

UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNA PROPUESTA DE CONTROL PARA HELIÓSTATO EN
LAZO CERRADO

T E S I S

PRESENTADA POR

ZINNIA ESTHER MIZQUEZ ANTÚNEZ

Desarrollada para cumplir con uno de los
Requerimientos parciales para obtener
el grado de Maestra en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS
DR. VICTOR HUGO BENITEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

DICIEMBRE 2013

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



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



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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

Hermosillo, Sonora a 15 de noviembre de 2013

ING. ZINNIA ESTHER MIZQUEZ ANTUNEZ

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado vigente, otorgamos a usted nuestra aprobación de la fase escrita del examen profesional, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestra en Ingeniería.

Por tal motivo este jurado extiende su autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **UNA PROPUESTA DE CONTROL PARA HELIÓSTATO EN LAZO CERRADO** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE

Dr. Victor Hugo Benítez Baltazar
Director de tesis y Presidente del jurado

M.C. Guillermo Cuamea Cruz
Secretario del Jurado

Ma. Elena Anaya P.
M.C. María Elena Anaya Pérez
Vocal del Jurado

Camilo Arancibia Bulnes
Dr. Camilo Arancibia Bulnes
Vocal externo

RESUMEN

El campo de pruebas de helióstatos (CPH) es un subproyecto que pertenece al proyecto del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. El proyecto del CPH consiste en un conjunto de helióstatos desplegados sobre el terreno, una torre con cabina de experimentación y de una sala de control. La torre cuenta con un blanco Lambertiano para proyectar las imágenes producidas por los helióstatos. El modelo trabajado en esta investigación es el UNISON-MC-H1. Este prototipo de helióstato se controla mediante un sistema en lazo abierto; por los problemas conocidos en este método de control, se ha propuesto equipar al heliostato con un sistema de control en lazo cerrado, el cual consiste en el arranque del motor con un pulso, y se generan pulsos posteriores de accionamiento como una función de la posición del eje del motor y / o la velocidad mediante un componente de retroalimentación.

Mediante un algoritmo se obtiene una tabla de valores de la posición solar, y se genera una secuencia de pasos para el motor de pasos. La serie de pasos se calcula por un contador A donde su valor es comparado, con los valores discretos de un sensor medidor de posición encoder por un contador B. La diferencia de estos contadores dirige al motor; esta estrategia de control fue validada en simulación. Mediante el uso de Lab View, se demostró que el helióstato es capaz de seguir las posiciones del Sol en lazo abierto acompañado de un error de seguimiento. Mediante un algoritmo que se ha desarrollado en esta investigación, se trabaja tal error para intentar disminuirlo; a través de simulación y pruebas en campo se logra concluir con un efecto positivo sobre la disminución del error que afecta la posición deseada del heliostato.

ABSTRACT

The heliostat field facility (CPH) is a sub-project that belongs to the National Laboratory Solar Concentrating Systems and Solar Chemistry. The CPH project consists of a set of heliostats deployed on the ground, a tower with cabin experimentation and a control room. The tower has a Lambertian surface to project the images produced by the heliostats. The model used in this research is the UNISON -MC- H1. This prototype of heliostat is controlled by an open loop system, for known issues in this control method, a new strategy has been proposed to equip the heliostat control system with a closed loop control scheme, which consists of an engine that starts with a pulse , and generating subsequent drive pulses as a function of motor shaft position and / or speed through a feedback component.

Using an algorithm we obtain a table with values of the solar position, and generate a sequence of steps for the stepper motor. The number of steps is calculated by a counter A, its value is compared with the discrete value of a position measuring encoder sensor by a counter B. The difference in these counters leads to the motor; this control strategy was validated in simulation. By using Lab View, it was shown that the heliostat is able to follow the positions of the sun in open loop accompanied by a tracking error. Using an algorithm that has been developed in this research, we have given treatment to this tracking error to try to decrease it; through simulation and field testing it's being accomplished with a positive effect, a reduction on the tracking error, benefiting the heliostat desired position.

DEDICATORIAS

- A mi Dios.
- A mis padres.
- A mis hermanos.
- A mi pareja.
- A mi familia.
- A mis amigos.
- A mis maestros.
- A mi director de tesis.
- Al personal del CPH y equipo de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

- Gracias a Dios, por darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida, con los obstáculos y la ayuda que siempre se me brindó.
- A mi padre Antonio Mizquez Castro y a mi madre Ma. del Rosario Antúnez Navarro, así como a mis hermanos, quienes me ha apoyado incondicionalmente en mis estudios.
- A mis maestros por los conocimientos y el apoyo que me han dado.
- A mi director de Tesis Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar, por apoyarme y guiarme en la realización de mi proyecto de tesis.
- Al Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes y personal técnico del CPH por el apoyo en la parte experimental de este proyecto.
- Al proyecto CONACYT 123767 “Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa”.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Estructura de la Tesis.....	5
1.3. Planteamiento del Problema.....	5
1.4. Objetivo General.....	6
1.5. Objetivos Específicos.....	6
1.6. Hipótesis.....	7
1.7. Alcances y Delimitaciones.....	7
1.8. Justificación.....	7
2. MARCO DE REFERENCIA	9
2.1. El Recurso Energético Solar en el Estado de Sonora.....	9
2.1.1. Radiación Solar.....	10
2.1.2. Comparación de Sonora con otros Países Referente a Radiación Solar.....	12
2.1.3. Tendencias Globales de Energía Renovable.....	14
2.2. Helióstatos en el Marco de las Energías Renovables.....	15
2.2.1. Antecedentes de Helióstatos.....	16
2.2.2. Tecnología de la Torre Central.....	18
2.2.3. Otras Tecnologías de Aprovechamiento de la Energía Solar.....	22
2.3. Análisis Matemático.....	25
2.3.1. Trayectoria del Sol.....	25
2.3.2. Problema de Seguimiento Solar.....	31
2.3.3. Aproximaciones y Errores de Redondeo.....	32
2.4. Actuadores.....	34
2.4.1. Motores Eléctricos.....	34

2.4.2. Motores a Pasos.....	37
2.5. Esquemas de Control	39
3. METODOLOGÍA.....	46
3.1. Modelo de Seguimiento Solar Aplicado a Hermosillo.....	46
3.1.1. Análisis del Error de Seguimiento	49
3.2. Esquemas de Control	53
3.2.1. Esquema de Control de Lazo Abierto para Helióstato.....	53
3.2.2. Esquema de Control de Lazo Cerrado para Helióstato	54
3.3. Simulación del Análisis del Error.....	55
3.4. Validación Experimental en el CPH	57
3.4.1. Descripción del CPH.....	58
3.5. Propuesta de Control en Lazo Cerrado.....	59
3.5.1. Retroalimentación en Helióstatos	59
3.5.2. Sensores	60
4. RESULTADOS.....	62
4.1. Validación de Algoritmo por medio de Simulación	62
4.2. Prueba Ópticas.....	68
4.3. Implementación de Algoritmos en Tiempo Real.....	73
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	79
5.1. Conclusiones	79
5.2. Trabajo Futuro	80
5.3. Observaciones.....	80
6. BIBLIOGRAFÍA.....	81
7. ANEXOS	83
7.1. Anexo 1.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Helióstato y Torre Central.....	2
Figura 2.1. Mapas de radiación solar de México y Europa.	13
Figura 2.2. Evolución histórica en el desarrollo de helióstatos.	17
Figura 2.3. Tecnología de torre central.....	19
Figura 2.4. Esquema de un sistema de torre de energía de sal fundida.	20
Figura 2.5. Canal parabólico y disco parabólico.	21
Figura 2.6. Sistema solar pasivo y activo.	23
Figura 2.7. Sistema fotovoltaico.	24
Figura 2.8. Sistema de circulación activo y pasivo a base de colectores.....	25
Figura 2.9. Longitud y latitud de un punto P en la superficie de la Tierra.....	26
Figura 2.10. Ángulo de declinación (δ), latitud (ϕ), hora solar (ω) desde un punto P.....	27
Figura 2.11. Polos magnéticos y polos geográficos.....	30
Figura 2.12. Polos magnéticos y declinación magnética.	31
Figura 2.13. Construcción de motor y terminología.	35
Figura 2.14. Ejemplos de motores comerciales.....	36
Figura 2.15. Secuencia de pasos del motor de pasos.....	39
Figura 2.16. Sistema de control de velocidad.....	43
Figura 2.17. Sistema de control de temperatura.....	44
Figura 2.18. Control de temperatura del compartimiento de pasajeros de un coche.	45
Figura 3.1. Sistema de coordenadas rectangulares.	47
Figura 3.2. Esquema de control en lazo abierto.	54
Figura 3.3. Esquema de control en lazo cerrado.	55
Figura 3.4. Campo de pruebas de helióstatos (CPH).	57
Figura 4.1. Campo de pruebas de helióstatos CPH.	62
Figura 4.2. Secuencia de pasos de posición.	63
Figura 4.3. Helióstato en Posición de Reposo.....	64
Figura 4.4. Secuencia de pasos de posición.	65
Figura 4.5. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 1.	66
Figura 4.6. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 2.	67
Figura 4.7. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 3.	67

Figura 4.8. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 4.	68
Figura 4.9. Prueba de mancha solar	69
Figura 4.10. Prueba de mancha solar en tiempo real.	69
Figura 4.11. Posiciones horizontal y vertical del centroide de la mancha solar.....	70
Figura 4.12. Arreglo para pruebas de deflectometría o proyección de franjas.....	71
Figura 4.13. Patrón de franjas proyectadas sobre el blanco Lambertiano.	72
Figura 4.14. Patrón de franjas reflejadas por el helióstato.....	72
Figura 4.15. Esquema de control en lazo cerrado por algoritmo de seguimiento.....	73
Figura 4.16. Comportamiento del ángulo acimut.	74
Figura 4.17. Comportamiento del ángulo elevación.....	75
Figura 4.18. Comparación de β en su valor real y su valor corregido.	76
Figura 4.19. Comportamiento del error.....	76
Figura 4.20. Comparación de β en su valor real, su valor corregido y su valor óptimo	77
Figura 4.21. Acercamiento del comportamiento de los ángulos de elevación.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Ejemplo de ángulos obtenidos para la elevación y el acimut.....	49
Tabla 3.2. Discretización de ángulos característicos en acimut y elevación.	52

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se discutirá acerca de la utilización de energía solar por medio de helióstatos empleados en Tecnología de Torre Central, y el entorno que rodea esta tecnología nueva para México. Se menciona la importancia de la aplicación de tecnologías que apoyen el medio ambiente mediante la utilización del recurso renovable solar.

1.1. Antecedentes

En el actual contexto socioeconómico mundial con crecimiento de población y del nivel de vida, el suministro de los recursos energéticos debe de estar garantizado para el mayor número posible de habitantes. Las tecnologías que transforman esos recursos en energía final deben de minimizar su impacto sobre el medio ambiente, suministrando una energía eficiente, a un costo que permita el desarrollo de una actividad económica competitiva.

El desarrollo de la energía renovable se ha vuelto una estrategia importante para la seguridad energética, el desarrollo económico, la protección del medio ambiente y la estabilidad social (Wang & Li, 2009).

Los sistemas de energía solar han emergido como una fuente factible de energía renovable. Los colectores solares eficientes han sido desarrollados con capacidad de recolectar la radiación solar incidente y convertirla en energía eléctrica o térmica (Chiang et al, 2008).

En el presente proyecto, se analiza la implementación de una tecnología nueva para México y América Latina, la cual consta del desarrollo de un sistema de captación de energía solar, mediante un sistema de helióstatos y una Torre Central (Figura 1.1). El helióstato tiene la función de redirigir los rayos del Sol hacia la parte superior de la torre donde se encuentra localizado un sistema de captación de la energía solar recibida.

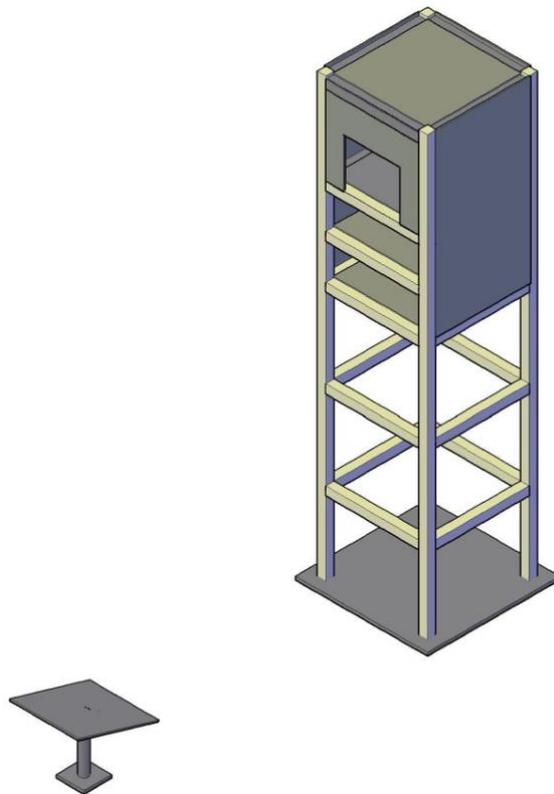


Figura 1.1. Helióstato y Torre Central.

Para lograr seguir la trayectoria del Sol se necesita un sistema de control, donde mediante una computadora, un helióstato recibe la posición de la trayectoria aparente del Sol, para después colocarse en el ángulo indicado.

La construcción de sistemas de seguimiento solar resurge a mediados de los años 70's con fines de aprovechamiento de energía solar en tecnologías de torre central, hornos solares de alta temperatura, canal parabólico, etcétera. La evolución de los helióstatos en estas últimas décadas ha sido muy importante, su objetivo sigue siendo el mismo; mantener el haz de luz solar reflejado sobre un blanco fijo (el receptor en la parte superior de la torre), sin embargo su construcción y funcionamiento han variado notablemente. El diseño incluye generalmente una gran área de reflexión, una estructura mecánica rígida para sostener los espejos y soportar los vientos, además cuentan con actuadores para darles el movimiento y la

orientación requeridos, así como con dispositivos electrónicos de control de seguimiento (Cabanillas, 2008).

Uno de los primeros sistemas de seguimiento solar automático fue presentado por *McFee*, en 1975, en el cual un algoritmo fue desarrollado para calcular la distribución total de energía recibida y la densidad de flujo dentro del sistema eléctrico solar del receptor central. Subdividiendo cada espejo en 484 elementos y sumando las contribuciones de todos los elementos, se podía determinar la posición del Sol con una tolerancia de error de seguimiento de $0.5^\circ - 1^\circ$ (Lee, 2009).

La tecnología de torre central parte del concepto de enviar una gran cantidad de energía a un receptor central fijo mediante helióstatos, los cuales siguen el movimiento solar para reflejar los rayos recibidos a un objetivo fijo que generalmente se encuentra a una altura determinada sobre una torre, de ahí su nombre de torre central. Los espejos reflejantes de radiación solar se encuentran esparcidos sobre el terreno y tienen una dinámica para ir siguiendo al Sol y colocar el rayo solar reflejado en el receptor de la torre. Una planta de torre central cuenta con un campo de cientos (o incluso cientos de miles) de helióstatos que son controlados por una o varias computadoras para calcular sus movimientos durante el tránsito solar, desde un centro de control. En el receptor central colocado en la torre se recibe la radiación solar y el calor es aprovechado para producir vapor y generar electricidad en un ciclo termodinámico (Cabanillas, 2008).

Los motores ayudan a dar el movimiento y orientación requeridos. Este servomecanismo consta de una transmisión mecánica, la cual, por su naturaleza, provoca errores al momento de operar, errores que se ven reflejados sobre el ángulo final esperado en el punto central de la torre y en consecuencia, se ve afectada seriamente la concentración de energía en el receptor.

Mediante pruebas en un ambiente de laboratorio se busca experimentar sobre el esquema actual de control, el cual consiste en helióstato con un sistema de control en lazo abierto que es capaz de realizar seguimiento solar. A partir de dicho esquema se propondrá una estrategia de control de seguimiento de helióstato de

lazo cerrado. Las pruebas serán realizadas sobre el mecanismo de control, tomando como base la información de las trayectorias del Sol.

Para poder identificar los ángulos requeridos (óptimos) para el helióstato se debe de proporcionar una entrada de información, la cual consta de la dinámica de la trayectoria del Sol. Estos datos ayudarán al sistema a hacer una comparación de la posición actual y la óptima, para después generar una corrección.

Para controlar los helióstatos, se requieren calcular las variaciones de los ángulos característicos de cada helióstato en función de la hora y del día del año. Además se requiere conocer la posición relativa de cada helióstato con respecto a la torre. Por su parte el receptor, colocado en la parte superior de la torre, está situado en una zona geográfica específica. Estas características, de un campo de helióstatos, hacen el proceso de control en lazo abierto más deficiente. Realizar el control de un campo de helióstatos requiere del conocimiento de una cantidad considerable de variables, sin embargo una vez que se saben los ángulos característicos, es posible estudiar el efecto de los parámetros importantes sobre el funcionamiento óptico del campo (Mehrabian, 2007).

En las últimas dos décadas, los sistemas de lazo cerrado basados en foto sensores han emergido como una opción para controlar los sistemas de seguimiento solar. En tales sistemas, los fotosensores discriminan la posición del Sol y envían señales eléctricas proporcionales al error hacia el controlador. El controlador procesa las señales eléctricas y después envía las señales apropiadas al motor para conducir el sistema de seguimiento, tales que el error llega a valores cercanos a cero (Chia-Yen, et al., 2008).

Se han propuesto varios esquemas para optimizar el ángulo de inclinación y la orientación de colectores solares diseñados para diversas latitudes geográficas y optimizar los períodos posibles de utilización.

En términos de ingeniería existen dos posibilidades de controlar un helióstato:

- Esquema de Control de Lazo Abierto. Un sistema de control de lazo abierto calcula su salida usando solamente el estado actual basado en la fecha y la

hora del día, sin usar la retroalimentación; de tal manera que no se determina si su salida ha alcanzado la meta deseada. El sistema es más simple y más barato que el tipo de lazo cerrado (Lee, 2009).

- Esquema de control de lazo cerrado. En estos sistemas, un número de entradas se transfieren a un controlador. Los sensores que detectan los parámetros relevantes inducidos por el Sol, son retroalimentados al controlador y éste corrige el error entre la salida deseada y la salida actual (Lee, 2009).

1.2. Estructura de la Tesis

Este documento de tesis está organizado de la siguiente manera, en el presente capítulo se da una introducción a la tesis, se hace el planteamiento del problema y los objetivos del proyecto; en el capítulo 2 se mencionan las referencias consultadas y aplicaciones similares al proyecto realizado, además se incluye información complementaria sobre el tema de heliostatos, el recurso solar en México, el análisis matemático y los problemas presentados en el desarrollo del proyecto; en los capítulos del 3 al 5 se habla sobre los resultados obtenidos de la aplicación realizada al heliostato y el algoritmo así como el trabajo futuro sobre el proyecto; al final se muestran las conclusiones y anexos.

1.3. Planteamiento del Problema

Hasta donde se reporta en la literatura, el estado de Sonora es pionero en México y América Latina en la implementación de una tecnología termosolar de torre central. Dentro del proyecto del Campo Experimental de Torre Central es muy importante la línea sobre control de heliostatos para lograr un mejor desempeño de la instalación.

Con los avances rápidos en los campos de la informática y de control de sistemas en las últimas décadas, la literatura ahora contiene muchos sistemas de

seguimiento solar, diseñados para optimizar su eficacia. En estos avances se ha buscado minimizar el error de incidencia o de seguimiento (Lee, 2009).

En la actualidad la gran mayoría de plantas de generación de energía limpia basadas en helióstatos y una torre central, se manejan por sistemas de lazo abierto, por su sencillez de control y por su menor costo (Lee, 2009). Por lo tanto el diseño de un esquema de control en lazo cerrado y el análisis del error causado por el mecanismo en el ángulo final es un gran reto a enfrentar.

La propuesta a desarrollar es el planteamiento de un esquema de control en lazo cerrado partiendo de un esquema de control en lazo abierto, realizando su simulación y experimentación en un prototipo de helióstato el cual fue diseñado en el Departamento de Ingeniería Industrial.

En la actualidad no existe mucha literatura sobre el manejo del error causado en el mecanismo de control para helióstatos. Ni el diseño del sistema de control para mecanismos de lazo cerrado. Por lo tanto se busca generar conocimiento sobre este tema.

1.4. Objetivo General

- Proponer un esquema de control de helióstatos de lazo cerrado, tomando como fundamento una estrategia de control en lazo abierto, el cual minimice el error en el punto focal en la torre.

1.5. Objetivos Específicos

- Contar con un algoritmo capaz de calcular las trayectorias del Sol durante los 365 días del año para realizar pruebas de simulación.
- Simular el error de seguimiento solar.
- Identificar el error producido en el sistema de control, durante determinadas horas del día.
- Contar con un algoritmo que minimice el error de seguimiento.

