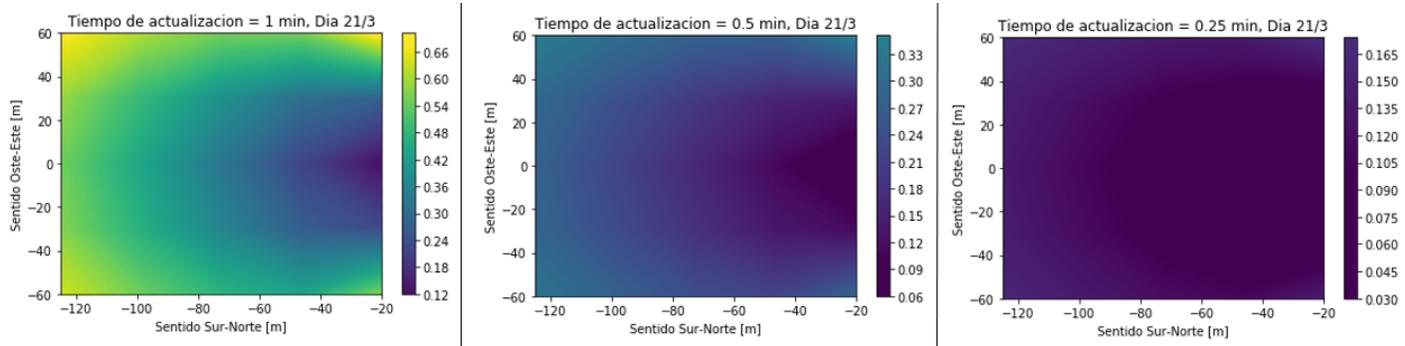


Figura 6.13: Error cometido durante el equinoccio de Otoño considerando distintos tiempos de actualización.

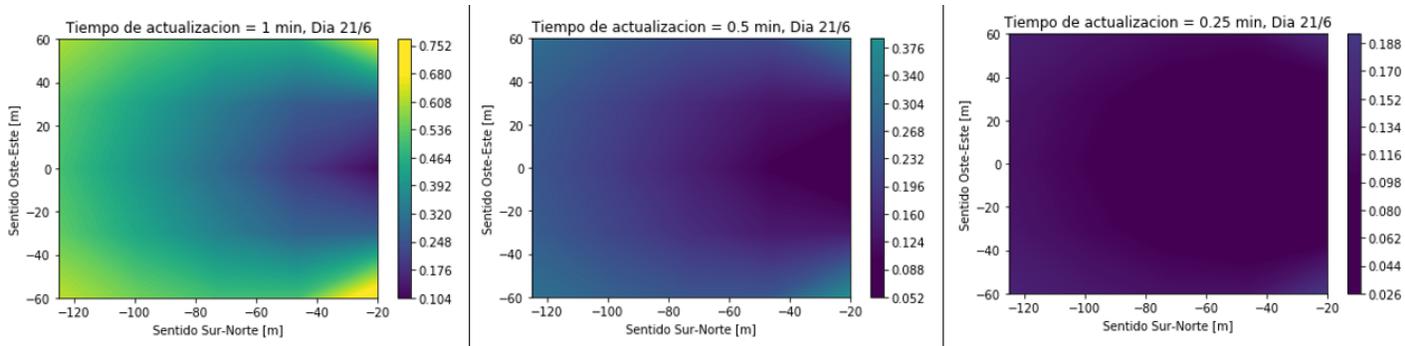


Figura 6.14: Error cometido durante el solsticio de Invierno considerando distintos tiempos de actualización.

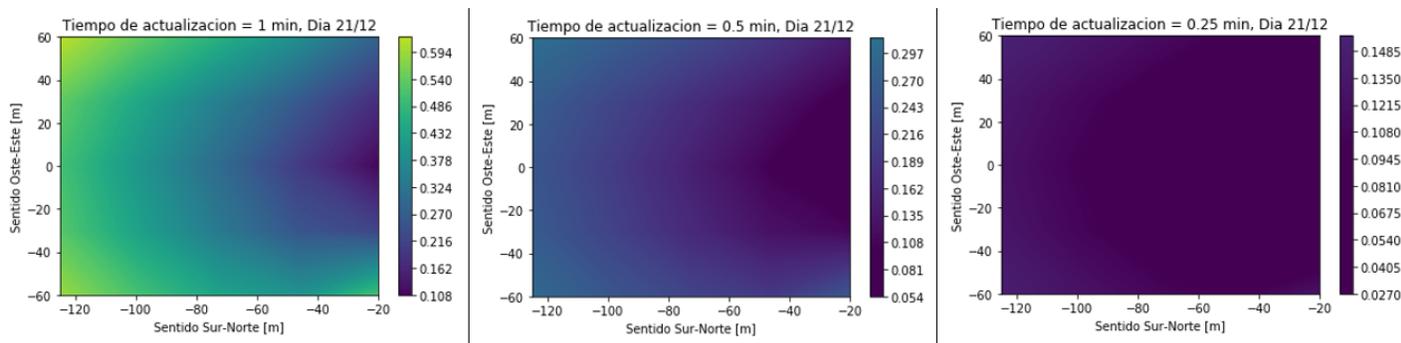


Figura 6.15: Error cometido durante el solsticio de Verano considerando distintos tiempos de actualización.

De los resultados, se ratifica la relación con la distancia, en donde los helióstatos más alejados presentan un mayor incremento del error para un mismo lapso de tiempo. De todos modos, la relación de este incremento del error no es del todo radial, pues se aprecia que si la ubicación del helióstato es no muy al Sur de la torre, pero si alejada lejana en el sentido Oeste-Este, el error puede llegar a ser incluso mayor que un helióstato ubicado a 120 metros directamente al sur de la torre; este efecto se observa con claridad en el caso de las simulaciones realizadas durante el solsticio de Invierno (Figura 6.14) y el equinoccio de Otoño (Figura 6.13) para un tiempo de actualización de 1 minuto.

Por otro lado, al comparar los resultados entre distintos tiempos de actualización, se concluye que un tiempo de actualización de 1 minuto significa un error muy elevado para los helióstatos lejanos, mientras que con 15 segundos el error de estos mismo helióstatos es del orden de 15 centímetros.

Los resultados presentados serán útiles para tomar la decisión sobre el tiempo de actualización de posición de los helióstatos, el factor relevante a considerar en conjunto corresponde a la energía utilizada por cada movimiento del helióstato, lo que podría motivar incluso a que el tiempo de actualización sea diferenciado según la distancia a la torre con el motivo de disminuir el consumo de energía.

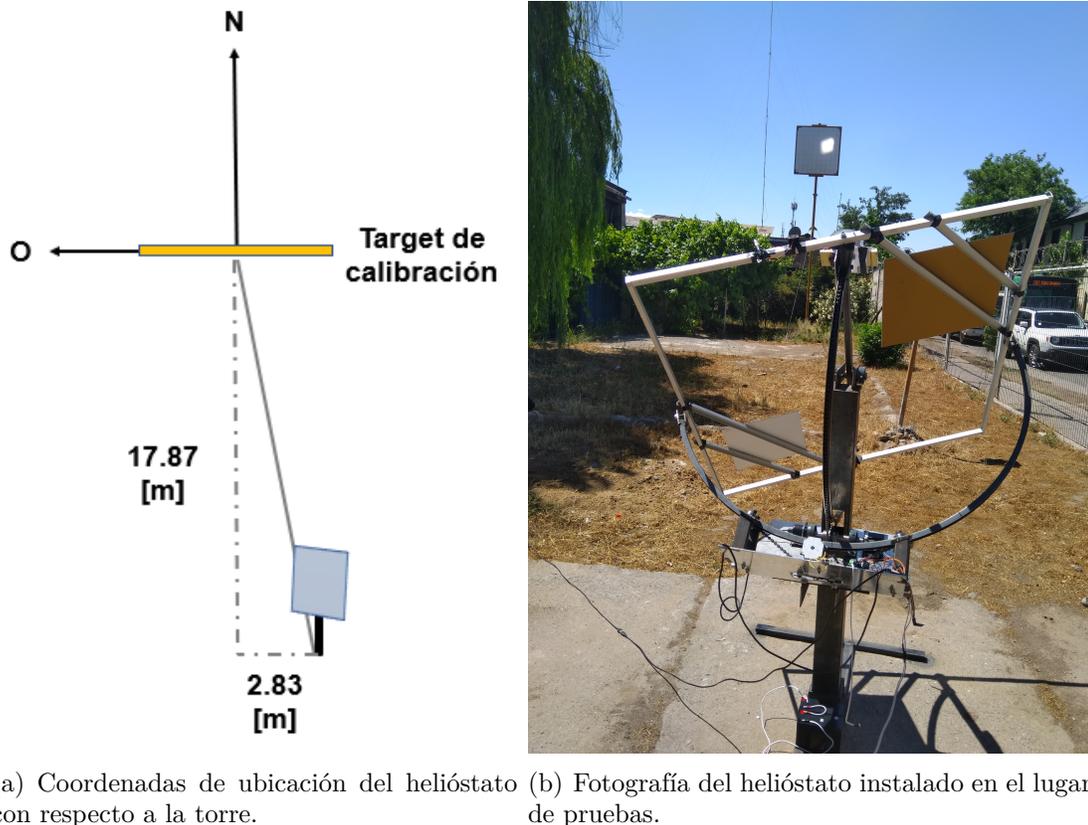
Finalmente, se debe mencionar que estos resultados establecen un requerimiento importante relacionado a la precisión de la sincronización que debe tener el microcontrolador con el tiempo verdadero, pues un error mayor a 1 minuto implica un error de apunte elevado no aceptable.

6.2. Experimentos con prototipo

6.2.1. Montaje y metodología

El taller mecánico de la Universidad de Chile fue el lugar donde se realizaron pruebas en terreno con el prototipo construido, la configuración requirió de la instalación de una superficie de calibración de dimensiones 1.5 x 1.5 metros (construida e instalada por Enerbosch), esta puede apreciarse al fondo de la fotografía de la Figura 6.16 (b).

La distancia entre la torre y el helióstato es de aproximadamente 18 metros (recordar que los errores de posición están considerados dentro del modelo de calibración, por lo que en principio no es necesaria una medición muy precisa de la distancia). La disposición espacial del helióstato con respecto a la superficie de calibración se presenta en la Figura 6.16 (a).



(a) Coordenadas de ubicación del helióstato con respecto a la torre. (b) Fotografía del helióstato instalado en el lugar de pruebas.

Figura 6.16: Montaje para mediciones con prototipo.

La metodología a seguir corresponde a realizar medidas de calibración y medidas de evaluación, las primeras son utilizadas para calibrar el movimiento del helióstato, mientras que las segundas son utilizadas exclusivamente para validar la eficacia de la calibración lograda con las mediciones previas.

El procedimiento de las mediciones de calibración es el siguiente: se apunta el helióstato a los ángulos que indica el modelo según la distribución geométrica indicada, luego, de forma visual se observa el error de apunte cometido en coordenadas XY, valores que se guardan junto

con la posición del Sol (u tiempo de la medición con resolución de segundos). La Figura 6.17 (a) representa de forma gráfica lo anterior.

Por otro lado, una medición de evaluación (representada en la Figura 6.17 (b)) corresponde a apuntar el helióstato al centro del objetivo de calibración, y guardar los ángulos *pitch/roll* que logran tal apunte junto con la posición del Sol del tiempo de medición.