1.6. Hipótesis

Mediante un esquema de control en lazo cerrado se minimizará el error producido por el sistema de control de lazo abierto actual, según las simulaciones del modelo matemático de seguimiento solar.

1.7. Alcances y Delimitaciones

En el presente proyecto se harán pruebas en un prototipo de heliostato con el objetivo de proponer una estrategia de control en lazo cerrado. Se utilizará Matlab como herramienta de análisis para el sistema de seguimiento solar, así como para simular el desempeño ante el error de seguimiento; se propondrán mejoras desde el punto de vista del control para hacer más eficiente la operación del heliostato ante perturbaciones y se propondrá trabajo futuro para el proyecto. La implementación de la estructura de control no será parte de los objetivos del presente proyecto de tesis; los algoritmos desarrollados serán programados por investigadores especialistas del área del control en tiempo real que colaboran en el Proyecto del Campo de Prueba de Heliostatos.

1.8. Justificación

El presente proyecto se realiza con el fin de encontrar un esquema de control que minimice el error que presenta el mecanismo de posición angular. Se busca contribuir a la mejora en el desempeño de un prototipo de heliostato y con ello captar la mayor cantidad de energía posible y mejorar el sistema de control.

Al desarrollar un análisis de las diferentes posiciones del Sol con respecto al heliostato se contará con información disponible para futuras consultas; así mismo con datos adecuados para proyectos posteriores. Es importante mencionar que la información encontrada en este proyecto será la primera generada en América Latina sobre heliostatos, su sistema de control y la tecnología de torre central; lo cual es un paso muy importante para futuros proyectos y para la aplicación de tecnologías

verdes en México. Todos los elementos desarrollados para el presente proyecto son realizados por investigadores y estudiantes involucrados en el mismo.

Es importante contar con un estudio bien fundamentado sobre el comportamiento del mecanismo de control actual, para así, lograr proponer un esquema en lazo cerrado preciso.

Contar con un esquema en lazo cerrado tiene la ventaja de ofrecer información más exacta, con menos errores en el ángulo final y se tendrá la capacidad de tener control total sobre los movimientos del helióstato; con esto se busca mejorar el sistema de control y en consecuencia mejorar el desempeño.

A largo plazo se espera que, al contar con un sistema de control más eficiente, se minimicen costos por errores que no se podrían corregir con otra estrategia de control, dirigiendo con mayor exactitud el rayo solar y captando mayor cantidad de energía, con el beneficio que esto trae en la tecnología de torre central.

2. MARCO DE REFERENCIA

El cambio climático inducido por el humano es uno de los indicadores más significativos de que la sociedad se aleja cada vez más de una trayectoria sustentable. Se requiere una transformación importante de tal manera que se cubran las necesidades energéticas. Tal transformación incluye cambios en el sistema de producción, de consumo y de la estructura incentiva que forma el sistema económico actual (Pier, 2000). El uso de la energía solar como recurso para la producción de energía eléctrica apoya esta transformación necesaria para comenzar una trayectoria sustentable. En este capítulo se hablará sobre el recurso energético y su uso para la tecnología de helióstatos y torre central.

2.1. El Recurso Energético Solar en el Estado de Sonora

Sonora se conoce por su gran recurso solar, se caracteriza por su alta temperatura y escasa precipitación; aproximadamente en el 95% del territorio sonorense los climas son muy secos, secos o semisecos. Este tipo de climas, también llamados desérticos, se caracterizan por su precipitación inferior a los 400 mm al año y su temperatura media anual de 18.0° C a 26.0° C; son considerados muy extremosos (INEGI, 2011).

En Sonora no existe mucha información actualizada sobre la cantidad de energía solar o radiación solar que se recibe en la región, y sus posibles aplicaciones como un recurso renovable.

La comprensión de la naturaleza de la radiación solar y de su distribución permitirá desarrollar aplicaciones, especialmente relacionadas a la eficiencia en la conversión de energía solar a energía eléctrica. Así mismo hay una necesidad de estudiar la radiación solar, predecirla y maximizar sus usos como energía limpia en sustitución de combustibles fósiles (Wu et al, 2009).

2.1.1. Radiación Solar

Es la energía electromagnética emitida debido a la temperatura del Sol. Por su acción física y biológica las radiaciones solares se clasifican en: radiación de onda corta (ultravioletas, de acción germicida), de onda media (radiaciones visibles) y de onda larga (infrarrojas, de acción térmica). La atmósfera absorbe y difunde gran parte de las radiaciones; de las $1367 \text{ W/m}^2 \text{ min}$, que es la constante solar al límite de la atmósfera, llega a la superficie terrestre solamente una parte, en forma de radiación tanto difusa como directa. La distribución aproximada de esta radiación

- Con cielo claro, $997.61 \text{ W/m}^2 \text{ min}$ (80% directa; 20% difusa).
- Con cielo nuboso, $273.4 \text{ W/m}^2 \text{ min}$ (45% directa; 55% difusa).
- Con cielo cubierto, $95.69 \text{ W/m}^2 \text{ min}$ (100% difusa) (Puppo, 1999).

En la superficie del Sol hay una temperatura de 5762°K . En su interior, se ha calculado que existe una temperatura entre 8 y 40 millones de grados Kelvin (Villa et al, 2001).

Las principales mediciones de la radiación solar son:

- Radiación directa.
- Radiación difusa.
- Radiación total.

La radiación directa es la radiación recibida del Sol sin que haya sido dispersada por la atmósfera.

La radiación difusa es la radiación recibida del Sol después de que su dirección ha sido cambiada por la refracción de la atmósfera.

La radiación total es la suma de la radiación directa y difusa en una superficie.

La medida más común de la radiación total es la radiación total en una superficie horizontal, a la cual también se le conoce como radiación global.

La irradiancia es la potencia de energía radiante que incide sobre una superficie por unidad de área (Villa et al, 2001).

La energía solar ocupa uno de los lugares más importantes entre varias fuentes de energía alternativa. La estimación de la radiación solar es considerada como el elemento más importante para el diseño y desarrollo de los sistemas de energía solar, hacia la estimación de su eficiencia y de sus productos. La familiarización con la información de la radiación solar es un requisito previo para la modelación y el diseño de todos los esquemas fotovoltaicos y esquemas de energía solar térmica (Jakhrain Et al, 2010).

Los datos que se obtienen de radiación solar proporcionan información de cuánta energía solar impacta a una superficie en una localización en la Tierra durante un plazo particular. Los datos ofrecen valores de energía por unidad de área. Demostrando cambios naturales en la cantidad de radiación solar sobre el curso de los días, meses y años, estos datos determinan la cantidad de radiación solar para una localización. La cantidad de radiación solar que se recibe cambia a través del día y del año debido a los patrones de tiempo y la posición cambiante del Sol, los datos de la radiación solar reflejan esta variabilidad. Sabiendo la variabilidad, se pueden clasificar sistemas de almacenaje que puedan proporcionar energía en la noche y durante períodos nublados. Las nubes son la condición atmosférica predominante que determina la cantidad de radiación solar que alcance la Tierra. Para cualquier localización dada, la radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra disminuye con el aumento de la cubierta de nube (National Renewable Energy Laboratory, 1991).

La contaminación atmosférica urbana, el humo de los incendios forestales, y la ceniza aerotransportada que resulta de la actividad volcánica reducen el recurso solar, aumentando la dispersión y la absorción de la radiación solar. Esto tiene un impacto más grande en la radiación que viene en línea directa del Sol que en la radiación solar total. Algo de la radiación directa se dispersa hacia la Tierra y se llama radiación difusa (global = directa + difusa). Por lo tanto, los concentradores que utilizan la radiación solar directa se afectan más al contrario que los colectores que utilizan la radiación solar global. En un día con el aire seriamente contaminado, la

radiación solar directa se puede reducir por el 40%, mientras que la radiación solar global es reducida del 15% al 25% (National Renewable Energy Laboratory, 1991).

2.1.2. Comparación de Sonora con otros Países Referente a Radiación Solar

México presenta ventajas importantes para la aplicación de la tecnología solar, pueden ser clasificadas como: geográficas al estar cerca del ecuador y recibir con menor inclinación los rayos solares y abundancia de recurso solar al poseer valores de irradiación solar de los mayores del mundo (Cabanillas, 2008).

En México se tienen valores de irradiación elevados. En la Figura 2.1, se presentan valores de Radiación Solar Global en kWh/m², se puede observar que México se encuentra en la franja de 1700 a más de 2100, que son de los valores más altos del mundo. Si se comparan los valores anteriores, por ejemplo con los valores de los países europeos, se tienen mínimo el 25% más cantidad de radiación solar disponible (Cabanillas, 2008).

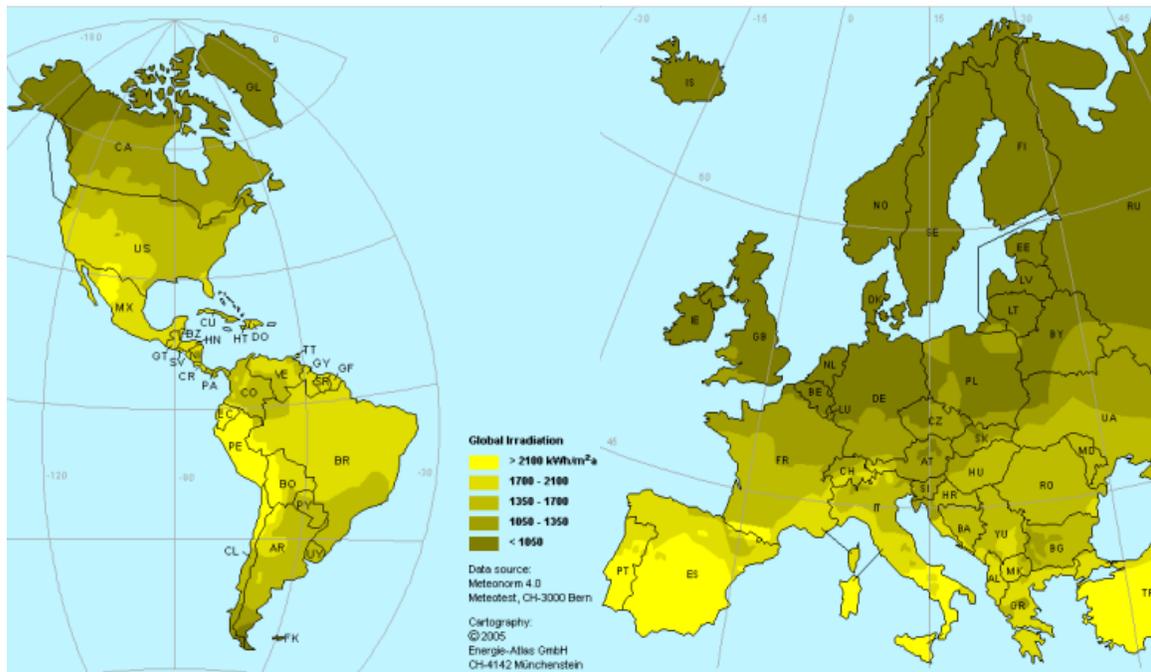


Figura 2.1. Mapas de radiación solar de México y Europa.

Sonora es una región semiárida al norte de México, con abundante recurso solar. Es una de las regiones no solo de México sino también del mundo, que cuenta con mayor incidencia de rayos solares. Con mediciones y estudios realizados en la *UNISON* se ha determinado que la irradiación solar global horizontal anualizada para Sonora tiene valores entre 5.1 a 6.1 kWh/m²-día. Estos son valores realmente altos si consideramos que en el verano el valor diario promedio mensual para la ciudad de Hermosillo es de alrededor de 9 kWh/m²-día (Cabanillas, 2008).

Se ha determinado que de las 11 de la mañana a las 6 de la tarde, durante los meses de marzo a octubre, llega un promedio de 550 a 600 watts por cada m² de área de radiación solar. Lo cual confirma que se recibe mucha radiación solar en el área (Muñoz, 2006).

2.1.3.Tendencias Globales de Energía Renovable

Las fuentes renovables son: la energía solar y sus manifestaciones como el viento, que es producto de un calentamiento desigual de la Tierra por parte de la radiación solar; la hidráulica, que tiene su origen en la evaporación, también por la acción del calor solar, del agua de los océanos, lagos y ríos, encharcamientos, etcétera, y su posterior condensación y caída en forma de lluvia; la biomasa, que es materia orgánica que está formada por arbustos, árboles, pastos, cultivos, residuos orgánicos, etcétera, que se nutrieron con la participación de la energía del Sol; el oleaje marino, que es a su vez ocasionado por el viento, entre otras. La energía geotérmica y la de las mareas también se consideran renovables, aunque son quizás, junto con los combustibles nucleares, las únicas fuentes energéticas que no tienen su origen en el Sol. Aún el petróleo y sus derivados, así como el carbón mineral, se formaron durante millones de años a partir de la fosilización de biomasa en procesos energéticamente muy poco eficientes (Rincón, 1999).

La energía renovable puede satisfacer fácilmente dos veces la magnitud de la demanda energética del mundo, muchos gobiernos del mundo están subsidiando la conservación de la energía, el desarrollo de la energía renovable y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Lior, 2010).

Para todo propósito práctico, la energía solar es inagotable. La irradiación total anual en toda la Tierra llega a cantidades mayores a 1 billón de terawatts hora. Eso es más que 60 000 veces la demanda de energía global. Comparado con otras energías renovables rinde el producto de energía más alto por área (Schnatbaum, 2009).

La energía solar tiene la densidad de energía más alta de todas las fuentes de energía renovable, y cada 10 km² en Oriente Medio y África del Norte rinde un equivalente de energía de 15 millones de barriles de aceite combustible por año en forma de energía solar (Schnatbaum, 2009).

En las energías renovables muchas de sus técnicas de conversión son imprevisibles o intermitentes en su capacidad de producir energía, por lo tanto requieren de tecnologías de almacenaje para atenuar la naturaleza errática de esta producción de energía y lograr ser una alternativa viable (Harell and Daim, 2009).

Dentro del ramo de almacenaje de energía hay muchas tecnologías disponibles pero solo unas pocas son técnicamente factibles como tecnología complementaria de la energía renovable basado en la cantidad y calidad de la energía que es almacenable junto con otros factores tales como tiempo de reacción y duración de la carga (Harell and Daim, 2009).

2.2. Helióstatos en el Marco de las Energías Renovables

Una manifestación del recurso energético renovable es la energía solar, la cual si es concentrada por superficies reflejantes, incrementa su densidad energética dramáticamente. Esto permite alcanzar altas temperaturas al captar el calor solar, que puede entonces ser transferido a los fluidos térmicos, para luego ser utilizado para generar electricidad en alternadores eléctricos a partir de ciclos térmicos. Estas tecnologías son conocidas genéricamente como *Sistemas de Concentración Solar para la Generación de Potencia Eléctrica*, o *CPS* (de las siglas de *Concentradores de Potencia Solar*), y comprenden tres categorías: sistemas de canales parabólicos, sistemas de torre central y sistemas de plato parabólico con máquinas Stirling (Kearney, 2005).

Los sistemas de canales parabólicos tienen largos espejos cilíndrico-parabólicos montados en filas para calentar el fluido que corre en unos tubos receptores mantenidos precisamente a lo largo de su línea focal, ya sea por ajuste de la posición del espejo o del tubo receptor. El fluido líquido es entonces transformado rápidamente en vapor, y es enviado a una turbina convencional (pero de baja temperatura) conectada a un generador eléctrico. Los Sistemas de Torre Central cuentan con campos de espejos (llamados *helióstatos*) que enfocan su energía en la parte superior de una torre colocada al centro de su campo, donde la energía se

capta y conduce en un fluido con muy alta temperatura hacia un generador térmico de potencia, para que así, el sistema de seguimiento solar proceda a generar energía eléctrica (Kearney, 2005).

2.2.1. Antecedentes de Helióstatos

Los sistemas de energía solar dependen fundamentalmente de la cantidad de energía capturada por concentradores, de ahí, la importancia de desarrollar dispositivos capaces de seguir la trayectoria del Sol a lo largo del día durante todo el año. Estos sistemas han recibido especial atención en la literatura. Por ejemplo varios esquemas han sido propuestos para optimizar el ángulo de inclinación y la orientación de colectores solares diseñados para diferentes latitudes geográficas o posibles periodos de utilización (Lee, 2009).

Con los avances rápidos en la tecnología y en los sistemas de control, la literatura contiene sofisticados sistemas de seguimiento solar diseñados para maximizar la eficiencia de los sistemas térmicos solares y fotovoltaicos (Lee, 2009).

Relativamente pocos helióstatos se han fabricado hasta la fecha, y su costo de producción es alto. A medida que crezca la demanda de energía solar se desarrollarán métodos de producción en masa de helióstatos, de tal manera que reducirán perceptiblemente su costo (la evidencia real de esto se ha observado en la industria de los sistemas de canal parabólico). Actualmente las investigaciones se conducen a desarrollar técnicas de fabricación baratas para estructuras comerciales de bajo volumen.

Debido a que el campo de helióstatos representa la inversión de capital más grande de una planta de torre central, se requieren adelantos en la tecnología para mejorar la capacidad de fabricación, reducción de costos, y aumentar la vida de servicio del helióstato. Particularmente, es necesario un sistema barato de transmisión en acimut y elevación.

El desarrollo de los helióstatos muestra una clara evolución desde los primeros prototipos, con una estructura pesada y rígida, con espejos de vidrio de segunda superficie y área reflejante en el entorno de los 40 m², a los más recientes,

mucho más ligeros de peso, de mayor superficie y de más bajo costo, con una mayor variedad de materiales reflejantes a base de espejos de bajo contenido en hierro o polímeros con la superficie anterior plateada. En la Figura 2.2, se observa algunos de estos cambios en la estructura. Históricamente se han perfilado dos líneas perfectamente definidas en el desarrollo de los heliostatos, siempre encaminadas a obtener un costo más bajo sin reducir el rendimiento (Osuna & Cerón, 1999):

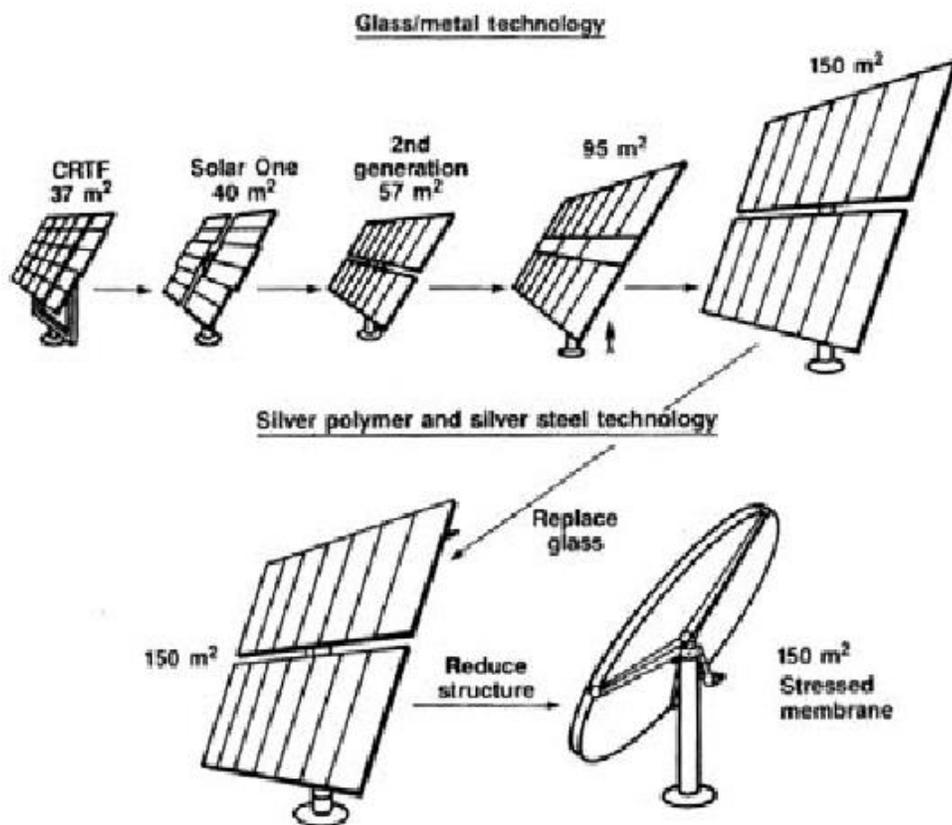


Figura 2.2. Evolución histórica en el desarrollo de heliostatos.

La primera línea está encaminada hacia configuraciones de heliostatos a base de facetas y de grandes superficies de más de 100 m^2 , con las correspondientes reducciones en el precio por m^2 de estructuras, mecanismos, cableado y cimentaciones. La desventaja de ello es que a mayor tamaño de los heliostatos, mayores problemas ópticos y mayores problemas de lavado, además de mucho mayores cargas de viento. La segunda la originan los heliostatos con nuevos materiales reflejantes, como es el caso de los de membrana tensionada (heliostatos

con una superficie metálica muy fina tensada desde un anillo que, a su vez soporta a la propia membrana) (Osuna & Cerón, 1999).