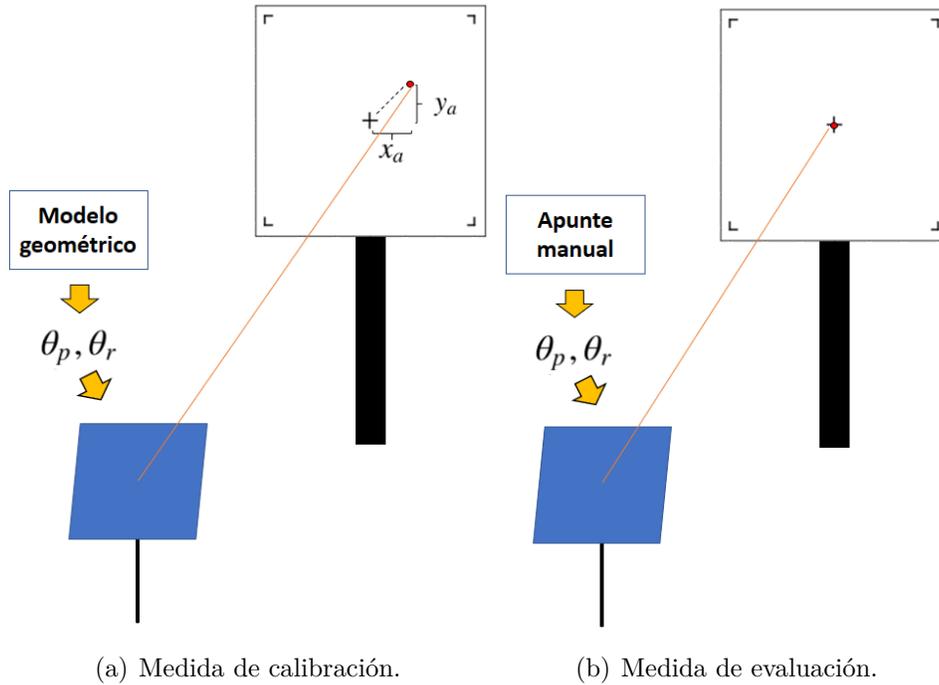
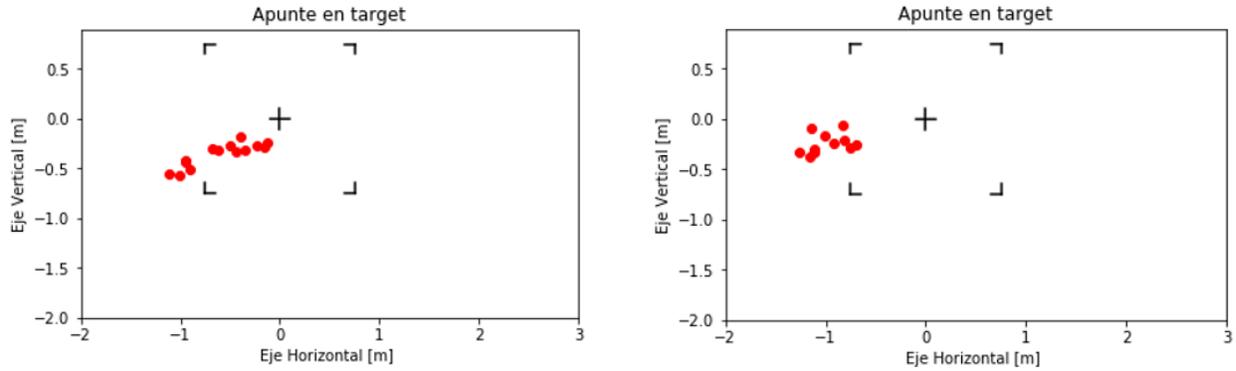


Figura 6.17: Esquemas representativos de los dos tipos de medidas de prueba.

Se debe destacar que en las mediciones realizadas utilizando la primera superficie de calibración la reflexión normalmente caía fuera de este durante las mediciones de calibración, lo que motivó a realizar estas mediciones de la misma forma que las medidas de evaluación, para luego utilizar las diferencias entre los ángulos del modelo y los ángulos que significan apuntar al centro para estimar de forma virtual donde hubiese apuntado el helióstato.

6.2.2. Resultados

Utilizando el prototipo 1.0 se realizaron mediciones durante los días 31 de Octubre y 16 de Noviembre, en la Figura 6.18 estas son presentadas como medidas de calibración utilizando el método para estimar el error cometido descrito al final del apartado anterior.



(a) Mediciones realizadas durante el día 31 de Octubre. (b) Mediciones realizadas durante el día 16 de Noviembre.

Figura 6.18: Mediciones realizadas con el prototipo 1.0 en dos diferentes días.

Al seleccionar tres mediciones tomadas durante el día 31 de Octubre para realizar la calibración se obtienen la estimación de los parámetros de error de la Tabla 2. El primer aspecto a destacar corresponde a que el *offset* de *roll* (b_r) estimado es de -5° , lo cual en primera instancia parece ser exagerado debido a que la forma en que se fija de forma inicial la referencia de los ángulos (utilizando un nivel de burbuja) no da lugar a tal error; no obstante, se observa que otros errores podrían estar compensando esta estimación, como lo es la inclinación de pedestal, que también presenta un valor elevado y cuyo efecto es en dirección contraria al caso del error de un *offset* de la referencia en *roll*.

b_p [°]	b_r [°]	k_r	Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]	ϵ_{pt_x} [°]	ϵ_{pt_y} [°]	ϵ_α [°]
-0.188	-5.000	-0.042	0.50	-0.43	-0.5	-3.25	-0.15	-2.22

Tabla 2: Valores de los errores estimados

La conclusión principal de lo establecido corresponde a que los resultados del modelo no necesariamente se condicen con los errores geométricos verdaderos (el modelo explica a su propia manera los errores de apunte cometidos), más aun considerando la poca cantidad de medidas de calibración utilizadas. Es relevante destacar que si se utilizan todas las mediciones del día 31 de Octubre para estimar los errores, se obtienen los resultados de la Tabla 3, los cuales se encuentran dentro de rangos mucho más coherentes y posibles.

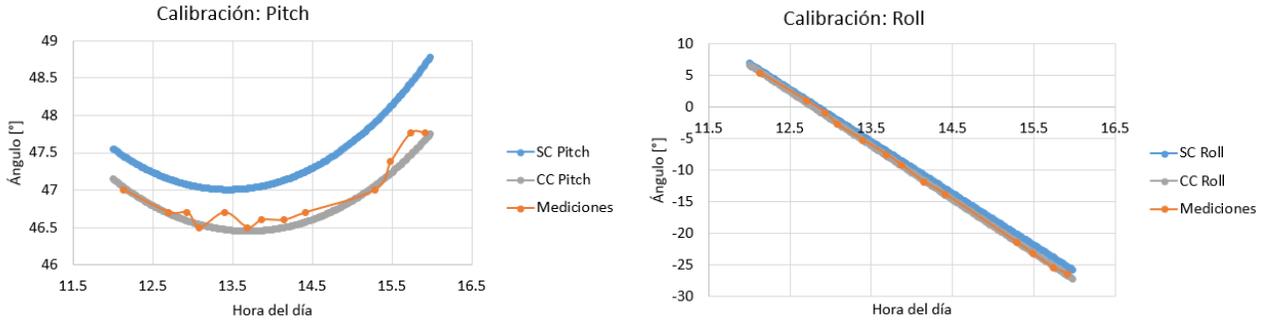
b_p [°]	b_r [°]	k_r	Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]	ϵ_{pt_x} [°]	ϵ_{pt_y} [°]	ϵ_α [°]
-0.290	-0.127	-0.048	0.50	-0.18	-0.5	-0.70	-0.28	-0.55

Tabla 3: Valores de los errores estimados utilizando todas las mediciones del día 31 de Octubre.

■ Calibración de medidas del 31 de Octubre

Utilizando los errores estimados de la Tabla 2 se recalculan los ángulos de apunte para el intervalo temporal en que se tomaron las mediciones. El resultado de este ejercicio se representa en la Figura 6.19, donde se presentan los ángulos de apunte *pitch* y *roll* del modelo sin calibrar y luego de la calibración (en azul y gris respectivamente), más las mediciones de evaluación

tomadas. Se aprecia que estas últimas recaen sobre la curva de posiciones calibradas, lo que indica que la calibración ha funcionado.



(a) Resultados para el movimiento del eje Pitch.

(b) Resultados para el movimiento del eje Roll.

Figura 6.19: Comparación de los ángulos de posición *Pitch/Roll* para los casos sin calibración (SC), con calibración (CC) y las mediciones del día 31 de Octubre.

Con los datos de los gráficos de la Figura 6.19, se calcula también el error de calibración, que corresponde al promedio de los valores absolutos de las diferencias entre las posiciones reales de medición y las posiciones del modelo calibrado. El resultado de esto, junto con su respectiva desviación estándar se presentan en la Tabla 4, aquí se aprecia que el desempeño de la calibración en *pitch* es muy cercana al valor propuesto como requerimiento (de 0.1°), mientras que para el movimiento en *roll* es cercana al doble de este. Una primera explicación a esto corresponde a que constructivamente el prototipo tenía sus deficiencias, que eran mayores para el movimiento *roll* que el movimiento en *pitch*.

Si bien los resultados son bastante aceptables, se debe mencionar que en cada medición las referencias angulares del heliostato se ajustaban de forma manual, siendo esto la principal fuente de error identificable durante esta pruebas. Es probable es que si las referencias hubiesen sido fijadas utilizando finales de carrera (como contempla el diseño final), los resultados hubiesen sido aún mejores.

	<i>Pitch</i>	<i>Roll</i>
Error de calibración promedio [°]	0.111	0.196
Desviación estándar [°]	0.077	0.115

Tabla 4: Error promedio de calibración de las mediciones realizadas durante el 31 de Octubre.

Por último, los mismo resultados de la Figura 6.19 pueden representarse estimando el error de apunte que se cometería en el objetivo si es que se utilizaran los ángulos del modelo calibrado. Esto se presenta en la Figura 6.20, en donde se aprecia que lo puntos calibrados recaen muy cerca del centro del objetivo, con un error promedio de aproximadamente 10 centímetros.

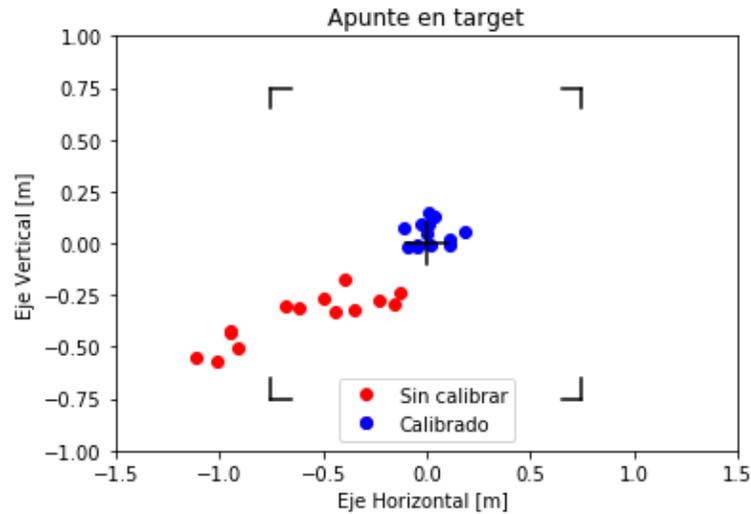


Figura 6.20: Calibración de las medidas tomadas durante el día 31 de Octubre, error de calibración: 0.097 metros.

■ **Calibración de medidas del 16 de Noviembre**

Se realiza exactamente lo mismo para las mediciones del día 16 de Noviembre, obteniéndose los resultados de las Figuras 6.21 y 6.22. A diferencia del caso anterior, se aprecia que el error de calibración es mayor, llegando a ser igual a 28 centímetros. La razón más posible del tal elevado error corresponde a que si bien en ambos días de medición el helióstato se instaló en el mismo lugar, pudo haber quedado levemente inclinado de forma distinta debido a la irregularidad del sitio de instalación. De todas formas, se debe destacar que estos resultados significan que las mediciones tomadas durante el día 31 de Octubre son útiles para calibrar el apunte del helióstato para un día distinto a cuando se realizaron las medidas de calibración.