Hasta ahora, la experiencia acumulada se circunscribe a los helióstatos, convencionales, con espejos de vidrio. Alrededor del 95% de las plantas de energía solar, utilizan este tipo de heliostatos.

La reflectividad promedio anual de un campo de helióstatos está entre el 85% y el 90%. Puede variar ligeramente al alza en función de las características de la superficie reflejante y algo más a la baja, en función del grado de limpieza. El mecanismo de accionamiento y las facetas suponen un 66% del total en el costo de un helióstato, mientras que en el costo de las facetas el precio del espejo puede llegar a suponer un tercio del total, siendo pues éste un aspecto a optimizar. De todos los elementos, el mecanismo de accionamiento es el más sensible en costo al área del helióstato.

2.2.2. Tecnología de la Torre Central

Las plantas de torre central generan energía eléctrica a partir de la luz del Sol, centrando la radiación solar concentrada en un receptor. Dichos sistemas utilizan de centenares a millares de helióstatos (Csanyi, 2008). En la Figura 2.3 se muestra un sistema de torre central.

El flujo de calor concentrado en el receptor debe de ser controlado de manera precisa para crear una segura y eficiente conversión de energía solar a energía usable (Herbert & Mutone, 1980).

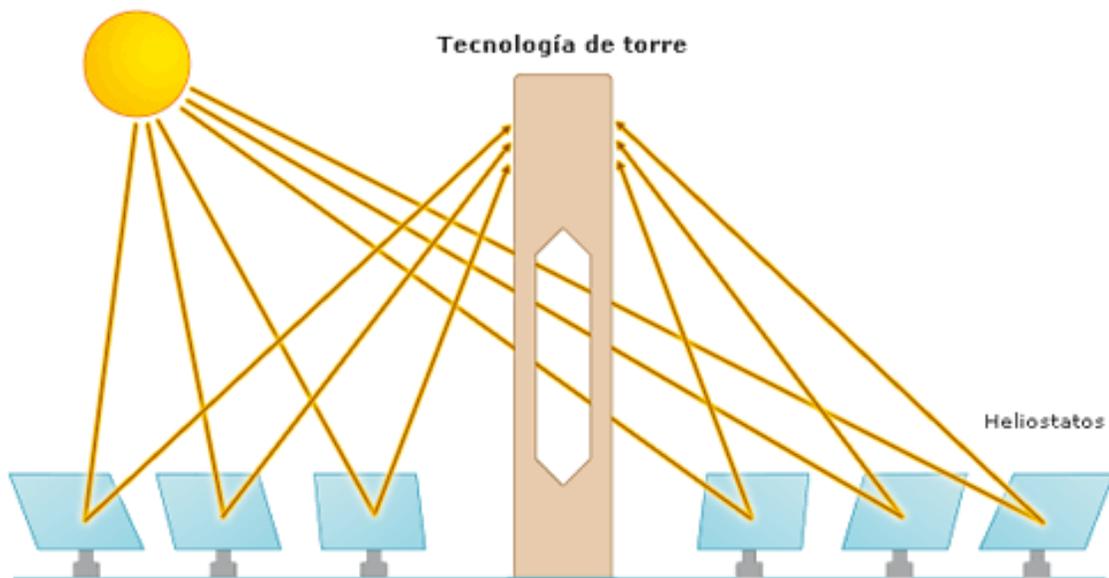


Figura 2.3. Tecnología de torre central.

En una torre central que opera con sales fundidas como fluido térmico, la sal líquida a 290°C se bombea desde tanque de almacenaje “frío”, a través del receptor donde se calienta a 565°C y entonces es bombeada a un tanque de almacenamiento en “caliente”. Cuando se necesita energía de la planta, la sal caliente se bombea a un sistema generador de vapor sobrecalentado. Del generador de vapor, la sal se vuelve al tanque frío donde se almacena y se recalienta eventualmente en el receptor. Determinar el tamaño óptimo de almacenaje para conocer los requisitos de energía es una parte importante del proceso de diseño del sistema. Los tanques de almacenaje se pueden diseñar con suficiente capacidad de accionar una turbina hasta por 13 horas.

En una instalación típica, la colección de energía solar ocurre a un grado que excede el máximo requerido para proporcionar el vapor a la turbina. Por lo tanto, el sistema térmico de almacenaje puede ser cargado a la vez que la planta está produciendo energía en su capacidad total. El cociente de energía térmica proporcionada por el sistema colector (el campo y receptor de heliostatos) al máximo de energía térmica requerida por el generador se le llama el múltiplo solar. Con un

múltiplo solar de aproximadamente 2.7, una torre con sal fundida localizada en el desierto de Mojave, California (con condiciones muy parecidas al desierto de Sonora) puede ser diseñada con un factor de capacidad anual cerca del 65% (Csanyi, 2008). Por lo tanto, una torre de energía podría funcionar potencialmente el 65% del año sin la necesidad de una fuente de reserva de combustible. Sin el almacenaje de energía, las tecnologías solares se limitan a los factores de capacidad anual cerca del 25%.

El almacenaje de energía y la capacidad de distribuir energía son muy importantes para el éxito de la tecnología solar de torre central, y se cree que la sal fundida es la clave para un costo de almacenaje de energía eficaz. En la Figura 2.4 se muestra un diagrama esquemático de las trayectorias de flujo primario de una planta.

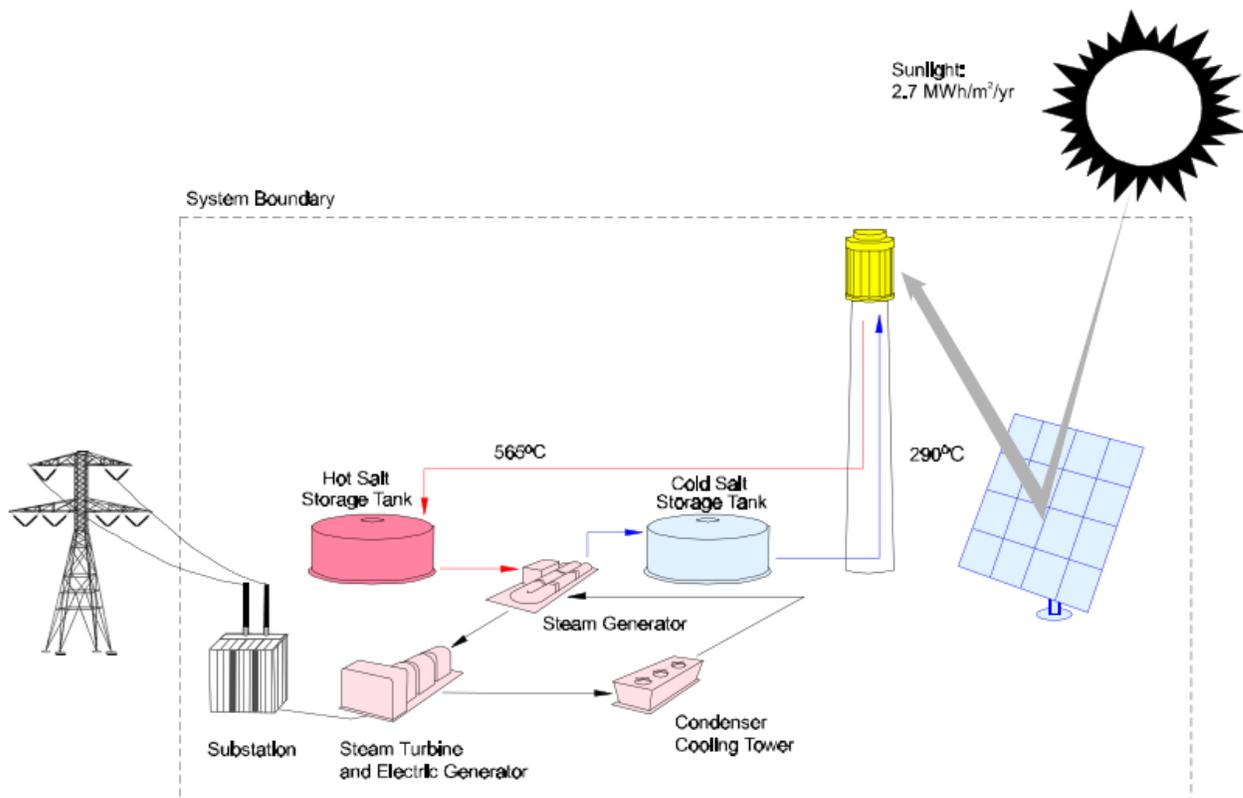


Figura 2.4. Esquema de un sistema de torre de energía de sal fundida.

Las torres centrales deben ser grandes para ser económicas. Las plantas de torre central no son modulares y no pueden ser construidas en tamaños más

pequeños que plantas de disco o de canal parabólico y ser económicamente competitivas, pero utilizan un bloque de energía convencional y pueden entregar fácilmente energía a la red eléctrica cuando el almacenaje está disponible. Debido a su excelente disponibilidad de radiación solar directa, el noroeste de México (Sonora, Baja California, Chihuahua y Durango) es ideal para la tecnología de torre central. Esto es comparable a algunos sitios de los Estados Unidos, Australia, Chile, Sudáfrica y el norte de África y Oriente Medio.

Aunque las torres centrales sean comercialmente menos maduras que los sistemas de canal parabólicos, un número de componente y de sistemas experimentales se han probado en todo el mundo en los últimos 15 años, demostrando la viabilidad de la ingeniería y el potencial económico de la tecnología (Csanyi, 2008). En la Figura 2.5 se muestra un esquema de un canal parabólico y disco parabólico.

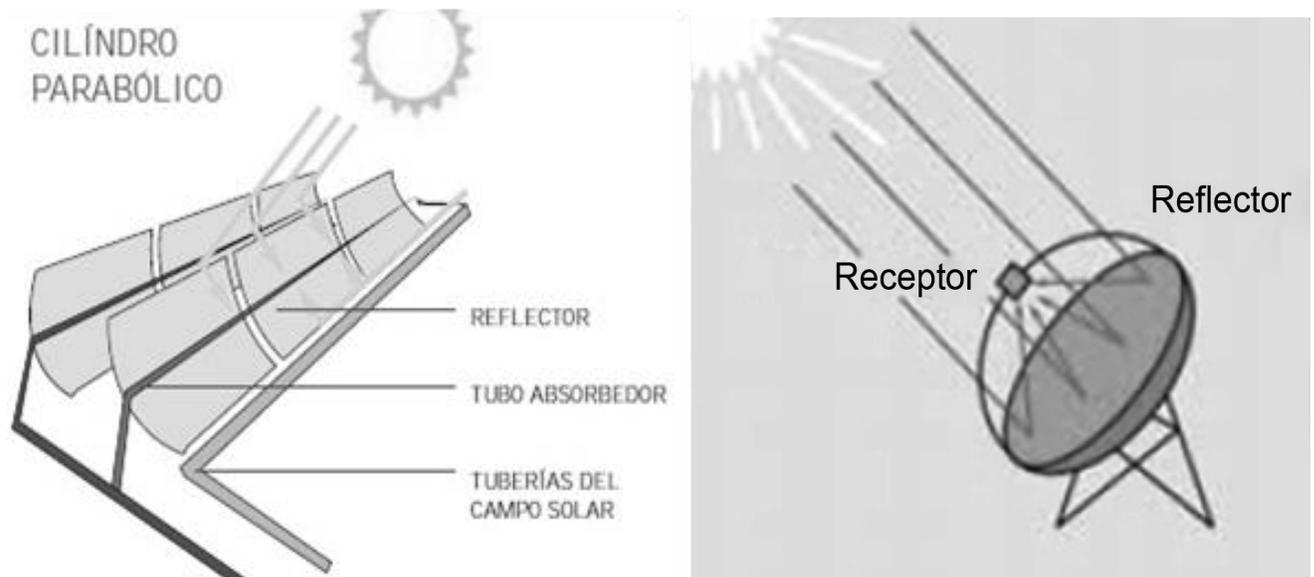


Figura 2.5. Canal parabólico y disco parabólico.

2.2.3. Otras Tecnologías de Aprovechamiento de la Energía Solar

La energía es esencial para nuestra sociedad, asegurar nuestra calidad de vida y sostener el resto de los elementos de nuestra economía. Las tecnologías de energía renovable ofrecen la promesa de la energía limpia, abundante recolectada de recursos renovables tales como el sol, viento, tierra, y plantas (Stanley R., 2001).

De Groot (2008) menciona dos métodos para la utilización de la energía solar en Nueva Zelanda, uno es el diseño solar pasivo y el otro diseño solar activo, donde busca la combinación de los dos en un edificio para reducir el consumo de energía convencional. El diseño solar pasivo, no solo busca el posicionamiento óptimo de ventanas y tragaluces. Se debe de prestar gran atención al lugar y localización del edificio en términos de clima, orientación solar, bloqueadores solares y sombras. Además, el diseño del edificio debe ser compacto para reducir la superficie externa y minimizar la pérdida de calor.

Un diseño solar activo utiliza equipo adicional como módulos fotovoltaicos. Estos dispositivos utilizan energía externa y, por lo tanto se clasifican como tecnologías solares activas, que se utilizan para convertir energía solar en energía térmica y electricidad usable o para provocar el movimiento del aire para la ventilación y refrescar el ambiente (*De Groot, 2008*). En la Figura 2.6 se muestra un sistema solar pasivo y activo.

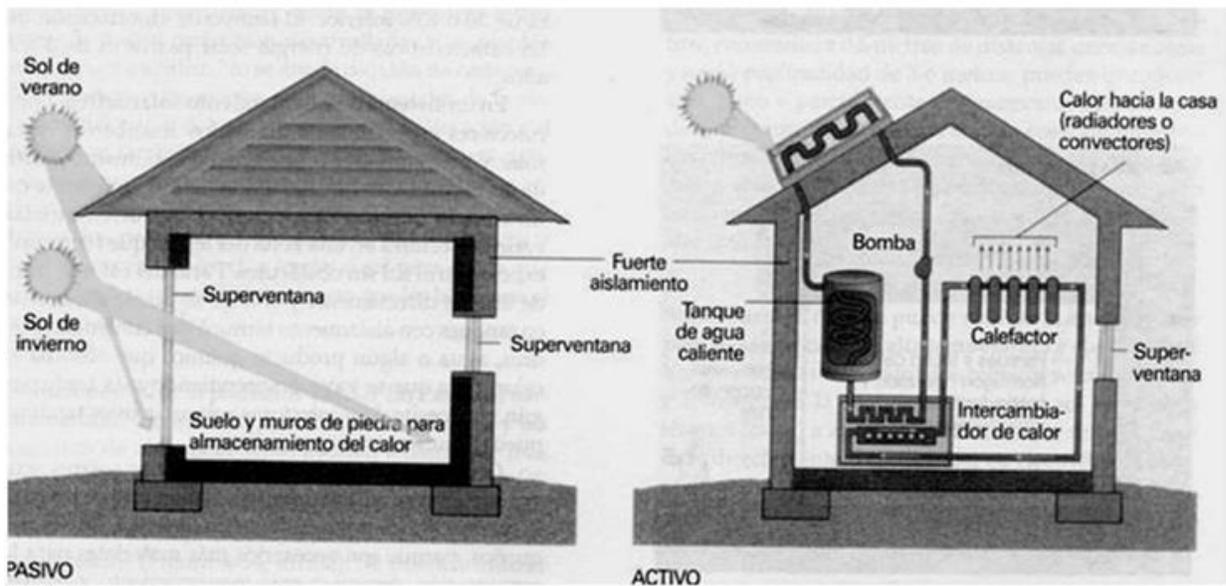


Figura 2.6. Sistema solar pasivo y activo.

Una tecnología solar activa es un sistema solar térmico, también conocido como colector, el cual transforma la radiación solar a energía térmica y usa energía adicional o equipo mecánico como una bomba para hacer circular agua o algún otro líquido de transporte térmico. Otro equipo de diseño activo es un generador fotovoltaico, conocido también como módulo solar. Un generador transforma la radiación solar directamente a energía eléctrica y puede ser utilizada inmediatamente (De Groot, 2008).

Las celdas fotovoltaicas se caracterizan por su alto costo, lo cual por el momento representa la principal limitación para su empleo masivo. Sin embargo, para algunas aplicaciones específicas, como el suministro de energía de estaciones meteorológicas remotas, o la iluminación de viviendas lejanas a la red de distribución eléctrica, resultan la opción más conveniente (Rincón Mejía, 1999). En la Figura 2.7 se muestra un sistema fotovoltaico y alguna de sus aplicaciones.

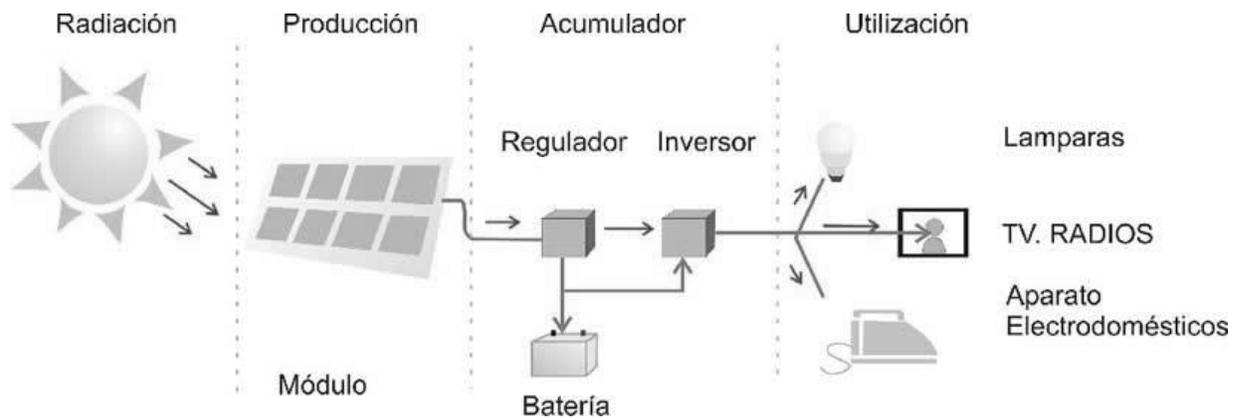


Figura 2.7. Sistema fotovoltaico.

Existen también otros sistemas de diseño solar activo, que pueden reducir el consumo de la energía convencional. Uno de estos sistemas es una bomba de ciclo de calor que recupera calor del aire de un extractor y reduce al mínimo las pérdidas de calor por medio de un sistema de ventilación. Eso lleva a un alto rendimiento energético y reduce la pérdida de energía (De Groot, 2008).

En México, es común la utilización de colectores planos de diversos diseños para la producción de agua caliente para usos domésticos en el baño y la cocina, por ejemplo. Esta tecnología ayuda a ahorrar gas. En tanto que en países como Japón o Israel, es obligatorio el empleo doméstico de este tipo de colectores, en México se siguen instalando entre 600 y 700 mil calentadores de gas cada año (Rincón Mejía, 1999). En la Figura 2.8 se muestra un sistema de circulación activa y pasiva, a base de colectores. La circulación pasiva se basa en la gravedad y la flotabilidad térmica para conducir el agua, la circulación activa utiliza una bomba para proporcionar mecánicamente la circulación del agua.

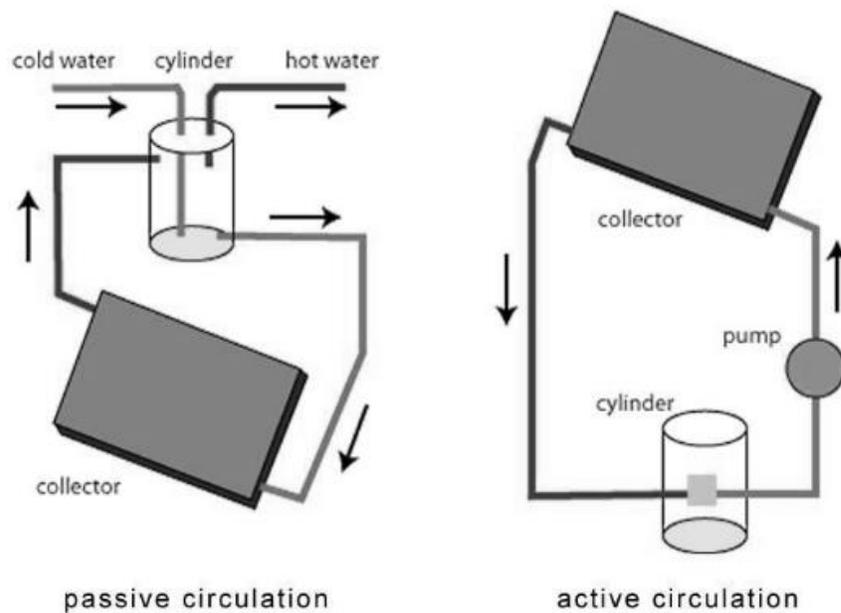


Figura 2.8. Sistema de circulación activo y pasivo a base de colectores.

2.3. Análisis Matemático

En esta sección se discutirá sobre el modelo matemático utilizado para calcular las posiciones del Sol, el problema presentado al transformar los ángulos característicos a pasos discretos del motor y la propuesta de control presentada; así como el esquema de control de lazo cerrado, y su aplicación.