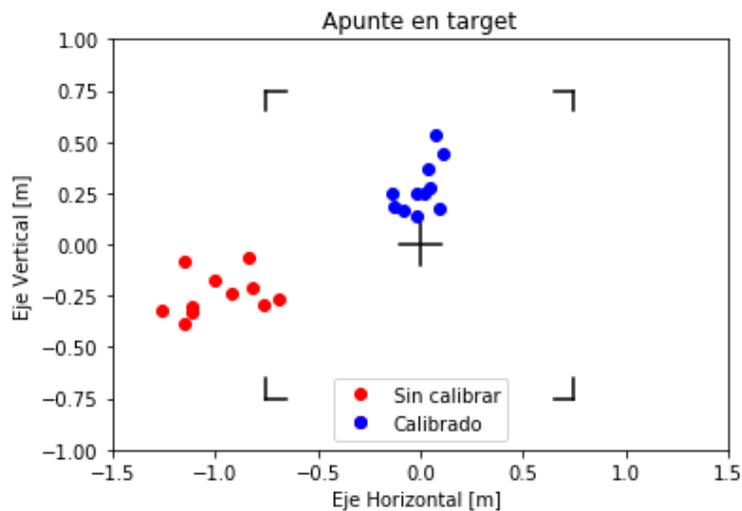
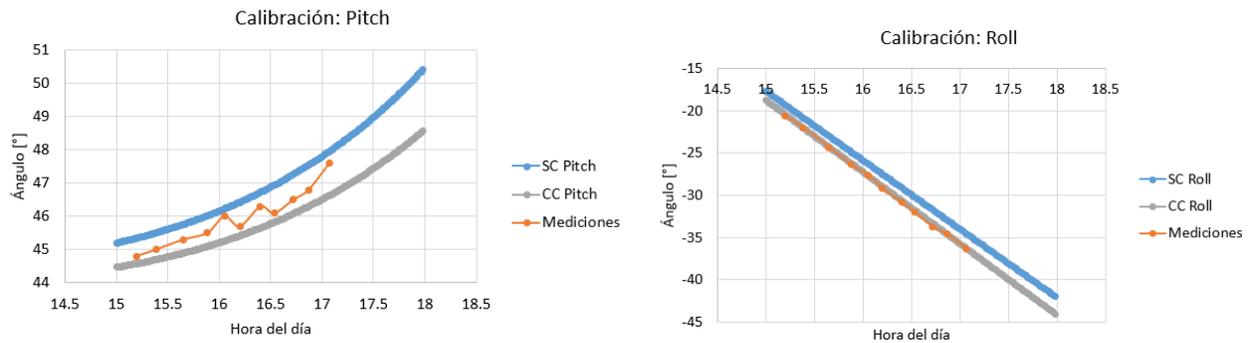


Figura 6.21: Calibración de las medidas tomadas durante el día 16 de Noviembre, error de calibración: 0.287 m

Por otro lado, la Figura 6.22 ratifica que para las mediciones tomadas durante el día 16 de

Noviembre, la calibración del movimiento fue particularmente mucho mejor en el movimiento en *roll* que la del movimiento en *pitch*.



(a) Resultados para el movimiento del eje Pitch.

(b) Resultados para el movimiento del eje Roll.

Figura 6.22: Comparación de los ángulos de posición *Pitch/Roll* para los casos sin calibración (SC), con calibración (CC) y las mediciones del día 16 de Noviembre.

Además, los resultados de la Tabla 5 indican que en este caso, la calibración en *roll* es mucho mejor que en *pitch*, alejándose esta última del requerimiento de calibración. Se debe recordar que la calibración realizada en este caso fue utilizando mediciones de otro día, y por tanto, según las simulaciones presentadas en las secciones anteriores, es normal que exista una caída en el desempeño de la calibración.

	<i>Pitch</i>	<i>Roll</i>
Error de calibración promedio [°]	0.471	0.146
Desviación estándar [°]	0.221	0.122

Tabla 5: Error promedio de calibración de las mediciones realizadas durante el 16 de Noviembre.

7. Conclusiones

En el presente trabajo se ha desarrollado el sistema de control y modelo matemático que permite orientar los helióstatos de una planta de concentración solar de torre de forma que cumplan su objetivo de redirigir la radiación a al receptor de la torre central.

Se comenzó el trabajo con una revisión bibliográfica del estado del arte de los sistemas de control y calibración típicos utilizados en este tipo de centrales, este trabajo fue muy útil para no inventar nuevos esquemas y/o metodologías, si no que para adaptar las ya existentes compatibles con las necesidades de disminución de costos que demanda el proyecto Solarbosch.

Se implementó el sistema de control de orientación, cuya principal característica corresponde a que su funcionamiento es en lazo abierto utilizando solamente motores a paso a paso (sin retroalimentación de orientación), lo cual es confiable si es que estos nunca ven sobrepasada su capacidad de torque, pues tal condición es la principal causante de que estos pierdan pasos de movimiento. Por lo mismo, desde el punto de vista mecánico, la construcción del helióstato debe ser lo más prolija posible en busca de evitar sobrecarga en los motores, la utilización de reductores sinfín-corona (como los utilizados en el prototipo 2.0) también apunta hacia este mismo objetivo.

Si bien se probaron formas de cerrar el lazo de control mediante el uso de sensores de inercia y/o *encoders* rotatorios conectados directamente en los ejes de los motores, los resultados obtenidos indicaron que no cumplían con los requerimientos de precisión, esto es concordante con la experiencia y metodologías comunes de la mayoría de otras centrales de concentración solar de tipo torre, en donde el uso de sensores de inercia a lo más se ha utilizado para calibración iniciales y nunca para el control en tiempo real.

En relación a la metodología de calibración, se adaptó la que utiliza una superficie objetivo junto con un modelo de error puesto que su eficiencia ya ha sido probada y es de muy bajo costo. Los resultados obtenidos mediante las simulaciones ratifican el funcionamiento del procedimiento implementado; y además, permiten concluir que el desempeño y eficacia de este depende fuertemente de la diversidad de las mediciones de calibración, en particular, una mayor cantidad de mediciones no significa necesariamente mejores resultados si es que estas no son tomadas en distintas fechas y a distintas horas del día, puesto que para una mayor efectividad del método información utilizada debe ser lo más variada posible.

Finalmente, se comprobó la eficiencia del modelo de error tanto en su modo de seguimiento y de calibración mediante las pruebas realizadas con el helióstato prototipo, la principal conclusión corresponde a que la metodología de calibración efectivamente funciona para un helióstato real, puesto que se logró disminuir el error de apunte de manera efectiva durante dos días de medición distintos. Esto permite afirmar que el modelo de error planteado logra representar de forma efectiva y muy similar a la realidad las aberraciones geométricas de construcción e instalación del helióstato.