2.3.1. Trayectoria del Sol

Los puntos en la superficie de la Tierra están definidos en términos de longitud y latitud (Figura 2.9). La latitud de un punto P es el ángulo entre el radio dibujado desde el punto al centro de la Tierra y un radio dibujado desde el centro de la Tierra al Ecuador (donde 0° es la latitud de cualquier punto en el Ecuador). La longitud de un punto es el ángulo entre el meridiano Greenwich y el meridiano que pasa por el punto, (ITACA, 2005).

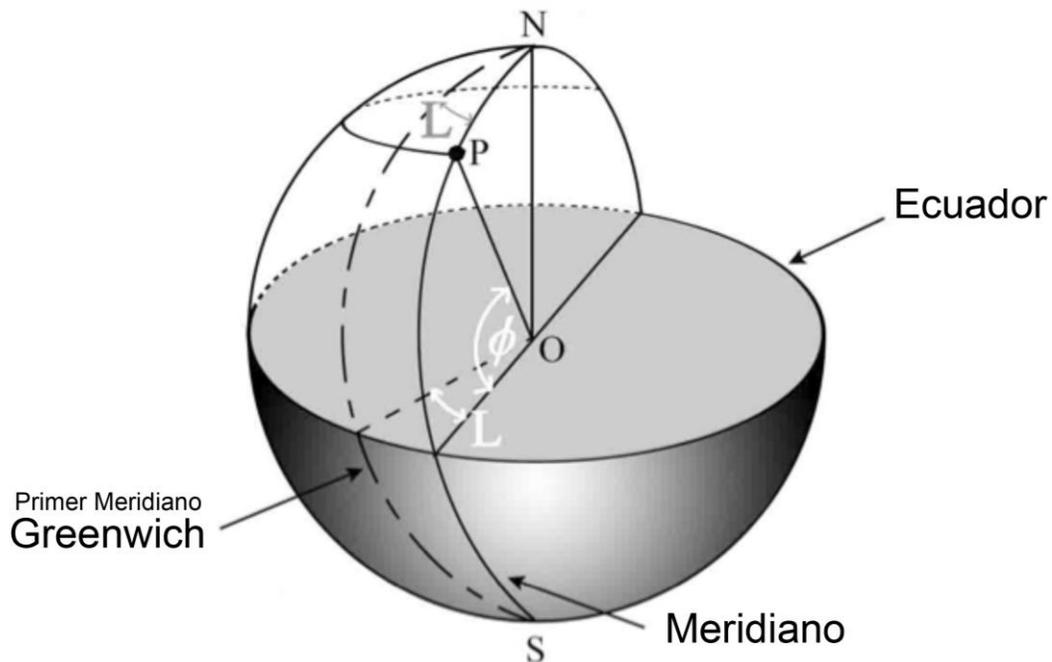


Figura 2.9. Longitud y latitud de un punto *P* en la superficie de la Tierra.

El eje de rotación de la Tierra se inclina un ángulo de 23.45° con respecto al plano de la órbita alrededor del Sol. Este eje se orienta de modo que siempre apunta hacia la Estrella Polar, esto explica las estaciones y los cambios a lo largo del día a través del año.

El ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que une los centros del Sol y la Tierra se llama ángulo de declinación (δ) (ver figura 2.10). El eje de rotación de la Tierra siempre apunta a la Estrella Polar por lo tanto el ángulo de declinación cambia a medida que la Tierra orbita alrededor del Sol (ITACA, 2005).

En el solsticio de verano (21 de junio) el eje de la Tierra está orientado hacia el Sol, por lo tanto el ángulo de declinación es 23.45° . Todos los puntos por debajo de 66.55° de latitud sur tienen 24 horas de oscuridad y todos los puntos por arriba de 66.55° de latitud norte tienen 24 horas de luz de día. En este día en particular el Sol está arriba del mediodía solar en todos los puntos en el trópico del cáncer. En el solsticio de invierno (21 de diciembre) el eje de la Tierra se orienta lejos del Sol, por lo tanto el ángulo de la declinación es -23.45° . Todos los puntos por debajo de 66.55°

latitud sur tienen 24 horas de luz de día y todos los puntos por sobre 66.55° latitud norte tienen 24 horas de oscuridad. En este día el Sol está directamente arriba del mediodía solar en todos los puntos en el trópico del Capricornio. En los equinoccios otoñales y vernaes (23 de septiembre y 21 de marzo respectivamente) el eje de la Tierra está a 90° de la línea que une los centros de la Tierra y del Sol, por lo tanto el ángulo de la declinación es 0° . Todas las latitudes tienen 12 horas de luz de Sol y el Sol está directamente arriba del mediodía solar para todos los puntos en el ecuador. El Sol nunca está directamente arriba fuera de las zonas tropicales (ITACA, 2005).

La posición del Sol en el cielo visto desde cualquier punto en la superficie de la Tierra se puede definir usando una variedad de ángulos. El ángulo de declinación (δ) y el ángulo de la hora solar (ω), definido más fácilmente desde una vista detrás de la Tierra, esto se muestra en la Figura 2.10 (ITACA, 2005).

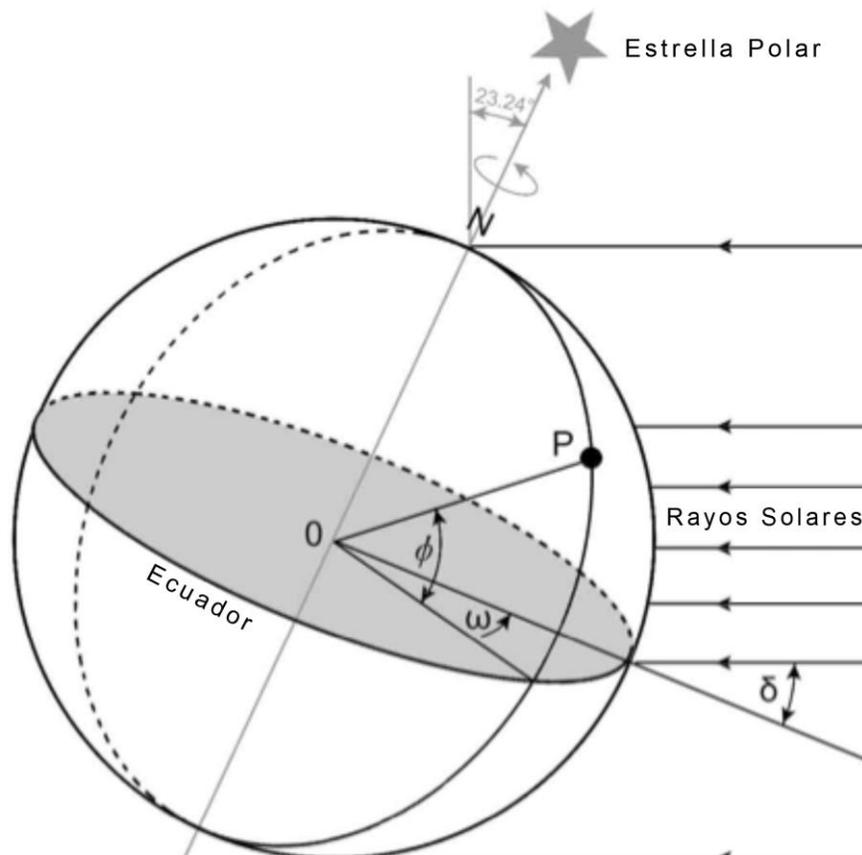


Figura 2.10. Ángulo de declinación (δ), latitud (ϕ), hora solar (ω) desde un punto P.

El ángulo de la hora solar desde un punto P en la superficie de la Tierra es el ángulo entre el meridiano que contiene el punto P y el meridiano que es paralelo a los rayos del Sol. El ángulo de la hora solar es negativo durante la mañana, se vuelve cero al mediodía solar (cuando el punto P hace frente al Sol) y llega a ser cada vez más positivo mediante progresa la tarde. Se puede observar que el ángulo de la hora solar en cualquier hora particular es igual para todos los puntos en cualquier meridiano (es decir señala con la misma longitud). Puesto que la Tierra termina una revolución cada 24 horas, el ángulo de la hora solar cambia $(360/15) 15^\circ$ cada hora (ITACA, 2005).

Más ángulos se definen considerando la trayectoria del Sol a través del cielo visto desde el punto P en la superficie de la Tierra (ITACA, 2005).

El **ángulo de declinación** es el mismo para todo el globo en cualquier día. El periodo de una revolución completa de la Tierra alrededor del Sol no coincide exactamente con el año civil, por lo que la declinación varía levemente para un mismo día año tras año.

Un método para calcular la declinación es: Los valores diarios de la declinación solar pueden calcularse con un error máximo de 0,0006 rad., mediante una fórmula obtenida por Spencer (Atlas de Radiación Solar de Colombia, 1990).

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \alpha + 0,070257 \sin \alpha - 0,006758 \cos 2\alpha + 0,000907 \sin 2\alpha - 0,002697 \cos 3\alpha + 0,00148 \sin 3\alpha) (180/\pi)$$

α = posición angular de la Tierra en la órbita.

$$\alpha = \frac{2\pi(nd - 1)}{365} \quad (2.1)$$

nd = número del día del año.

El ángulo de la hora solar es positivo durante la mañana, se vuelve cero al mediodía solar y llega a ser cada vez más negativa mientras progresa la tarde. Dos ecuaciones se pueden utilizar para calcular el ángulo de hora cuando se saben

varios ángulos (δ cambia de día a día, y α , A cambian con el tiempo a través del día) (ITACA, 2005).

$$\sin \omega = \frac{\sin \alpha - \sin \delta \sin \theta}{\cos \delta} \quad (2.2)$$

$$\sin \omega = \frac{\sin \alpha - \sin \delta \sin \theta}{\cos \delta \cos \theta} \quad (2.3)$$

donde:

ω = ángulo solar

α = altitud

Az = Acimut

δ = declinación

ϕ = latitud del observador.

En el sistema ecuatorial, la posición de Sol está determinada por la declinación (δ) y el ángulo horario (ω). El ángulo horario es el ángulo formado en el polo por la intersección entre el meridiano del observador y el meridiano del Sol; se expresa en unidades de arco (grados) o en unidades de tiempo (horas); su conversión es: 1 hora = 15° (Atlas de Radiación Solar de Colombia, 1990).

La Tierra por su comportamiento puede considerarse como un gran imán permanente. Los puntos en los que las líneas de fuerza del campo magnético terrestre entran y salen de la Tierra se denominan: Polos magnéticos (Figura 2.11).

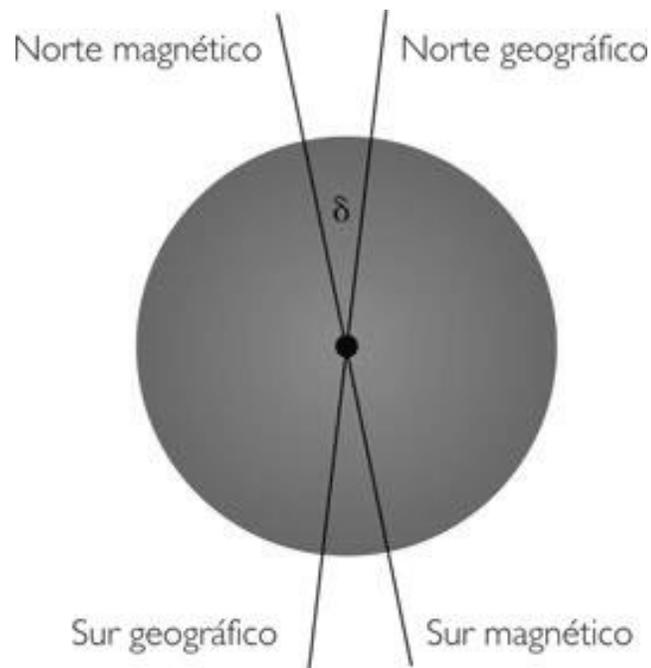


Figura 2.11. Polos magnéticos y polos geográficos.

Polo norte magnético: es aquel más cercano a la Estrella Polar, y donde entran las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. **Polo sur magnético:** es el más alejado de la Estrella Polar, y por donde salen las líneas de fuerza del campo magnético terrestre.

El polo norte geográfico no coincide con el polo norte magnético, porque uno está indicado por el eje de rotación y el otro por el campo magnético (ITACA, 2005).

El ángulo entre el norte magnético y el norte geográfico es llamado declinación magnética, en la Figura 2.12 se muestran los polos y declinación magnética. Ya que ambos polos distan entre sí varios kilómetros, dependiendo de nuestra ubicación, puede representar una considerable diferencia al tratar de coincidir la lectura de nuestra brújula con el mapa.

Otro aspecto importante es que la declinación varía. La posición de los polos magnéticos no permanece fija, sino que cambia describiendo, según unos, una órbita alrededor de los polos geográficos, y según otros un movimiento en forma de espiral.

Cada año el polo norte magnético se desplaza unos 25 km hacia el norte y unos 5 km hacia el oeste. Como consecuencia de este desplazamiento la declinación en los distintos puntos de la Tierra varía con el tiempo. A la variación anual de la declinación magnética en un punto dado es a lo que llamamos variación magnética (ITACA, 2005).

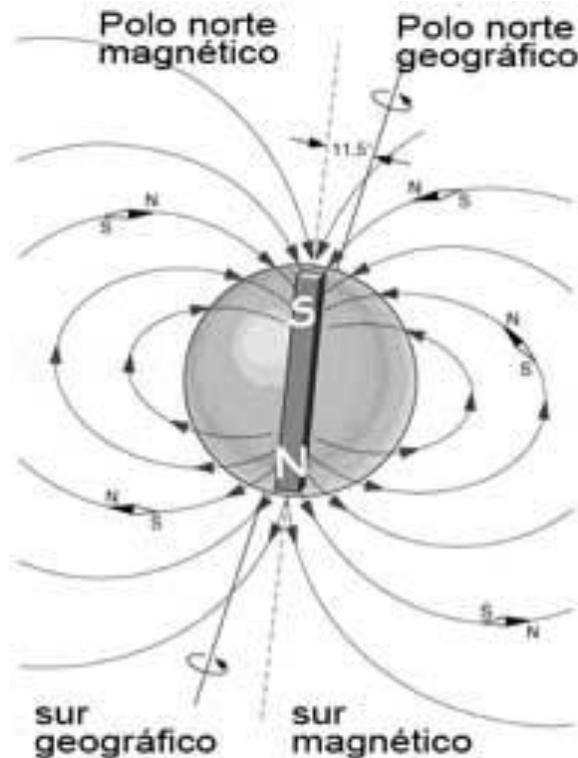


Figura 2.12. Polos magnéticos y declinación magnética.

2.3.2. Problema de Seguimiento Solar

Existen diferentes tipos de seguimiento solar, los cuales se pueden clasificar en dos grupos, complejos y simples. El primero es más preciso ya que dada una ubicación, y el instante de observación, calcula la declinación, la ecuación del tiempo y las coordenadas de acimut y elevación en algunos casos. El segundo es más sencillo y menos preciso ya que estima parámetros básicos de la posición del Sol, como son la declinación o la ecuación del tiempo. A través de los años se han desarrollado diferentes algoritmos y fórmulas usadas para calcular las coordenadas

del Sol en base al número de día del año, se considera que estas fórmulas contienen un error, el cual se presenta en minutos de arco. En los algoritmos donde se aplica el día del año como un número entero se introduce un error en la declinación solar, se debe de considerar que el día del año varía continuamente a través del tiempo.

Diferentes autores presentan fórmulas o algoritmos basados en ecuaciones de otros científicos, en la búsqueda de mayor exactitud se han complementado, agregando ecuaciones más precisas, se han agregado variables meteorológicas entre otros parámetros. Un ejemplo de esto es, la estimación de errores que se presentan, por el suceso de fenómenos naturales que afectan la posición del Sol, o el cálculo del día del año considerando cuando sea un año bisiesto.

El fin ha sido encontrar un algoritmo que como resultado ofrezca una posición más precisa y que pueda dar frente a diferentes situaciones meteorológicas o astronómicas.

2.3.3. Aproximaciones y Errores de Redondeo

Los errores numéricos surgen del uso de aproximaciones para representar operaciones y cantidades matemáticas exactas. Estas incluyen los errores de redondeo que se producen cuando se usan números que tienen un límite de cifras significativas para representar números exactos. La relación entre el resultado exacto, o verdadero, y el aproximado está dada por.

$$\text{Valor verdadero} = \text{Aproximado} + \text{error} \quad (2.4)$$

Redondeando la ecuación (2.4) se encuentra que el error numérico es igual a la diferencia entre el valor verdadero y el valor aproximado, es decir

$$E_t = \text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado} \quad (2.5)$$

Donde E_t se usa para denotar el valor exacto del error. El subíndice t indica que se trata del error “verdadero” (true). Esto contrasta con otros casos, donde se debe de emplear una estimación “aproximada” del error.

Una desventaja en esta definición es que no toma en consideración el orden de la magnitud del valor que se estima. Una manera de tomar en cuenta las magnitudes de las cantidades que se evalúan consiste en normalizar el error respecto al valor verdadero, es decir

$$\text{Error relativo fraccional verdadero} = \frac{\text{Error verdadero}}{\text{Valor verdadero}} \quad (2.6)$$

El error relativo también se puede multiplicar por 100% para expresarlo como

$$\varepsilon_t = \frac{\text{Error verdadero (100\%)}}{\text{Valor verdadero}} \quad (2.7)$$

donde ε_t denota el error relativo porcentual verdadero.

En los métodos numéricos, el valor verdadero sólo se conocerá cuando se tengan funciones que se resuelvan analíticamente. Éste comúnmente será el caso cuando se estudie el comportamiento teórico de una técnica específica para sistemas simples. Sin embargo, en muchas aplicaciones reales, no se conoce a priori la respuesta verdadera. Entonces en dichos casos, una alternativa es normalizar el error, usando la mejor estimación posible al valor verdadero; es decir, para la aproximación misma, como en

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\text{Error aproximado (100\%)}}{\text{Valor Aproximado}} \quad (2.8)$$

donde el subíndice α significa que el error está normalizado a un valor aproximado.

Uno de los retos que enfrentan los métodos numéricos es el de determinar estimaciones del error en ausencia del conocimiento de los valores verdaderos. Por ejemplo, ciertos métodos numéricos usan un método iterativo para calcular los resultados. En tales métodos se hace una aproximación considerando la aproximación anterior. Este proceso se efectúa varias veces, o de forma iterativa, para calcular en forma sucesiva, esperando cada vez mejores aproximaciones. Por lo tanto, el error relativo porcentual está dado por

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\text{Aproximación Actual} - \text{Aproximación Anterior (100\%)}}{\text{Aproximación Actual}} \quad (2.9)$$

2.4. Actuadores

Uno de los componentes importantes de un sistema de control es el actuador. En esta sección se detallarán los aspectos generales de los actuadores y particularmente del usado en el prototipo de heliostato.

Los actuadores son los dispositivos que se usan para producir un movimiento o acción final. Ese movimiento o acción se puede aplicar a cualquier elemento, desde un simple átomo hasta una gran estructura articulada; y se crea mediante una fuerza o momento de torsión que resulta en aceleración y desplazamiento, por ejemplo. Los actuadores producen cambios físicos como desplazamiento lineal y angular. También modulan la tasa y potencia asociadas con estos cambios. Un aspecto importante del diseño de sistemas en ingeniería es la selección del tipo apropiado de actuador (Alciatore & Hinand, 2008).

2.4.1. Motores Eléctricos

Los motores eléctricos se pueden clasificar por su función o por su configuración eléctrica. En la clasificación funcional, a los motores se les dan nombres que sugieren la manera en que se usa el motor. Ejemplos de clasificaciones funcionales incluyen momento de torsión, engrane, servo, servoinstrumento y de pasos. Sin embargo, por lo general es necesario conocer algo acerca del diseño eléctrico del motor para hacer juicios sobre su aplicación para entregar potencia y controlar la posición. Una clasificación de la configuración de motores eléctricos son los motores de *CD* y motores de *CA*. Las diferencias se deben al devanado del motor y al diseño del rotor, lo que resulta en una gran variedad de características operativas. La razón precio-rendimiento de los motores eléctricos continúa mejorando, lo que los hace importantes adiciones a todo tipo de sistema

mecatrónico, desde aparatos electrodomésticos hasta automóviles (Alciatore & Hestand, 2008).

La Figura 2.13 ilustra la construcción y los componentes de un motor eléctrico típico. El alojamiento exterior, llamado estator, soporta polos magnetizados radiales. Dichos polos consisten en imanes permanentes o bobinas alambradas, llamadas bobinas fijas, enrolladas en torno a núcleos de hierro laminados. El propósito de los polos del estator es proporcionar campos magnéticos radiales. El núcleo de hierro intensifica el campo magnético dentro de la bobina debido a su permeabilidad. El propósito de laminar el núcleo es reducir el efecto de las corrientes parásitas, que se inducen en un material conductor. El rotor es la parte del motor que gira. Consiste en un eje giratorio soportado por cojinetes, bobinas conductoras a las que por lo general se le conoce como devanados y armadura, y un núcleo de hierro que intensifica los campos creados por los devanados. Existe una pequeña brecha de aire entre el rotor y el estator donde interactúa el campo magnético (Alciatore & Hestand, 2008).

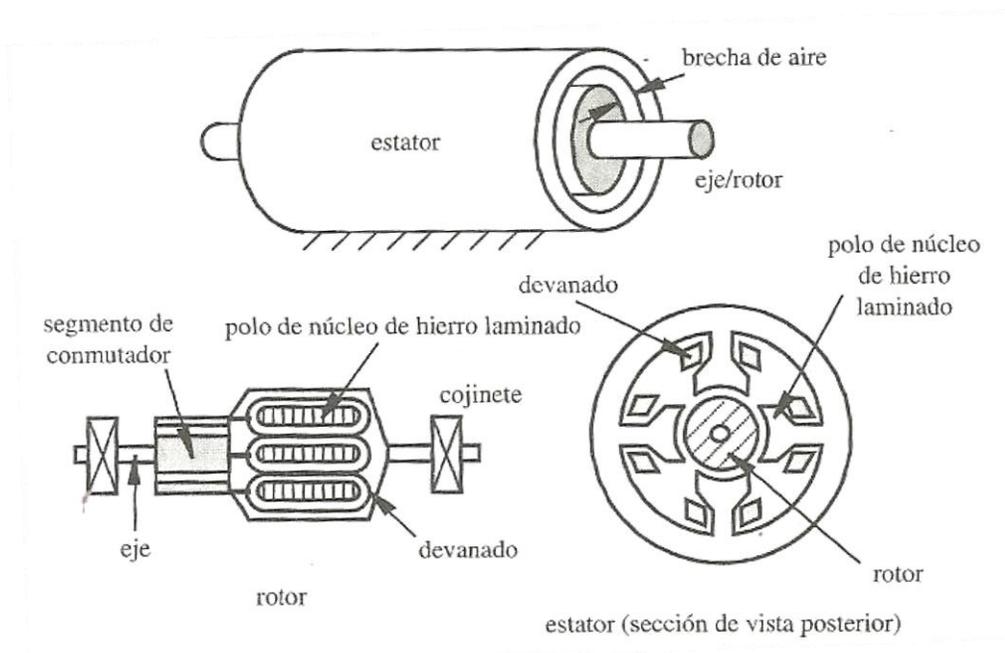


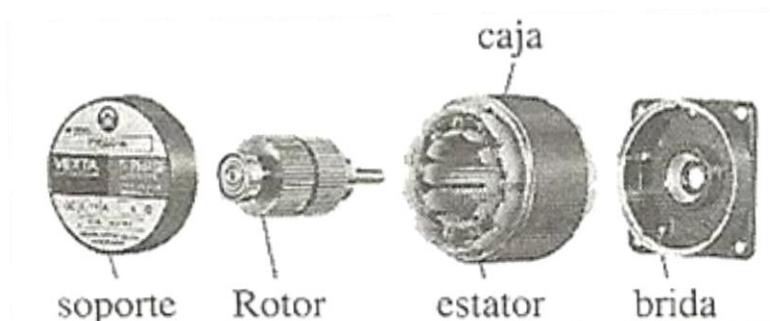
Figura 2.13. Construcción de motor y terminología.

En la Figura 2.14 se muestran ejemplos de motores ensamblados disponibles en el mercado. En la Figura 2.14 a) el motor a la izquierda es un motor de inducción

de CA con la adición de una unidad de reducción de velocidad por cabeza de engranes. El motor a la derecha es un motor gradual de dos fases. Los motores vienen en motores estándar con soporte estándar, y por lo general incluyen placas que mencionan algunas de las especificaciones. La Figura 2.14 b) muestra la construcción interna de un rotor gradual con rotor de imán permanente (Alciatore & Histand, 2008).



a) Motor de inducción CA y de pasos.



b) Vista desmontada del motor de pasos con un rotor de imán permanente.

Figura 2.14. Ejemplos de motores comerciales.

Un motor eléctrico produce un torque a través de la interacción de campos de estator y corriente de armadura, o de campos de estator y campos de armadura.

2.4.2. Motores a Pasos

Un tipo especial de motor de CD, conocido como motor de pasos, es un motor de CD de imán permanente o reluctancia variable que tiene las siguientes características de desempeño: puede rotar en ambas direcciones, moverse en incrementos angulares precisos, sostener un torque de retención a velocidad cero y controlarse con circuitos digitales. Se mueve en incrementos angulares precisos, conocidos como pasos, en respuesta a la aplicación de pulsos digitales a un circuito eléctrico de control. El número y tasa de los pulsos controla la posición y velocidad del eje del motor. Por lo general, los motores de pasos se fabrican con pasos por revolución de 12, 24, 72, 144, 180, y 200, lo que resulta en incrementos de eje de 30°, 15°, 5°, 2.5°, 2° y 1.8° por paso. Se pueden diseñar circuitos especiales de micropaso para permitir más pasos por revolución, con frecuencia 10 000 pasos/rev o más (Alciatore & Hystand, 2008).

Por su conexión y configuración interna los motores de pasos pueden ser bipolares, que requieren dos fuentes de poder o una fuente de poder de polaridad conmutable, o unipolares, que requieren sólo una fuente de poder. Se impulsan mediante fuentes CD y requieren circuitos digitales para producir secuencias de energización de bobina para rotación del motor. La retroalimentación no siempre se requiere para su control, pero el uso de un codificador u otro sensor de posición pueden asegurar la precisión cuando es crucial su control exacto. La ventaja de operar sin retroalimentación (es decir, en modo de lazo abierto) es que no se requiere un sistema de control de lazo cerrado y por lo tanto los costos se reducen. Por lo general, los motores de pasos producen menos de 1HP (746 W) y por tanto sólo se usan en aplicaciones de control de posición de baja potencia (Alciatore & Hystand, 2008).

Un motor de pasos comercial tiene muchos polos que definen un gran número de posiciones de equilibrio del rotor. En el caso de un motor de pasos de imán permanente, el estator consiste de polos devanados, y los polos del rotor son imanes permanentes. Al excitar diferentes combinaciones de devanados del estator se

mueve y retiene el rotor en diferentes posiciones. El motor de pasos de reluctancia variable tiene un rotor ferromagnético en vez de un rotor de imán permanente. El movimiento y retención resultan de la atracción de los polos del estator y rotor a posiciones con mínima reluctancia magnética que permite el máximo flujo magnético. Un motor de reluctancia variable tiene la ventaja de una menor inercia de rotor y por tanto una más rápida respuesta dinámica. El motor de pasos de imán permanente tiene la ventaja de un pequeño torque de retención residual, llamado momento de detención, aun cuando el estator no esté energizado.

Para comprender cómo se mueve el rotor de manera incremental, considere un diseño simple que consiste de cuatro polos de estator y un rotor de imán permanente, como se ilustra en la Figura 2.15. En el paso 0, el rotor está en equilibrio, por que los polos opuestos en el estator y el rotor son adyacentes y se atraen mutuamente. A menos que las polaridades magnéticas de los polos del estator cambien, el rotor permanece en esta posición y puede soportar un torque opuesto de hasta un valor llamado torque de retención. Cuando las polaridades del estator cambien de la forma en que se muestra (paso 0 a paso 1), al rotor se aplica un torque, lo que hace que se mueva 90° en dirección de las manecillas del reloj hasta una nueva posición de equilibrio mostrado como paso 1. Cuando las polaridades del estator cambian de nuevo de la forma en que se muestra (paso 1 a paso 2), el rotor experimenta un torque que lo lleva al paso 2. Al cambiar exitosamente las polaridades del estator, el rotor se puede mover a posiciones de equilibrio sucesivas en dirección de las manecillas del reloj. La secuenciación de las excitaciones de polo es el medio por el que ocurre la dirección de rotación. El movimiento contra las manecillas del reloj se puede lograr al aplicar la secuencia de polaridad en la dirección opuesta. El torque del motor se relaciona directamente con la intensidad del campo magnético de los polos y el rotor (Alciatore & Hirstand, 2008).

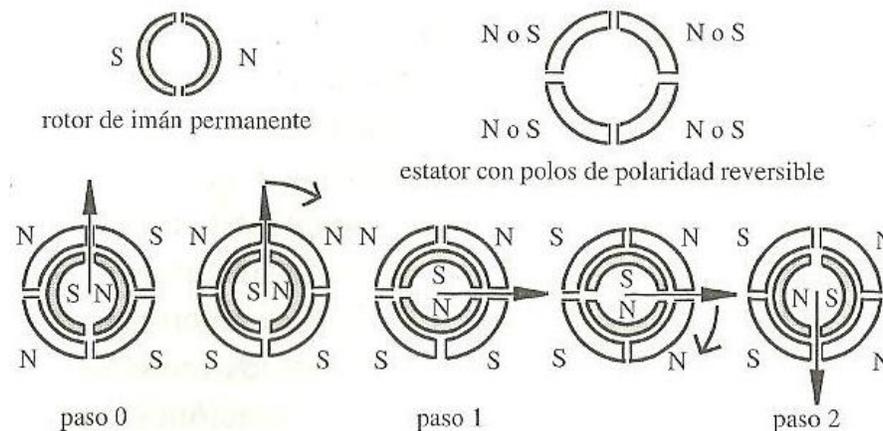


Figura 2.15. Secuencia de pasos del motor de pasos.

2.5. Esquemas de Control

En la presente sección se discuten las generalidades del esquema de control en lazo abierto con el cual ha sido equipado el prototipo de helióstato, su descripción y algunos elementos que lo caracterizan, también se presenta el esquema en lazo cerrado y su descripción.

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además de su gran importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robóticos y control de sistemas analógicos; el control automático se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de fabricación. Por ejemplo, el control automático es esencial en el control numérico de las máquinas-herramienta de las industrias de manufactura, en el diseño de sistemas de pilotos automáticos en la industria aeroespacial, y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso (Ogata, 2008).

Como los avances en la teoría y la práctica del control automático proporcionan los medios para conseguir un comportamiento óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, simplificar el trabajo de muchas operaciones

manuales repetitivas y rutinarias, así como de otras actividades, la mayoría de los ingenieros y científicos deben de tener un buen conocimiento de este campo.

El primer trabajo significativo en control automático fue el regulador de velocidad centrífugo de James Watt para el control de la velocidad de una máquina de vapor, en el siglo XVIII. Minorsky, Hanzen y Nyquist, entre muchos otros, aportaron trabajos importantes en las etapas iniciales del desarrollo de la teoría de control. En 1922, Minorsky trabajó en controladores automáticos para el guiado de embarcaciones, y mostró que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1932, Nyquist diseñó un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de sistemas en lazo cerrado, a partir de la respuesta en lazo abierto a entradas sinusoidales en estado estacionario.

En 1934, Hanzen, introdujo el término servomecanismo para los sistemas de control de posición, analizó el diseño de los servomecanismos con relé, capaces de seguir con precisión una entrada cambiante (Ogata, 2008).

Durante la década de los cuarenta, los métodos de la respuesta en frecuencia (especialmente los diagramas de Bode) hicieron posible que los ingenieros diseñaran sistemas de control lineales en lazo cerrado que cumplieran los requisitos de comportamiento. A finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta, se desarrolló por completo el método *del lugar de las raíces* propuesto por *Evans*.

Los métodos de respuesta en frecuencia y del lugar de las raíces, que forman el núcleo de la teoría de control clásica, conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de requisitos de comportamiento. En general, estos sistemas son aceptables pero no óptimos desde ningún punto de vista. Desde el final de la década de los cincuenta, el énfasis en los problemas de diseño de control se ha desplazado del diseño de los posibles sistemas que funciona adecuadamente al diseño de un sistema óptimo respecto de algún criterio.

Conforme las plantas modernas con muchas entradas y salidas se vuelven más complejas, la descripción de un sistema de control moderno requiere una gran cantidad de ecuaciones. La teoría del control clásica, que trata de los sistemas con

una entrada y una salida, pierde su potencialidad cuando se trabaja con sistemas con entradas y salidas múltiples. Hacia 1960, debido a la disponibilidad de las computadoras digitales fue posible el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estado. Esto ha permitido manejar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requisitos cada vez más exigentes sobre precisión, peso y coste en aplicaciones militares, espaciales e industriales (Ogata, 2008).

Durante los años comprendidos entre 1960 y 1980, se investigó a fondo el control óptimo, tanto de sistemas deterministas como estocásticos, así como el control adaptativo y con aprendizaje de sistemas complejos. Desde 1980 hasta la actualidad, los avances en la teoría de control se han centrado en el control robusto, control H^∞ y temas relacionados (Ogata, 2008).

Ahora que las computadoras digitales se han hecho más baratas y más compactas, se usan como parte integral de los sistemas de control. Las aplicaciones recientes de la teoría de control moderna incluyen sistemas fuera del ámbito de las ingenierías, tales como los sistemas biológicos, biomédicos, económicos y socioeconómicos.

Antes de analizar los sistemas de control, se definirán ciertos términos básicos como:

- **Variable controlada y variable manipulada.** La variable controlada es la cantidad o condición que se mide o controla. La variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medio respecto del valor deseado.
- **Plantas.** Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de elementos de una máquina que funcionan juntos y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. Es cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial).

- **Procesos.** El diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado. Cualquier operación que se va a controlar.
- **Sistemas.** Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe de interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.
- **Perturbaciones.** Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada.
- **Control retroalimentado.** El control retroalimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. Las perturbaciones predecibles o conocidas pueden considerarse dentro del sistema (Ogata, 2008).

Ejemplos de sistemas de control.

Sistema de control de velocidad. El principio básico del regulador de velocidad de Watt para una máquina se ilustra en el diagrama esquemático de la Figura 2.16. La cantidad de combustible que se admite en la máquina se ajusta de acuerdo con la diferencia entre la velocidad de la máquina que se pretende y la velocidad real.

La secuencia de acciones puede describirse del modo siguiente: el regulador de velocidad se ajusta de modo que, a la velocidad deseada, no fluya aceite a presión en ningún lado del cilindro de potencia. Si la velocidad real cae por debajo del valor deseado debido a una perturbación, la disminución de la fuerza centrífuga del regulador de velocidad provoca que la válvula de control se mueva hacia abajo, aportando más combustible, y la velocidad del motor aumenta hasta alcanzar el valor deseado. Por otra parte, si la velocidad del motor aumenta por encima del valor deseado, el incremento en la fuerza centrífuga del regulador provoca que la válvula del control se mueva hacia arriba. Esto disminuye el suministro de combustible, y la velocidad del motor se reduce hasta alcanzar el valor deseado.

En este sistema de control de velocidad, la planta (el sistema controlado) es la máquina y la variable controlada es la velocidad de la misma. La diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real es la señal de error. La señal de control (la cantidad de combustible) que se va a aplicar a la planta (la maquina) es la señal de actuación. La entrada externa que se aplica para alterar la variable controlada es la perturbación. Un cambio inesperado en la carga es una perturbación (Ogata, 2008).

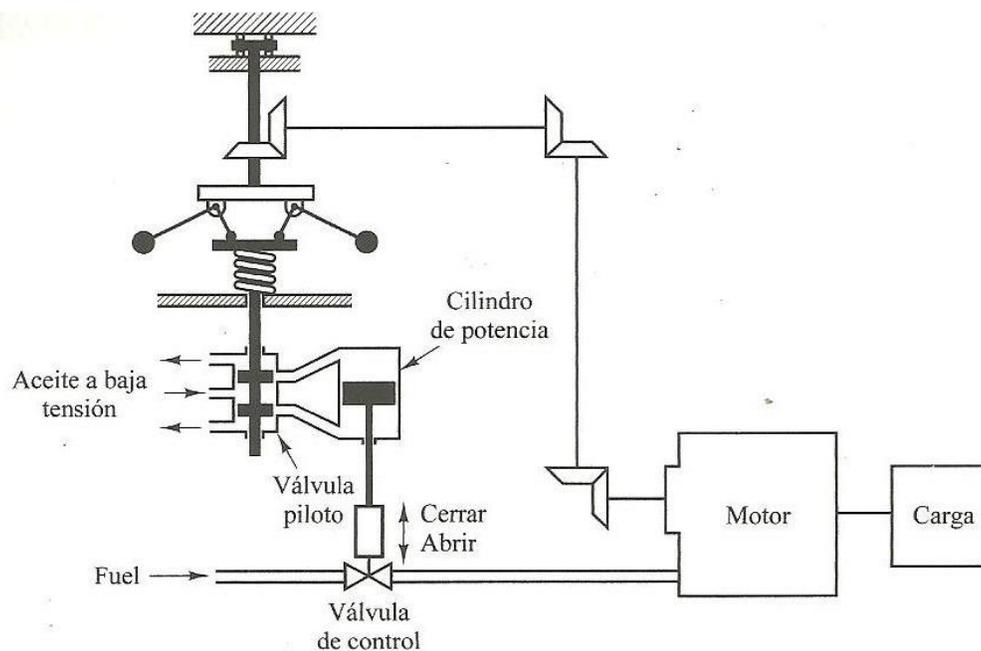


Figura 2.16. Sistema de control de velocidad.

Sistema de control de temperatura. La Figura 2.17 muestra un diagrama esquemático del control de temperatura de un horno eléctrico. La temperatura del horno eléctrico se mide mediante un termómetro, que es un dispositivo analógico. La temperatura analógica se convierte a una temperatura digital mediante un convertidor A/D. La temperatura digital se introduce en un controlador mediante una interfaz. Esta temperatura digital se compara con la temperatura de entrada programada, y si hay una discrepancia (error) el controlador envía una señal al calefactor, a través de una interfaz, amplificador y relé, para hacer que la temperatura del horno adquiera el valor deseado (Ogata, 2008).

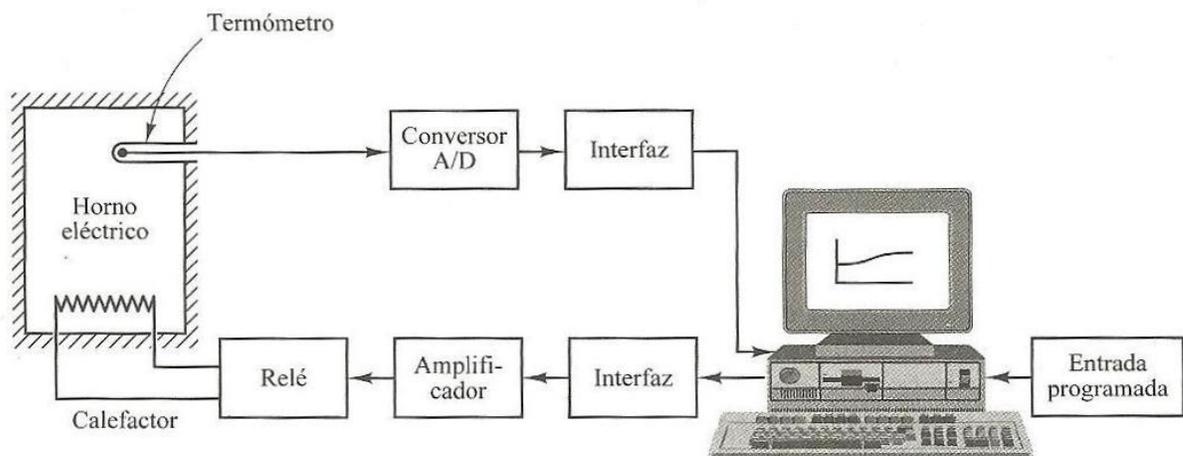


Figura 2.17. Sistema de control de temperatura.

Ejemplo. Sea el control de temperatura del compartimiento del pasajero de un automóvil. La temperatura deseada (convertida a una tensión) es la entrada al controlador. La temperatura real del compartimiento del pasajero debe convertirse en una tensión mediante un sensor y retroalimentarse al controlador para que pueda compararse con la entrada.

La Figura 2.18 muestra un diagrama funcional del control de temperatura del compartimiento del pasajero de un automóvil. Observe que la temperatura ambiente y la transferencia de calor por radiación, que no son constantes mientras se conduce el automóvil, actúan como perturbaciones.

La temperatura del compartimiento del pasajero de un automóvil difiere considerablemente dependiendo del lugar donde se mida. En lugar de usar sensores múltiples para medir la temperatura y promediar los valores medidos, resulta más económico instalar un pequeño ventilador de succión en el lugar en donde los pasajeros normalmente detectan la temperatura. La temperatura del aire del aspirador es una indicación de la temperatura del compartimiento del pasajero y se considera una salida del sistema.

El controlador recibe la señal de entrada, la señal de salida y las señales de los sensores de las fuentes de perturbación. El controlador envía una señal de control óptima al sistema de aire acondicionado o al calefactor para controlar la cantidad de aire frío o caliente de forma que la temperatura del compartimiento del pasajero se mantenga en el valor deseado (Ogata, 2008).