8. Trabajo Futuro

Las pruebas realizadas en terreno utilizando el helióstato prototipo se adaptaron a las condiciones y recursos disponibles durante la realización de este trabajo. Estos permitieron realizar las pruebas de calibración ubicando el prototipo a una distancia de no más de 18 metros de la superficie objetivo de calibración. No obstante, se debe tener en cuenta que en la futura planta Solarbosch, los helióstatos más lejanos se ubicarán a aproximadamente 125 metros de la torre central, y por tanto, es imperante realizar las mismas pruebas realizadas en este trabajo ubicando el/los helióstato(s) prototipo(s) a una distancia mayor.

Por otro lado, también se debe integrar el sistema de control de orientación desarrollado con el sistema de comunicación inalámbrico y también el sistema de control general de la planta. El principal desafío de tal tarea corresponde al elevado número de helióstatos funcionando a la vez, en donde se debe recordar que la precisa sincronización temporal de cada helióstato con la hora verdadera es un requisito fundamental para el correcto seguimiento de los helióstatos. Por último, no está demás mencionar que el problema de comunicaciones se debe solucionar intentado disminuir al máximo los costos del *hardware* a utilizar.

9. Bibliografía

- [1] Roldán Serrano, Maria Isabel. Concentrating Solar Thermal Technologies, Analysis and Optimisation by CFD Modelling - Chapter 2.
- [2] Omar Behar. Solar thermal power plants – A review of configurations and performance comparison. *University of Boumerdes (UMBB), Boumerdes, Algeria.*
- [3] REN21. 2017. Renewables 2017 Global Status Report.
- [4] Susan Kraemer (26 de Julio, 2017) Why Chile Could Lead the World in CSP. SolarPACES. Disponible en: <https://www.solarpaces.org/why-chile-could-lead-the-world-in-csp/>
- [5] Concentrated Solar Power Market Analysis, By Technology (Parabolic Trough, Linear Fresnel, Dish, Power Tower), By Region (North America, Europe, Asia Pacific, South & Central America, MEA), And Segment Forecast, 2018 - 2025
- [6] Center for Study of Science, Technology and Policy (CSTEP). Global Review of Solar Tower Technology. *August 2014.*
- [7] National Renewable Energy Laboratory NREL. Power Tower Projects. Disponible en: <https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/index.cfm>
- [8] Omar Behar, Abdallah Khellaf, Kamal Mohammedi. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Centre de Developpement des Energies Renouvelables, CDER, Bouzareah, Algeria*
- [9] Collado F. J. and Guallar J. Campo. Generation of regular heliostat fields. *Renewable Energy.*
- [10] Dominik Schlipf, Robin Stepper, Dr. Günter Schneider, Tecnología de Almacenamiento de CSP, Últimos desarrollos. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- [11] Adalberto Tejeda Martínez, Gabriel Gómez-Azpeitia. Prontuario Solar. *Universidad de Colima, Universidad Veracruzana*
- [12] Ibrahim Reda and Afshin Andreas. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. *National Renewable Energy Laboratory (NREL).* Enero-2008
- [13] Philippe Blanc, Lucien Wald. The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period. *Solar Energy, Elsevier, 2012, 88 (10), pp.Pages 3072-3083.*
- [14] M. Blanco-Muriel, D.C. Alarcon-Padilla, T. Lopez-Moratalla, M. Lara-Coira. Computing the solar vector. *Sol. Energy, 70 (5) (2001), pp. 431-441.*
- [15] Yasser M. Safan, Sameh Shaaban, Mohamed I. Abu El-Sebah. Hybrid Control of A Solar Tracking System Using SUI-PID Controller. *Arab Academy for Science Technology and Maritime Transport AASTMT, Cairo, Egypt.*

- [16] Abraham Kribus, Irina Vishnevetsky, Amnon Yogev, Tatiana Rubinov. Closed loop control of heliostats. *Environmental Sciences and Energy Research Department, Weizmann Institute of Science, Israel, 2004.*
- [17] Joshua Freeman, Keerthi K. S, Lekshmi R. Chandran. Closed Loop Control System for a Heliostat Field. *2015 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power & Energy.*
- [18] Mark R. Convery. Closed-loop control for power tower heliostats.
- [19] Gregor Bern, Peter Schöttl, Anna Heimsath, Peter Nitz. Novel Imaging Closed Loop Control Strategy for Heliostats. *Division Solar Thermal and Optics, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany.*
- [20] Paul Julian Harper, Janto Dreijer, Karel Malan, James Larmuth, and Paul Gauche. Use of MEMs and optical sensors for closed loop heliostat control. *SolarPACES 2015*
- [21] Google. RE<C Heliostat Project Overview. 2013.
- [22] Gerro Prinsloo, Robert Dobson, SOLAR TRACKING, High precision solar position algorithms, programs, software and source-code for computing the solar vector, solar coordinates and sun angles in Microprocessor, PLC, Arduino, PIC and PC-based sun tracking devices or dynamic sun following hardware.
- [23] Rajesh Singh, Suresh Kumar, Anita Gehlot, Rupendra Pachauri. An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review. *Electronics Instrumentation and Control Engineering Department, School of Engineering Studies, University of Petroleum and Energy Studies, Dehradun 248007, India*
- [24] Joshua Freeman, Kiranlal E. U.,Rajasree S. R. *Study of the Errors Influencing Heliostats for Calibration and Control System Design.*
- [25] R.S. Baheti, P.F. Scott. Design os Self-Calibrating Controllers for Heliostats in a Solar Power Plant. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL VOL. AC-25, NO. 6, DECEMBER 1980.*
- [26] M. Zavodny, M. Slack, R. Huibregtse, and A. Sonn. Tower-based CSP Artificial Light Calibration System. *Energy Procedia 69, 1488–1497 (2015).*
- [27] M. Berenguel, F. Rubio, A. Valverde, P. Lara, M. Arahall, E. Camacho, M. López. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant. *Sol. Energy, 76 (5) (2004), pp. 563-575.*
- [28] K. Malan, P. Gauché. Model based open-loop correction of heliostat tracking errors. Solar Thermal Energy Research Group, Dept. of Mechanical and Mechatronic Engineering, Stellenbosch University, 7602, South Africa, 2013.
- [29] Steve Schell. Design and evaluation of esolar’s heliostat fields. *Systems Engineering, Integration, and Test, eSolar Inc.*
- [30] E.J. Smitha and C.K.Hob. Field demonstration of an automated heliostat tracking correction method. *Sandia National Laboratories.*