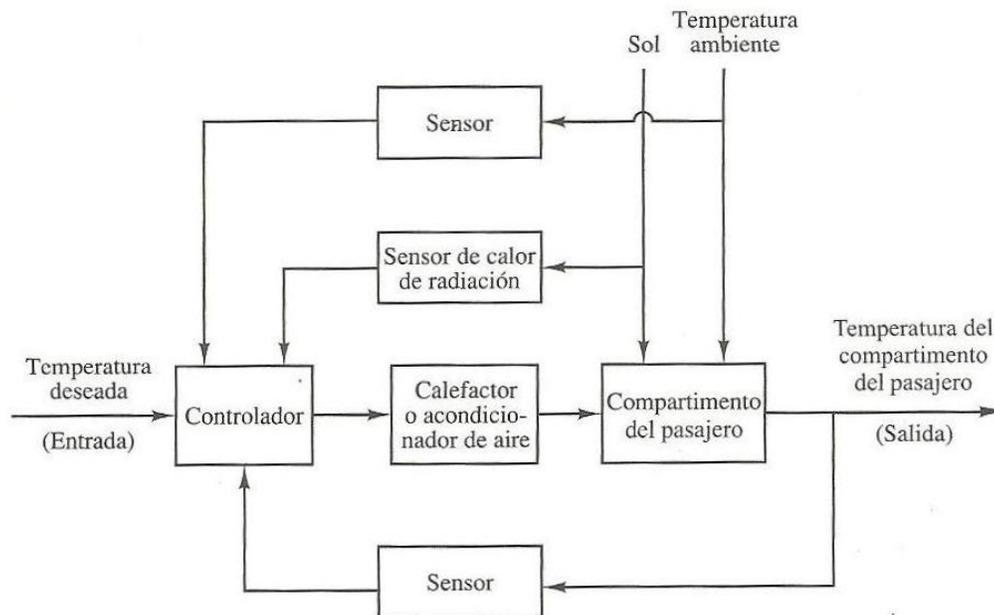


Figura 2.18. Control de temperatura del compartimiento de pasajeros de un coche.

3. METODOLOGÍA

Primero se presenta el problema del modelo de seguimiento solar aplicado a Hermosillo, donde a partir de un modelo simplificado se obtienen las ecuaciones que determinan el movimiento aparente del Sol para el caso de este sitio. Debido a que todos los algoritmos de seguimiento tienen cierto grado de incertidumbre propongo el análisis del error para el algoritmo empleado en este caso; dicho análisis se llevará a cabo mediante simulación computacional en matlab.

Esto nos permitirá hacer la propuesta de un controlador en lazo cerrado que minimice el error de seguimiento. Para validar el algoritmo de control, se llevará a cabo la simulación computacional del mismo. Finalmente se realizarán experimentos en el campo de pruebas de helióstatos para validar las simulaciones.

3.1. Modelo de Seguimiento Solar Aplicado a Hermosillo

En Hermosillo, Sonora se ha desarrollado un prototipo de helióstato para su análisis y estudio, tal prototipo está equipado con un sistema de control en lazo abierto, por lo tanto, el sistema es alimentado por un sistema de coordenadas que indican la posición necesaria para reflejar los rayos solares a un punto focal colocado en una torre central, sin obtener retroalimentación de la posición que se logró obtener por el equipo.

Para lograr conocer las coordenadas necesarias para el helióstato se hizo un análisis bibliográfico sobre otros sistemas de seguimiento solar, tal investigación se toma como base para el desarrollo de un algoritmo que nos indique las coordenadas óptimas en acimut y elevación en la ubicación de Hermosillo, Sonora, el cual fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Sonora.

Los sistemas térmicos solares de alta concentración requieren del seguimiento solar con gran exactitud. Aunque el grado de exactitud empleado depende de las características específicas del sistema de concentración analizado, en general, entre más grande el nivel de concentración del sistema mayor exactitud de seguimiento se requiere. Para un sistema de concentración solar de torre central (CRS Central

receiver system) con una razón de concentración alrededor de 1000 m, se estima que se requiere una precisión de seguimiento de aproximadamente 3.5 minutos de arco (Blanco Muriel et al, 2001).

Benitez y otros (2010), han calculado las trayectorias del Sol, a partir de un modelo algebraico de seguimiento solar, aplicado para la ubicación geográfica de Hermosillo, Sonora como parte de una estrategia de control en lazo abierto para un prototipo de helióstato. Mediante el sistema LabView se ha calculado la posición en acimut (γ) y elevación (β), a la cual se debe de posicionar el equipo, para reflejar el rayo solar hacia el punto central de la torre. El resultado es una tabla de datos en ángulos correspondientes al acimut y elevación, para el día del año indicado. Tal tabla de datos se obtiene a partir de los componentes del vector normal al espejo. A partir de un sistema de coordenadas cartesianas situado en la torre, tal que el eje X positivo señale el norte geográfico, y el eje Y positivo señale el oeste geográfico, así como el eje Z quede en la línea de altura de la torre, es posible lograr el objetivo de la orientación, como se observa en la Figura 3.1 (Benitez et al, 2010).

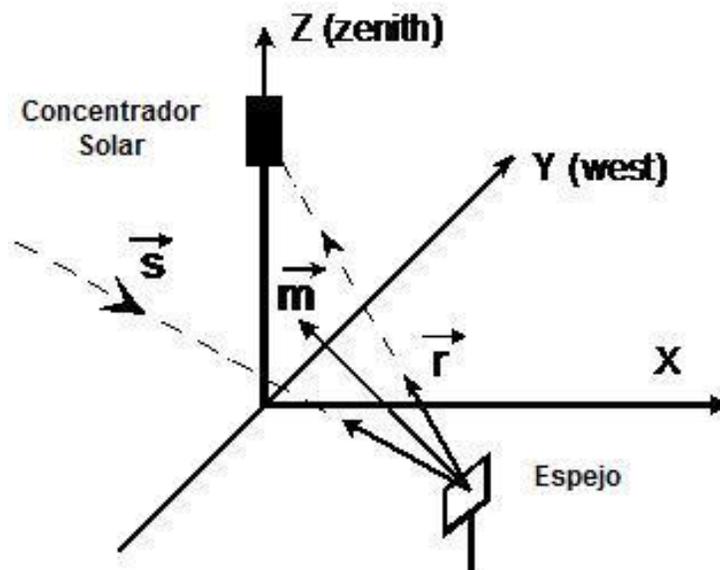


Figura 3.1. Sistema de coordenadas rectangulares.

El cálculo del acimut y la elevación se basa en las leyes de reflexión:

- a) El ángulo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie en el punto de incidencia, todos se ubican en el mismo plano.
- b) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Si \vec{s} , \vec{r} , \vec{m} representan el rayo de luz proveniente del Sol, el rayo de luz reflejado hacia un punto de la torre, y la orientación del espejo con respecto al Sol respectivamente, pueden expresarse en términos de sus componentes de la siguiente forma:

$$\vec{s} = s_x \vec{i} + s_y \vec{j} + s_z \vec{k} \quad (3.1)$$

$$\vec{r} = r_x \vec{i} + r_y \vec{j} + r_z \vec{k} \quad (3.2)$$

$$\vec{m} = m_x \vec{i} + m_y \vec{j} + m_z \vec{k} \quad (3.3)$$

Mediante las componentes de \vec{m} y de las propiedades del producto punto se desprenden las ecuaciones que permiten obtener tanto el acimut γ , como la elevación β que guiarán el movimiento del helióstato durante el día. Estas son las ecuaciones asociadas a la elevación:

$$\vec{m} \cdot \vec{k} = \cos(\beta) = m_z \quad (3.4)$$

$$\beta = \cos^{-1}(m_z) \quad (3.5)$$

En el caso del **acimut** pueden aplicarse las relaciones siguientes:

$$\gamma = \begin{cases} \pi + \tan^{-1}\left(\frac{|m_y|}{|m_x|}\right) & \text{si } m_x > 0, \quad m_y \geq 0 \\ 2\pi - \tan^{-1}\left(\frac{|m_y|}{|m_x|}\right) & \text{si } m_x \leq 0, \quad m_y > 0 \\ \pi - \tan^{-1}\left(\frac{|m_y|}{|m_x|}\right) & \text{si } m_x \geq 0, \quad m_y < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Las ecuaciones anteriores se han utilizado para simular la orientación que se le debe dar al helióstato en cada momento del día desde las 06:00 horas hasta las 18:00 horas para una ubicación geográfica en la Ciudad de Hermosillo, Sonora (Benitez et al, 2010).

A continuación en la tabla 3.1 se muestra un ejemplo del resultado obtenido (medido en grados).

Elevación (β)	Acimut (γ)
22.9798	142.4566
23.1129	142.5222
23.2455	142.5884
23.3777	142.6551
23.5094	142.7224
23.6407	142.7903

Tabla 3.1. Ejemplo de ángulos obtenidos para la elevación y el acimut.

Esta información alimenta el sistema de control del helióstato, para que éste tome acción.

3.1.1. Análisis del Error de Seguimiento

Por tratarse de un desarrollo tecnológico, la metodología propuesta está basada en simulaciones y en la experimentación con un prototipo. Esta sección describe la metodología para realizar el análisis del error de seguimiento. Se

obtienen los ángulos característicos, se convierten a pasos del motor equivalentes, se hace un análisis de los datos obtenidos y se trabaja con un error de redondeo, a continuación se muestra el desarrollo.

El sistema de control, está equipado con un motor de pasos. Tal motor se mueve en incrementos o pasos cuantificados (Condit, 2004), por tal razón la información manejada en ángulos (β y γ) se ve con la necesidad de convertirlos a pasos discretos equivalentes.

Este problema es analizado y solucionado considerando lo siguiente. Sea (α) el ángulo del motor o el tamaño del paso, el cual es determinado por la resolución necesaria para un uso en particular. Un ejemplo de tamaño de paso es de 7.5 y 3.6 grados. Esto corresponde a 48 y 100 pasos por revolución respectivamente. Los motores híbridos tienen tamaños de paso a partir de 3.6 grados (100 pasos por revolución) a 0.9 grados (400 pasos por revolución) (Condit, 2004).

El motor a pasos en este proyecto, tiene una resolución de 0.9° , el cual por cuestión de precisión ha sido configurado a 0.45° , también se ha considerado una relación de transmisión (λ) de 124. Empleando el método de diferencias finitas es posible definir las posiciones en acimut y elevación mediante incrementos $\Delta\beta$ y $\Delta\gamma$ respectivamente. Los cuales se definen mediante:

$$\beta_{st} = \Delta\beta / (\alpha/\lambda) \quad (3.7)$$

$$\gamma_{st} = \Delta\gamma / (\alpha/\lambda) \quad (3.8)$$

Con estos datos y las siguientes ecuaciones se logra discretizar los ángulos de acimut y elevación, sustituyendo (3.7) y (3.8) en (3.9) y (3.10). En otras palabras calculamos los pasos del motor equivalentes a los ángulos (β y γ).

$$\Upsilon_{st} = \frac{\Delta\gamma}{\alpha/\lambda} = \frac{\lambda(\Delta\gamma)}{\alpha} \quad (3.9)$$

$$\beta_{st} = \frac{\Delta\beta}{\alpha/\lambda} = \frac{\lambda(\Delta\beta)}{\alpha} \quad (3.10)$$

A manera de ejemplo, y para ilustrar el uso de las ecuaciones (3.9) y (3.10).

Considere un motor que da 1.8° por paso, con una relación de transmisión de 300. ¿Cuántos pasos se requiere para avanzar de las 8:00 am – 8:01 am el 14 de febrero del 2011?

$$\alpha = 1.8 \text{ grados}$$

$$\lambda = 300$$

Sustituimos los datos en las ecuaciones (3.9) y (3.10).

$$\gamma_{st} = \frac{\Delta \gamma}{\alpha/\lambda} = \frac{\lambda (\Delta \gamma)}{\alpha} = \frac{300(146.0982 - 146.2311)}{1.8} = 22.15$$

$$\beta_{st} = \frac{\Delta \beta}{\alpha/\lambda} = \frac{\lambda (\Delta \beta)}{\alpha} = \frac{300(41.6620 - 41.5870)}{1.8} = 12.5$$

Los valores de gama y beta se obtienen del algoritmo aplicado por Benítez (2010). Estas ecuaciones han sido programadas en matlab y se ha obtenido una lista de datos.

En la tabla 3.2 se muestra la lista de datos que se obtiene de la programación, así como los ángulos para β y γ desde las 6:00 am a las 6:05 am, (a_1), después se presenta la equivalencia de estos ángulos a pasos del motor para cada minuto (a_2), así como la discretización (a_3) y finalmente se describe un error numérico con el cual trabaja el sistema de control (a_4), teniendo como resultado una desviación. De aquí la necesidad de trabajar con el error para disminuirlo.

Hora	(a ₁) Ángulos		(a ₂) Pasos del motor M_C		(a ₃) Discretización M_Q		(a ₄) Error absoluto $ E $	
	Elevación (β)	Acimut (γ)	β_{st}	γ_{st}	β	γ	$e\beta$	$e\gamma$
6:00	22.9798	142.4566	36.6764	18.0764	37	19	0.3236	0.9236
6:01	23.1129	142.5222	36.5387	18.2418	37	19	0.4613	0.7582
6:02	23.2455	142.5884	36.4284	18.3796	37	19	0.5716	0.6204
6:03	23.3777	142.6551	36.2907	18.5449	37	19	0.7093	0.4551
6:04	23.5094	142.7224	36.1804	18.7102	37	19	0.8196	0.2898
6:05	23.6407	142.7903	36.0427	18.848	37	19	0.9573	0.152

Tabla 3.2. Discretización de ángulos característicos en acimut y elevación.

Analizando el error absoluto en la tabla anterior, se puede observar que se presenta un error para la posición de cada minuto, el cual tiende a acumularse y tiene como resultado la desviación de la posición óptima del equipo. De aquí se deriva la necesidad de controlar este error para intentar minimizarlo.

La importancia del tratamiento de este error numérico es el resultado que se presenta en cada posición de cada minuto, como se puede observar en la tabla 3.2, el error incrementa a cada minuto. En cuestiones de precisión, el valor del error presentado en el equipo se multiplica por la distancia hacia el punto focal, teniendo como resultado una desviación considerable de la posición óptima.

Para el análisis es necesario conocer la magnitud del error, la cual se conoce bajo la siguiente definición.

$$\text{Error absoluto} = |\text{valor exacto} - \text{valor aproximado}|$$

$$|E| = M_C - M_Q \quad (3.11)$$

donde $|E| < 1$

Ya que se conoce la magnitud del error presentada, se analiza algún tratamiento que se le pueda dar a estos valores para disminuirlos en el mayor grado posible y así trabajar con un equipo más preciso.

Se hizo un estudio del comportamiento de la magnitud del error y se intenta trabajarlo para minimizarlo con un algoritmo que considere dicha magnitud.

3.2. Esquemas de Control

En esta sección se discute sobre los esquemas de control aplicados al problema del seguimiento solar, en particular a helióstato.

3.2.1. Esquema de Control de Lazo Abierto para Helióstato

Un sistema de control de lazo abierto calcula su salida usando solamente el estado actual basado en la fecha y la hora del día, sin usar la retroalimentación; de tal manera que no se determina si su salida ha alcanzado la meta deseada. El sistema es más simple y más barato que el tipo de lazo cerrado (Lee, 2009).

El prototipo de helióstato del proyecto de la Universidad de Sonora se controla mediante un sistema en lazo abierto; como el motor de pasos con el que está equipado gira en pasos cuantificados se puede decir que se conoce su posición, siempre y cuando el motor funcione dentro de sus especificaciones de torque (Condit, 2004). Pero es necesario considerar perturbaciones que impiden el posicionamiento indicado por el sistema. Tales perturbaciones disminuyen la precisión con la que se posiciona el helióstato. También estas perturbaciones incluyen elementos mecánicos como lo es el tornillo sin fin y la corona, quienes disminuyen el torque del motor; es importante incluir la consideración del efecto de backlash, el cual se presenta cuando dos engranajes no se montan a una distancia de centro a centro que empareje exactamente la suma de los radios, se presenta una pequeña separación, o backlash entre los dientes. Cuando el engranaje toma dirección contraria, requiere de una pequeña rotación antes de que se elimine la separación y el engrane empiece a moverse (Bishop, 2002). Existen otras

perturbaciones externas o ambientales que evitan el buen funcionamiento de los helióstatos, como el viento, humedad, polvo, entre otros.

En la Figura 3.2 se muestra el esquema del sistema de control en lazo abierto, en ella se consideran los parámetros que perturban el funcionamiento del helióstato, también se muestra la entrada de información que alimenta al exosistema, el producto final mas el error y el algoritmo que corrige el error presentado.

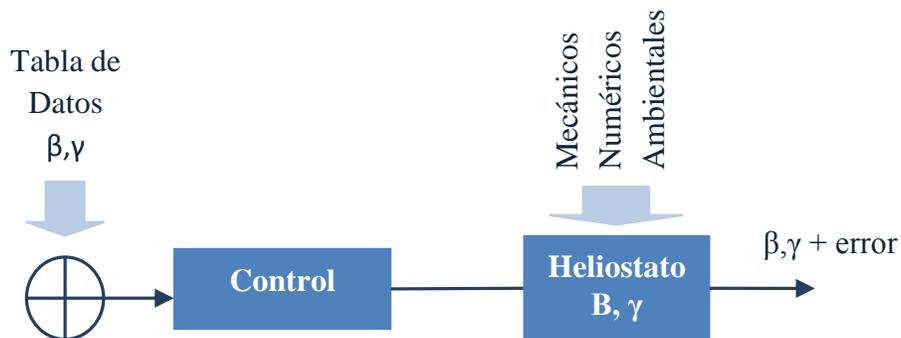


Figura 3.2. Esquema de control en lazo abierto.

3.2.2. Esquema de Control de Lazo Cerrado para Helióstato

En estos sistemas, un número de entradas se transfieren a un controlador. Los sensores que detectan los parámetros relevantes inducidos por el Sol, son retroalimentados al controlador y éste corrige el error entre la salida deseada y la salida actual (Lee, 2009).

Un sistema con una o más trayectorias de retroalimentación se denomina sistema en lazo cerrado. Los sistemas más confiables son aquellos que utilizan retroalimentación para corregir un posible error entre el efecto deseado y el efecto obtenido (Kuo, 1996). El esquema propuesto para este proyecto se presenta en la Figura 3.3.

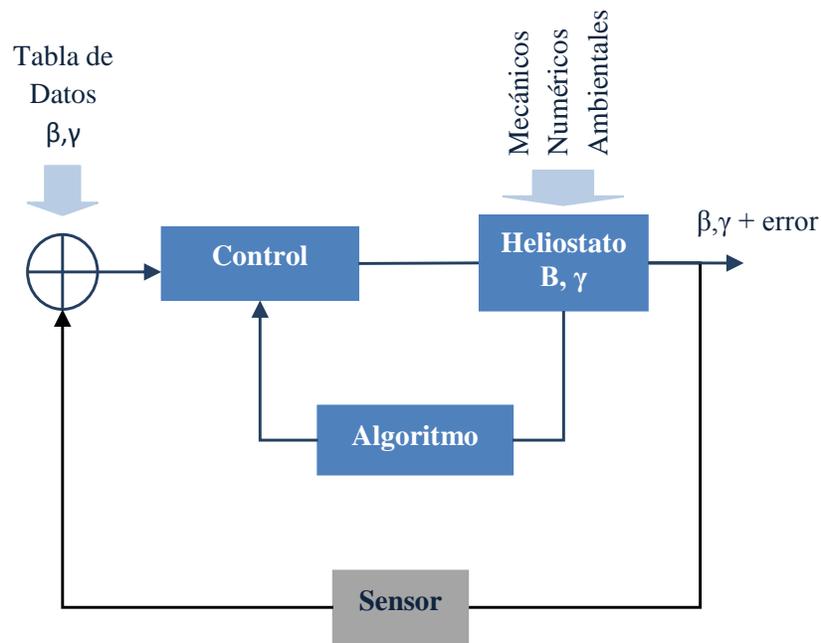


Figura 3.3. Esquema de control en lazo cerrado.

Aunque el control en lazo cerrado tradicionalmente requiere de sensores, la propuesta que se hace en este trabajo es de tipo algorítmica; es decir, la retroalimentación de los ángulos característicos de heliostato se procesarán por un algoritmo que reducirá el error de posición. Esto se puede constatar en el mismo esquema de la Figura 3.3.

3.3. Simulación del Análisis del Error

Ya que se conoce la magnitud del error por el redondeo hecho, se le da un tratamiento con el siguiente algoritmo, el cual se ha desarrollado en el presente trabajo de tesis.

Tal algoritmo trabaja bajo la siguiente fórmula.

$$|\zeta| = \sum_{i=1}^L e_{i\beta} = \begin{cases} \zeta & \text{if } |\zeta| < 1 \\ \zeta - 1 & \text{if } |\zeta| = 1 \\ \zeta - 1 + \delta & \text{if } |\zeta| = 1 + \delta \end{cases} \quad (3.12)$$

donde

ζ es la suma del error

L es el número de muestras tomadas en un día

δ es el valor residual.

Es posible conocer la posición generada por M_Q (paso discreto) para la elevación con:

$$\beta^*(k+1) = \beta^*(0) + \alpha M_Q(k)/\lambda + \beta^*(k) \quad (3.13)$$

Si $k = 1, 2, 3, \dots, L$,

donde β^* es el ángulo característico para la elevación mas el error de (3.12), es decir.

$$\beta^*(k+1) = \beta(k+1) + |\zeta(k+1)| \quad (3.14)$$

Por otra parte, si aplicamos la ecuación (3.12) a la posición β^* , es posible obtener el ángulo corregido, nombrado β^N , de la cual sus valores discretos se pueden representar como:

$$\beta^N(k+1) = \beta^N(0) + \alpha M_Q^N(k)/\lambda + \beta^N(k) \quad (3.15)$$

donde M_Q^N son los datos procesados en (3.12) (Benitez et al, 2012). Basándonos en (3.12) se ha desarrollado un algoritmo, que busca detectar cuándo la acumulación del error es equivalente a una unidad de un paso del motor, y evitar que se incremente en la siguiente unidad de paso. Entonces, cuando la suma del error es igual a la unidad, al siguiente minuto no se da ese paso, y si suma más de la unidad, al siguiente minuto, no se da ese paso y se guarda la diferencia en memoria, si el error acumulado no equivale a un paso, se sigue acumulando hasta que este llegue a la unidad.

3.4. Validación Experimental en el CPH

El campo de pruebas de helióstatos (*CPH*) es un subproyecto que pertenece al megaproyecto del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar, financiado por *CONACYT* en el proyecto LN-56918, bajo la dirección del doctor *Claudio Estrada Gasca*. El proyecto del *CPH* consiste en un conjunto de helióstatos desplegados sobre el terreno, una torre con cabina de experimentación y de una sala de control. La torre cuenta con un blanco Lambertiano para proyectar las imágenes producidas por los helióstatos (ver figura 3.4).



Figura 3.4. Campo de pruebas de helióstatos (*CPH*).

3.4.1. Descripción del CPH

El diseño del *CPH* consistió esencialmente en determinar la distribución de helióstatos en el terreno y la altura de la torre. Dichos parámetros se determinaron con base en simulaciones ópticas del comportamiento del campo, buscando maximizar la concentración de la energía solar reflejada por los helióstatos hacia la torre. Los resultados obtenidos son función de los dos parámetros que se fijaron, que fueron el tamaño y tipo de helióstato y la cantidad de potencia total a ser captada por el campo y puesta en el receptor. El helióstato se definió de tamaño mediano (36 m^2) y con factor de concentración de 25. La potencia se fijó en 2 MWt. Esto determinó la altura de la torre en 36 m de altura.

Por parte de diferentes grupos participantes en el proyecto, existen actualmente en el campo 23 helióstatos, de 6 modelos diferentes y sus variantes: *UNISON-TX-H6*, *UNISON-TX-H36*, *UNISON-MC-H1.5*, *UNAM-CC-H36* (variantes A, B y C). El modelo trabajado en esta investigación es el *UNISON-MC-H1.5*, este helióstato es de tamaño muy pequeño (1.5 m) y fue desarrollado en su totalidad por el Grupo de Mecatrónica del Departamento de Ingeniería Industrial, y contando con la colaboración del Grupo de Energía del Departamento de Ingeniería Química. Este tipo de helióstato busca el abaratamiento de componentes mecánicas, a través de poner el énfasis en el control de muchos helióstatos pequeños mediante componentes baratas. Se desarrollaron e instalaron un conjunto de 9 helióstatos de este tipo para tener un área total de 13.5 m^2 .

La plataforma común a utilizar es el software Lab View que por su versatilidad y facilidad de manejo permite una buena interacción entre los diferentes grupos. La versatilidad es importante, pues en el futuro permitirá integrar al sistema de control una serie de componentes para proyectos que se operen en el CPH, como pruebas de receptores térmicos y reactores químicos. Para integrar los diferentes componentes del control se desarrolló un sistema *SCADA* (Supervisory Control And Data Aquisition)

3.5. Propuesta de Control en Lazo Cerrado

En esta sección se hablará del prototipo de heliostato utilizado y la propuesta de control en lazo cerrado, sus especificaciones, análisis realizados y pruebas elaboradas en el equipo para determinar su desempeño en este modo de trabajo.

3.5.1. Retroalimentación en Helióstatos

La retroalimentación es importante para los sistemas de seguimiento solar, ya que gracias a esta técnica se logra conocer la posición en la cual está colocado el heliostato o equipo de seguimiento solar y se corrige a la posición deseada.

Para obtener un control más exacto, la señal controlada debe ser retroalimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe de enviar una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y la salida a través del sistema para corregir el error (Kuo, 1996).

La retroalimentación se realiza mediante diversos métodos de medición, dependiendo de la variable que se requiera verificar, normalmente para un control de seguimiento mecánico se utiliza un encoder de posición, pero también se utiliza la visión artificial, la cual se utiliza cuando la variable que se pretende controlar no es medible directamente (Pacheco et al, 2010).

En la historia de retroalimentación en heliostatos también se han presentado sistemas equipados con fotorresistencias los cuales han detectado el estado de enfoque del colector, la presencia o ausencia de niebla y discriminación del día y la noche (Lee, 2009). También se han equipado sistemas de seguimiento solar con fototransistores los cuales trabajan con diferencias de voltaje, buscando que esta sea cero y se considera que los rayos del Sol han vuelto al eje normal del colector (Lee, 2009). Así como estos diferentes sistemas han experimentado con métodos de retroalimentación, se han presentado varios más a través de los años.

3.5.2. Sensores

Un sensor es un elemento en un sistema mecatrónico o de medición que detecta la magnitud de un parámetro físico y lo cambia por una señal que puede procesar el sistema. Al elemento activo de un sensor se le conoce comúnmente como **transductor**. Los sistemas de monitorización y control requieren sensores para medir cantidades físicas tales como posición, distancia, fuerza, deformación, temperatura, vibración y aceleración (Alciatore & Hestand, 2008).

Medición de posición y velocidad

En los sistemas electromecánicos la cantidad que con más frecuencia se mide, a parte de las mediciones eléctricas (voltaje, corriente, resistencia), es la posición. Con frecuencia se necesita saber dónde están varias partes de un sistema con la finalidad de controlarlo. El codificador digital (encoder), es útil para medir una posición con una salida en forma digital adecuada para interfaz directa a una computadora u otro sistema digital (Alciatore & Hestand, 2008).

Codificador óptico digital (encoder)

Un codificador óptico digital es un dispositivo que convierte movimiento en una secuencia de pulsos digitales. Al contar un solo bit o decodificar un conjunto de bits, los pulsos se pueden convertir en mediciones de posición relativa o absoluta. Los codificadores tienen configuraciones tanto lineales como giratorias, pero el tipo más común es el giratorio. Los codificadores giratorios se fabrican en dos formas básicas: el codificador absoluto, donde una única palabra digital corresponde a cada posición rotacional del eje; y el codificador incremental, que produce pulsos digitales conforme el eje gira, lo que permite la medición del desplazamiento relativo del eje. La mayoría de los codificadores giratorios se componen de un disco de código de vidrio o plástico con un modelo radial depositado fotográficamente y organizado en pistas. Conforme las líneas radiales interrumpen el haz entre un par fotoemisor-detector en cada pista, se producen los pulsos digitales (Alciatore & Hestand, 2008).

El disco óptico del codificador absoluto se diseña para producir una palabra digital que distingue N distintas posiciones del eje. Por ejemplo, si existen ocho pistas, el codificador es capaz de medir 225 (2^8) distintas posiciones que corresponden a una resolución angular de 1.406° ($360^\circ/256$). Los tipos más comunes de codificación numérica usada en el codificador son los códigos gray y el binario natural. Conforme las pistas circulares del disco de código giran con el eje, los fotodetectores detectan los patrones lineales y los diagramas de tiempo asociados (Alciatore & Histan, 2008).

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la experimentación en tiempo real y simulación de los algoritmos desarrollados y utilizados en el actual trabajo.

4.1. Validación de Algoritmo por medio de Simulación

Los criterios para establecer una acción de control en un helióstato deberían de considerar que el control de movimiento es aplicado a un sistema que está relacionado con una planta de concentración térmica, la cual se basa en un colector solar, diseñado para reunir energía solar y convertirla en energía eléctrica o térmica. Es importante mencionar que la energía generada en tal aplicación depende fundamentalmente de la cantidad de energía solar capturada por el colector. En la Figura 4.1 se muestra el CPH desde un punto de vista situado en la torre.



Figura 4.1. Campo de pruebas de helióstatos CPH.

Los esquemas de control en lazo abierto presentan bajo desempeño y falta de adaptación a variaciones. Sin retroalimentación, no hay manera de saber si el motor dio algún paso o pulso, o si la velocidad de respuesta es oscilatoria.

El principio de esquemas en lazo cerrado se introdujo para incrementar la precisión de posicionamiento del motor a pasos, y hacerlo menos sensible a perturbaciones. El control en lazo cerrado se caracteriza por el arranque del motor con un pulso, y se generan pulsos posteriores de accionamiento como una función de la posición del eje del motor y / o la velocidad mediante un componente de retroalimentación.

Mediante un algoritmo se obtiene una tabla de valores de la posición solar, y se genera una secuencia de pasos para el motor de pasos. La secuencia de pasos se calcula por el contador A donde su valor es comparado con los valores discretos de un codificador encoder por un contador B. La diferencia de los contadores dirige al motor, en la Figura 4.2 se puede observar esta secuencia.

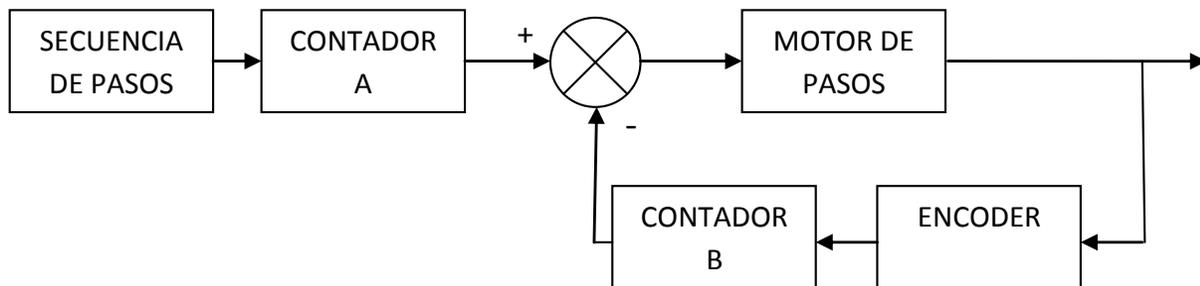


Figura 4.2. Secuencia de pasos de posición.

Esta metodología de control ha sido simulada en Simulink.

Dado a los tiempos de implementación del proyecto y presupuesto, no fue posible implementar la retroalimentación con un sensor, sin embargo, la retroalimentación se hizo mediante un algoritmo lo cual se describió en la sección 3.1.1 y 3.3.

El heliostato requiere un control de posición para regular los ángulos característicos en elevación y acimut. La acción de control puede ser establecida en

tres etapas. Definamos U_h como la acción de control cuando el espejo está posicionado en reposo como se muestra en la Figura 4.3, donde la dirección del vector solar “ r ” se dirige hacia cenit de acuerdo a la Figura 3.1; U_0 es la acción de control requerida para colocar la posición del espejo en el valor inicial, tal que el vector r es dirigido hacia el punto objetivo, y U_t es la acción de control requerida para seguir el movimiento solar aparente, ya calculado.



Figura 4.3. Helióstato en Posición de Reposo.

La Figura 4.4 muestra los resultados de la simulación donde el valor final corresponde a 15 valores discretos con una resolución del actuador de 0.9° .

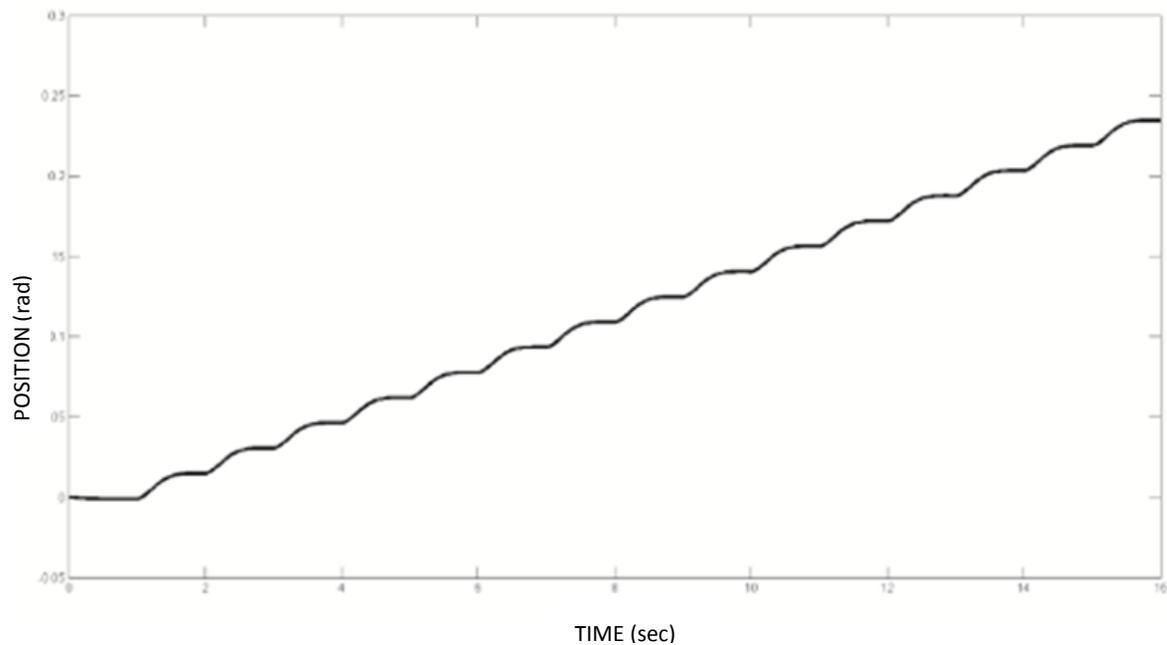


Figura 4.4. Secuencia de pasos de posición.

La estructura de control de la Figura 4.2 ha sido implementada utilizando LabView. Se probó el esquema de control en el campo de pruebas de helióstatos en tiempo real para verificar las capacidades de seguimiento solar del diseño realizado. De la Figura 4.5 a la 4.8 se muestran varias perspectivas de las pruebas de seguimiento en tiempo real realizada en el *CPH*, donde el vector r es redirigido a una superficie Lambertiana montada en lo alto de la torre.



Figura 4.5. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 1.



Figura 4.6. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 2.



Figura 4.7. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 3.



Figura 4.8. Seguimiento solar en tiempo real perspectiva 4.

4.2. Prueba Ópticas

Se realizaron dos pruebas en los equipos del CPH, uno de mancha solar reflejada y el otro de deflectometría con el fin de comprobar el desempeño del helióstato, estas pruebas fueron realizadas por personal técnico del CPH debido a la complejidad de la misma.

La prueba de mancha solar reflejada permite estudiar la precisión de la proyección del sol por el helióstato a un punto fijo (torre), observando la deriva de la mancha reflejada como función del tiempo (Peña Cruz, 2011). Se dirigen los rayos solares con el helióstato hacia el blanco Lambertiano y se observa con una cámara fija a nivel de piso la mancha de luz creada en el mismo (Figura 4.9).

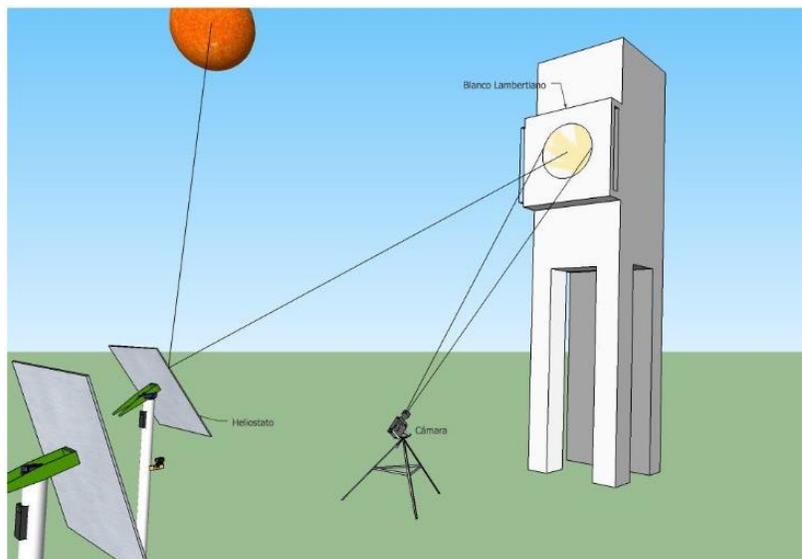


Figura 4.9. Prueba de mancha solar

La forma de esta mancha está influenciada por todos los aspectos de la óptica del heliostato, incluyendo la mecánica de la estructura de soporte de las facetas. Mediante comparación de ésta mancha con simulaciones de trazo de rayos es posible obtener valores para el error óptico global del heliostato. En la Figura 4.10 se muestra el heliostato durante la prueba de mancha solar reflejada.



Figura 4.10. Prueba de mancha solar en tiempo real.

En la Figura 4.11 se presentan las curvas de las coordenadas X y Y del centroide de la imagen solar reflejada por el helióstato en función del tiempo. Las líneas continuas representan el comportamiento del centroide, donde se puede observar el comportamiento real por las líneas oscilatorias alrededor de la trayectoria principal. La amplitud de las oscilaciones se caracteriza mediante la desviación estándar de los datos. Los valores horizontal y vertical obtenidos son, respectivamente 0.215 m y 0.067 m, los cuales reflejan bien la amplitud observada en las imágenes. Por el tamaño de pixel de la cámara, la máxima capacidad de resolución de movimiento sobre la pantalla es de 0.0175 cm.

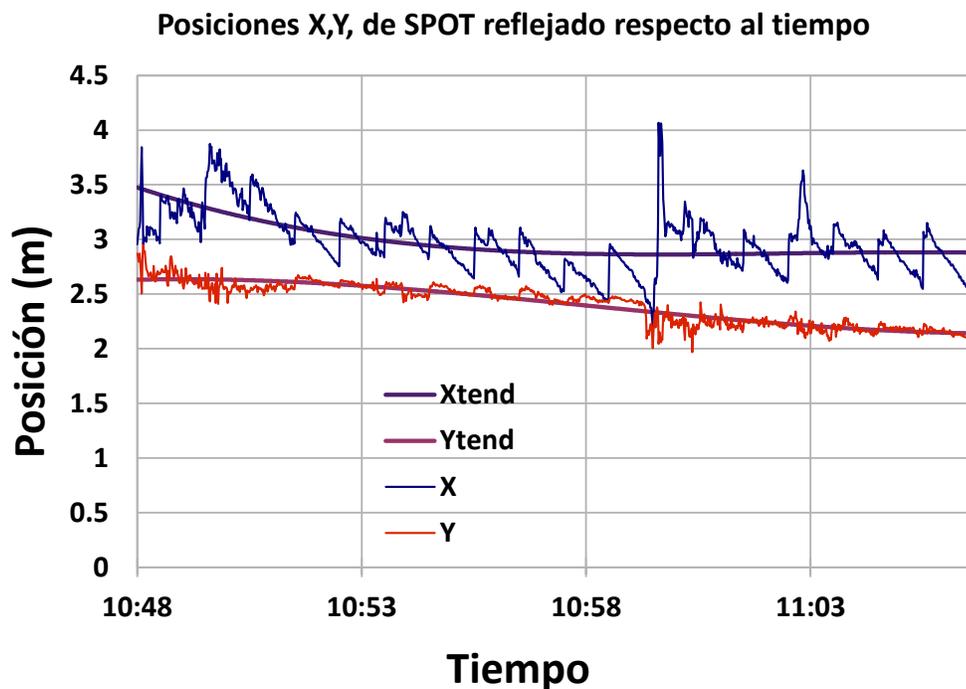


Figura 4.11. Posiciones horizontal y vertical del centroide de la mancha solar.

En la prueba de deflectometría o proyección de franjas, se sitúa un proyector en el campo de helióstatos a una distancia suficiente para que un patrón de franjas proyectado en el blanco lambertiano abarque por completo el área por la noche. Una cámara digital localizada en la cima de la torre toma imágenes de los helióstatos, los cuales son orientados de tal manera que el blanco lambertiano con el patrón de franjas pueda ser visto en la reflexión (Peña Cruz, 2011). Las distorsiones producidas en el patrón de franjas permiten determinar con las

pendientes locales de las superficies de los espejos, de manera que se puede hacer una estadística sobre la planicidad del mismo. Esta prueba debe ser llevada a cabo de noche para evitar la influencia de la luz ambiental en la observación, en la Figura 4.12 se puede observar esta prueba.