- [31] Michael Burisch, Marcelino Sanchez, Aitor Olarra, and Cristobal Villasante. Heliostat calibration using attached cameras and artificial targets.
- [32] Golrokh Araghi, René Jr Landry. Temperature compensation model of MEMS inertial sensors based on neural network. Department of Electrical Engineering, École de technologie supérieure Montreal, Canada.
- [33] Leadshine. DM442 Stepper Motor Driver Datasheet.
- [34] Yumo Rotary Encoders. Incremental Rotary Encoder Model A6B2 Datasheet.
- [35] Autonics. E50S Series Rotary Encoders Datasheet.
- [36] Arduino. MPU-6050 Accelerometer + Gyro. Disponible en: <https://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>
- [37] Sebastian O.H. Madgwick. Automated calibration of an accelerometers, magnetometers and gyroscopes - A feasibility study. September 20, 2010.

Anexos

A. Geometría de orientación

Se presentan los cálculos necesarios para determinar la orientación que debe tener un helióstato de forma de reflejar el Sol en la torre receptora.

A.1. Formulación del problema

Sea un sistema conformado por una torre receptora, el Sol y un helióstato cuyo reflector está desplazado con respecto al punto de giro (pivote) una distancia R . Se definen los siguientes vectores:

- \hat{s} : Vector solar. Apunta desde el centro del reflector del helióstato hacia la posición del Sol. Es un vector unitario.
- \vec{d} : Apunta desde el pivote del helióstato hacia el centro del receptor.
- \hat{t} : Apunta desde el centro del reflector del helióstato hacia el centro del receptor.
- \hat{n} : Es la normal del reflector. Apunta desde el centro del reflector del helióstato hacia el punto medio entre el Sol y el receptor. Es el vector unitario que se desea determinar.

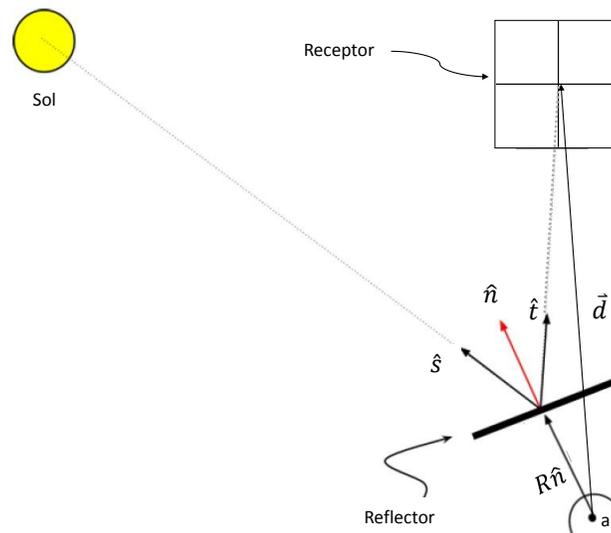


Figura A.1: Geometría del problema

A.2. Solución

Notar que:

$$\hat{n} = \frac{\hat{s} + \hat{t}}{\|\hat{s} + \hat{t}\|}$$

Por otra parte:

$$\hat{t} = \frac{\vec{d} - R\hat{n}}{\|\vec{d} - R\hat{n}\|}$$

Por lo tanto, el problema consiste en resolver \hat{n} en la relación siguiente:

$$\hat{n} = \frac{\hat{s} + \frac{\vec{d} - R\hat{n}}{\|\vec{d} - R\hat{n}\|}}{\|\hat{s} + \frac{\vec{d} - R\hat{n}}{\|\vec{d} - R\hat{n}\|}\|}$$

Lo anterior se puede expresar en coordenadas cartesianas como:

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^3 \left(s_k + \frac{d_k - Rn_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (d_i - Rn_i)^2}} \right)^2}} \left(\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (d_i - Rn_i)^2}} \begin{bmatrix} d_1 - R \cdot n_1 \\ d_2 - R \cdot n_2 \\ d_3 - R \cdot n_3 \end{bmatrix} \right)$$

Notar que para determinar n_1 , n_2 y n_3 se debe resolver el sistema de manera numérica.

En una primera aproximación se considera el caso en que $R = 0$. En este caso, el sistema posee solución analítica:

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^3 \left(s_k + \frac{d_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 d_i^2}} \right)^2}} \left(\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 d_i^2}} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \right)$$

B. Validación de modelo de error

En busca de validar y comprobar el modelo de error implementado, se realiza un análisis de sensibilidad modificando la dimensión de cada uno de los errores involucrados en el modelo. El ejercicio realizado corresponde a considerar la posición del Sol como el vector igual al vector unitario del eje Z, es decir, perfectamente en la vertical, sin inclinación hacia el este u oeste; con esto, se observa el apunte al modificar los errores, el resultado esperado en cada caso corresponde a que las curvas obtenidas coincidan con la intuición:

■ Sensibilidad de errores de tipo angular:

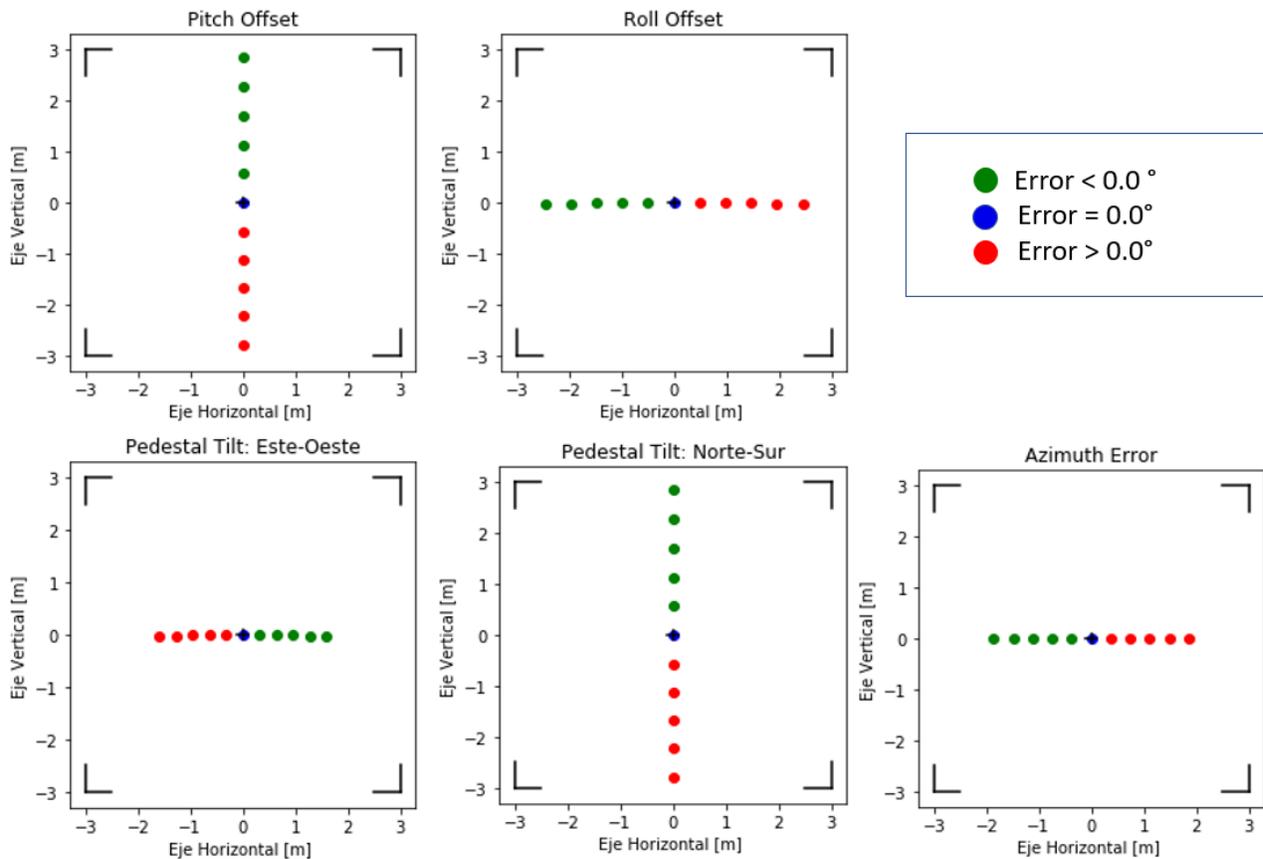


Figura B.1: Errores de naturaleza angular, en cada caso la iteración fue entre -1.5° y 1.5° en intervalos de 0.3° para un helióstato ubicado a 50 metros de la torre.

En la Figura B.1 se observa que precisamente los errores de offset en *pitch* y inclinación de pedestal tienen un efecto en el error de apunte vertical, mientras que los otros tres tienen efecto en el eje horizontal.

■ Sensibilidad de errores de posición:

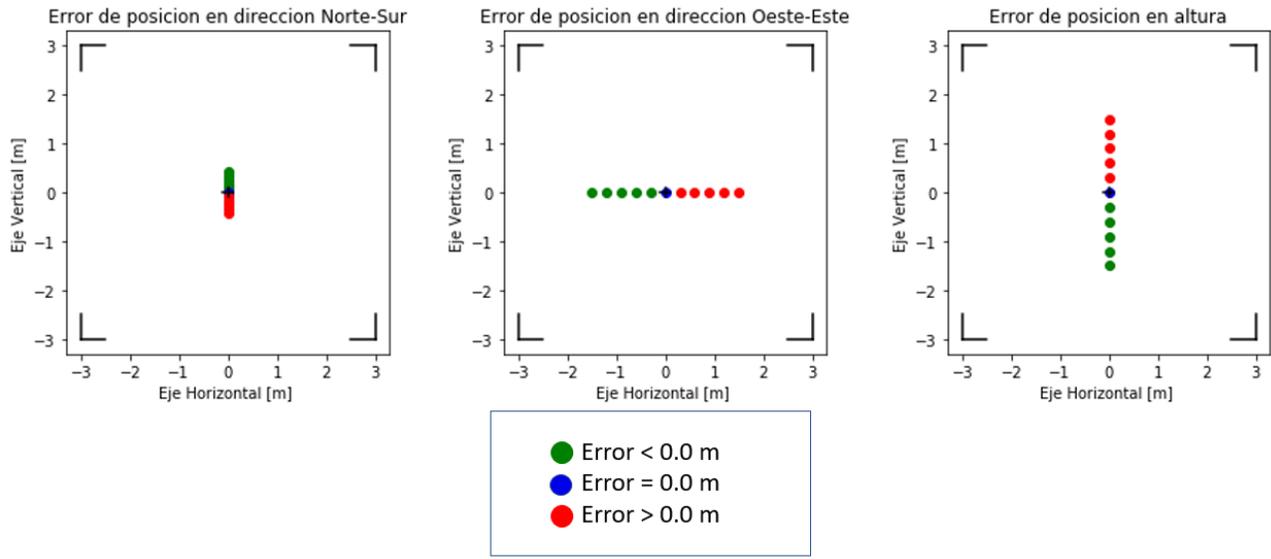


Figura B.2: Errores de posición, en cada caso la iteración fue entre -1.5 metros y 1.5 metros en intervalos de 30 centímetros.

La Figura B.2 presenta la sensibilidad de los errores de posición, se confirma que las direcciones de estos coinciden con las respectivas direcciones de los errores de posición. Se destaca además que un error de instalación en la dirección Norte-Sur presenta un menor error, esto se debe a que a diferencia de los otros dos casos, el movimiento es perpendicular a la superficie objetivo.