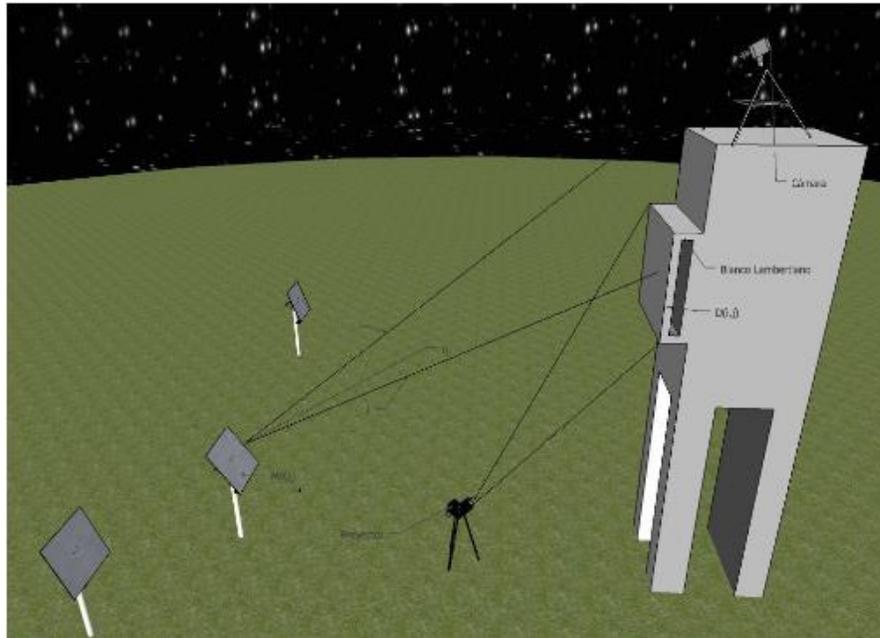


Figura 4.12. Arreglo para pruebas de deflectometría o proyección de franjas.

En la Figura 4.13 se observa la proyección de franjas que se hizo sobre el blanco Lambertiano.

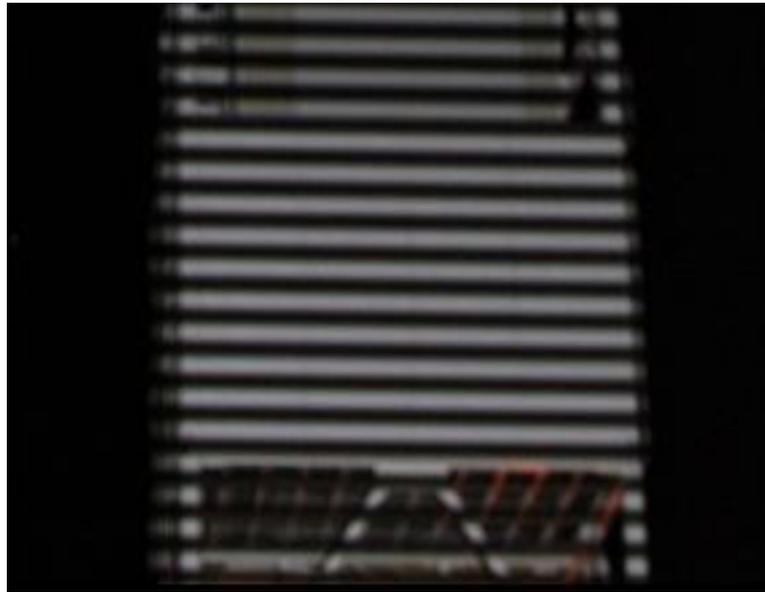


Figura 4.13. Patrón de franjas proyectadas sobre el blanco Lambertiano.

En la Figura 4.14 se pueden observar las imágenes de los patrones reflejados por el helióstato, tal y como fueron capturados por la cámara. Puede apreciarse la distorsión de las franjas horizontales y verticales, que evidencian las desviaciones de la superficie con respecto a una geometría plana. Se analizan las imágenes obtenidas y se hace un mapa de las pendientes locales del espejo, en las direcciones horizontal y vertical. Dichas pendientes representan las desviaciones de la superficie respecto a un plano.

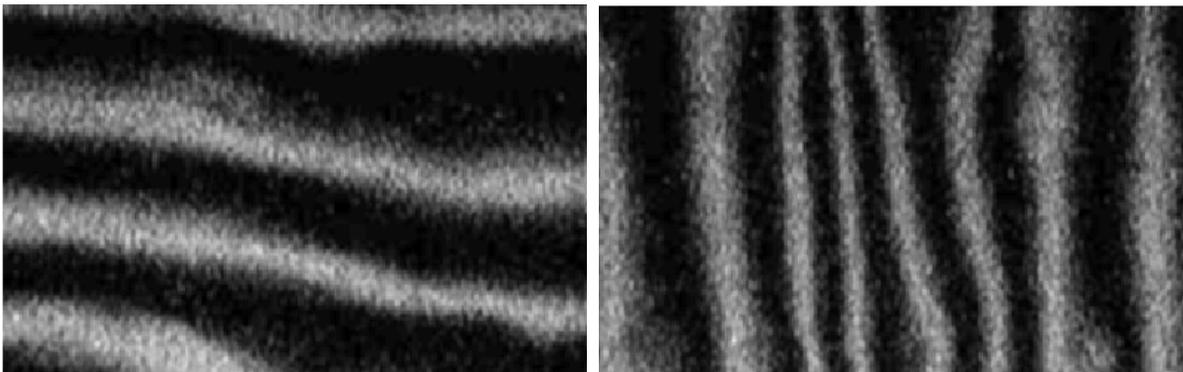


Figura 3.14. Patrón de franjas reflejadas por el helióstato.

Las pruebas permitieron confirmar la deformación que presenta la faceta. Los errores angulares corresponden a 2.41 mrad y 2.18 mrad, respectivamente (0.138° y 0.124°), pero causan desviaciones del doble de tamaño. Es recomendable que dichos errores busquen reducirse por debajo de 1.5 mrad

4.3. Implementación de Algoritmos en Tiempo Real

Para determinar la capacidad de seguimiento del heliostato, se implementó en LabView un sistema de control en lazo abierto. Los resultados experimentales en campo, han demostrado que el heliostato es capaz de seguir las posiciones del Sol en lazo abierto acompañado de un error de seguimiento.

Existen varias fuentes de error involucradas en el control de movimiento de un heliostato; tolerancias dimensionales de los mecanismos, problemas de instalación que producen tanto desviación en el eje del pedestal en inclinación, o en los ángulos de acimut y elevación, así como también, errores numéricos debido a la discretización de la señal de control de movimiento. En la figura 4.15 se muestra el sistema de control propuesto en lazo cerrado por medio de un algoritmo de corrección.

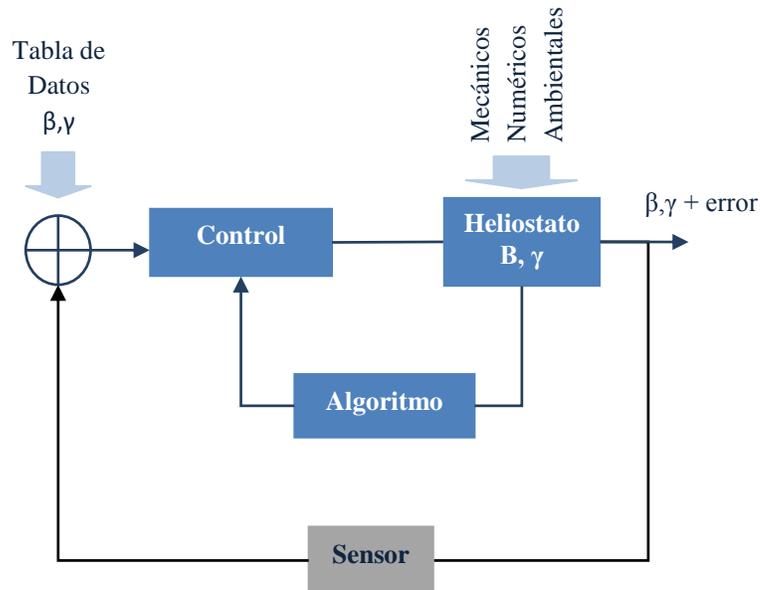


Figura 4.15. Esquema de control en lazo cerrado por algoritmo de seguimiento.

Usando un modelo algebraico, con el que se determinaron los ángulos característicos en elevación (β) y acimut (γ) de cada helióstato, de donde se calcularon el vector posición $\gamma(k)$, $\beta(k)$ para cada día del año. Implementando esto para un día y localización específico se muestran las Figuras 4.16 y 4.17, donde se observa la dinámica de los ángulos de acimut y elevación respectivamente, con una velocidad de cambio de posición lenta conforme el tiempo, debido a los cambios de posición lentos del Sol.

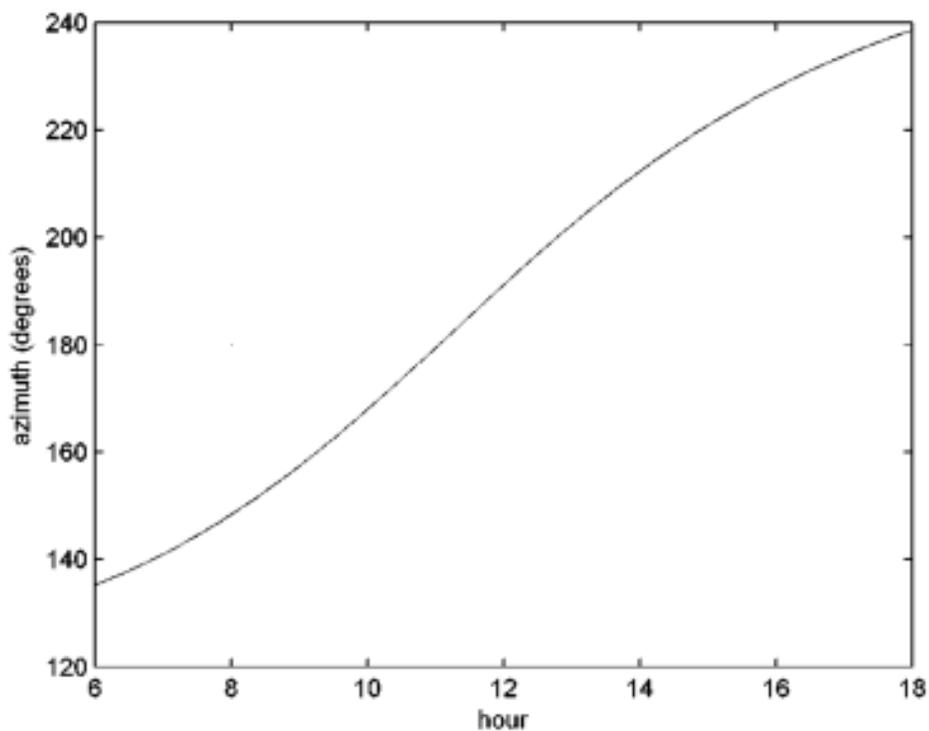


Figura 4.16. Comportamiento del ángulo acimut.

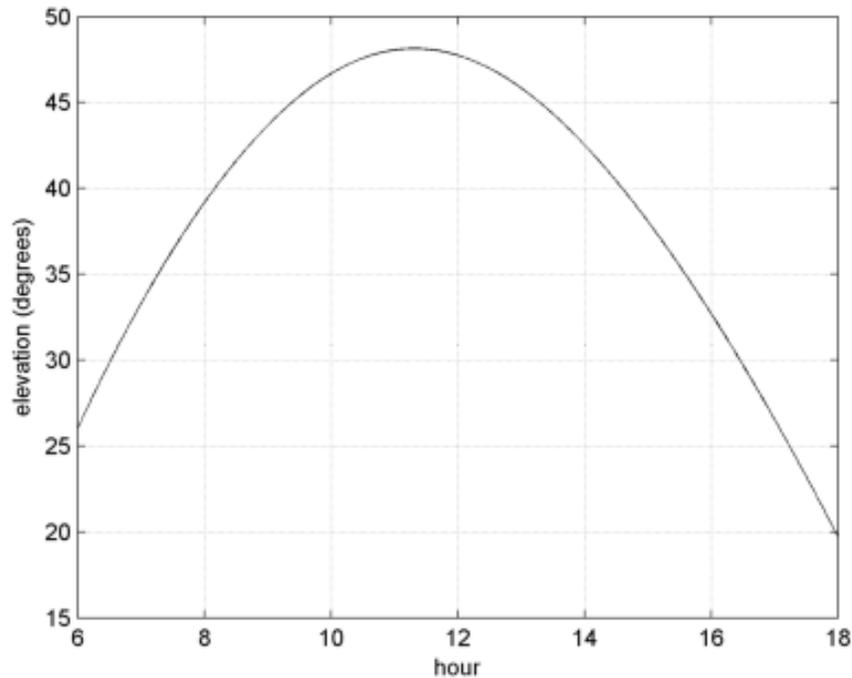


Figura 4.17. Comportamiento del ángulo elevación.

La Figura 4.17 representa el valor verdadero del ángulo característico β el cual servirá de comparación para el nuevo valor tomado después de la corrección del error. Se tomó una muestra de 721 valores para β , que corresponden a un minuto, partiendo de las 6:00 a las 18:00 horas comparado con su representación discreta.

En la Tabla 3.2, en el capítulo 3, se muestra la posición para β y γ , como ejemplo se analiza la representación en la elevación β para comparar el error generado. A las 6:02 am hay una variación de 0.1326 grados donde para alcanzar tal posición, el motor debe de dar 36.4284 pasos, los cuales son dados en 37 pasos discretos redondeados por el controlador digital. Se utilizó la instrucción ceil en Matlab para redondear hacia arriba los valores verdaderos.

Estos valores se llevan a simulación y se muestran los resultados en las Figuras 4.18 y 4.19. En la Figura 4.18 se muestra β^* vs β durante 6 horas, (β^* valor verdadero de elevación). Como se puede observar el error comienza a un valor muy cercano al cero a las 6:00 am. Y alcanza su máximo valor a las 12:00 pm aproximadamente. Esto quiere decir que la señal de la elevación (línea delgada) se

aleja de su valor óptimo (línea gruesa), con esto, teniendo un impacto inmediato en la posición ideal en el blanco Lambertiano.

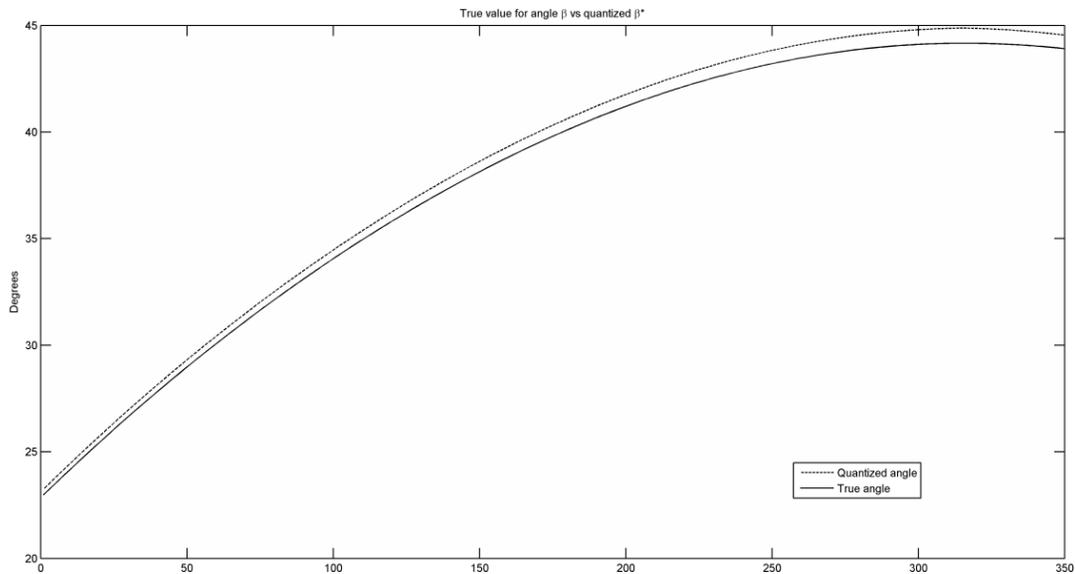


Figura 4.18. Comparación de β en su valor real y su valor corregido.

En la Figura 4.19 muestra el comportamiento del error, donde su valor tiende a cero en la misma duración de tiempo. También se logra apreciar que el error tiene un comportamiento oscilatorio.

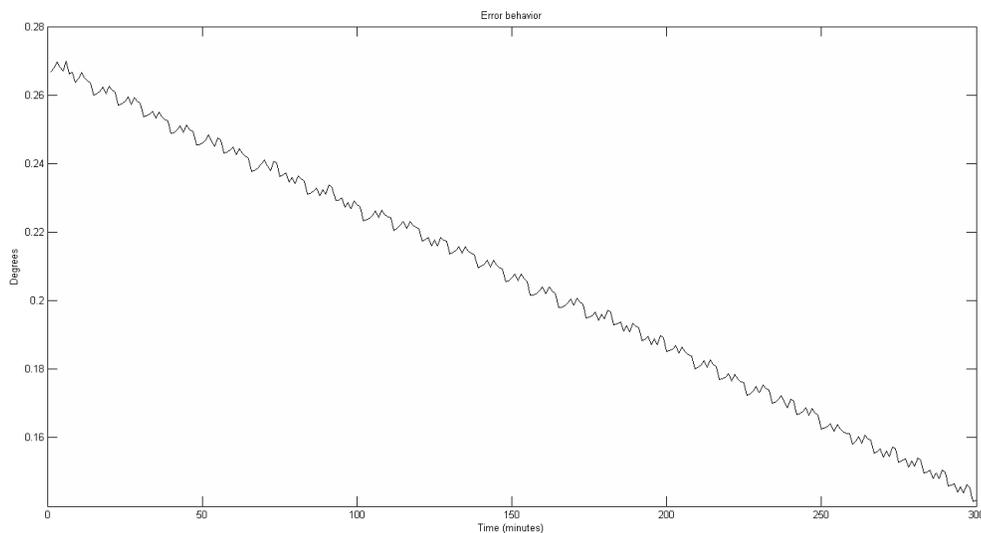


Figura 4.19. Comportamiento del error.

En la Figura 4.20 se han comparado tres señales: el valor verdadero en elevación (línea negra), su representación discreta (guiones negros), y el valor corregido (línea roja).

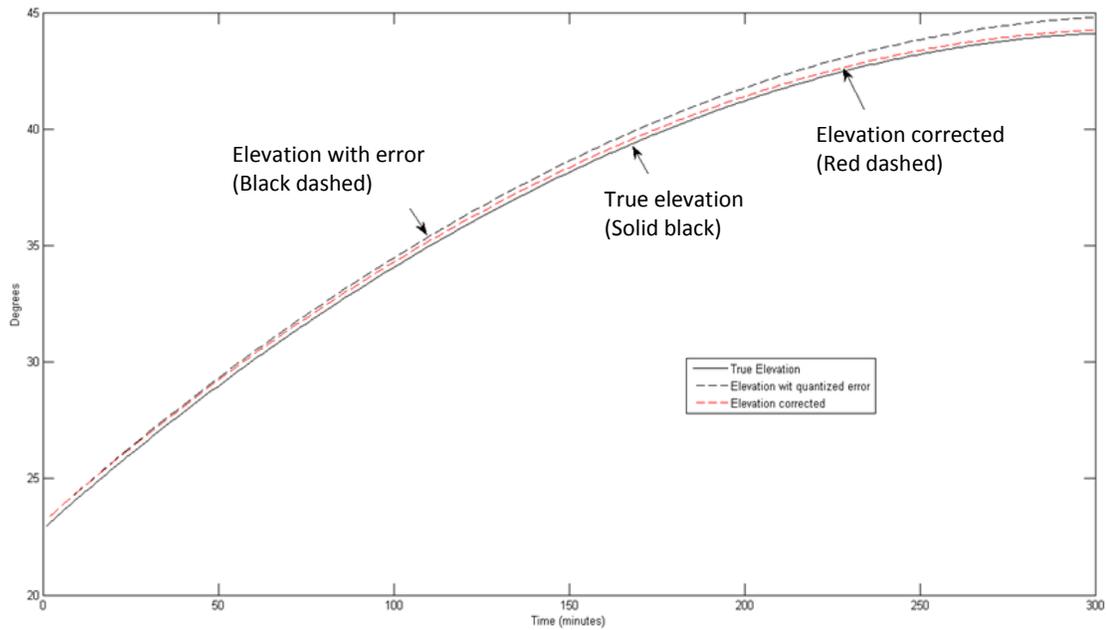


Figura 4.20. Comparación de β en su valor real, su valor corregido y su valor óptimo

Donde se muestra a simple vista una desviación entre el valor verdadero y la elevación con el error, así como, el acercamiento al valor verdadero después de agregar la corrección.

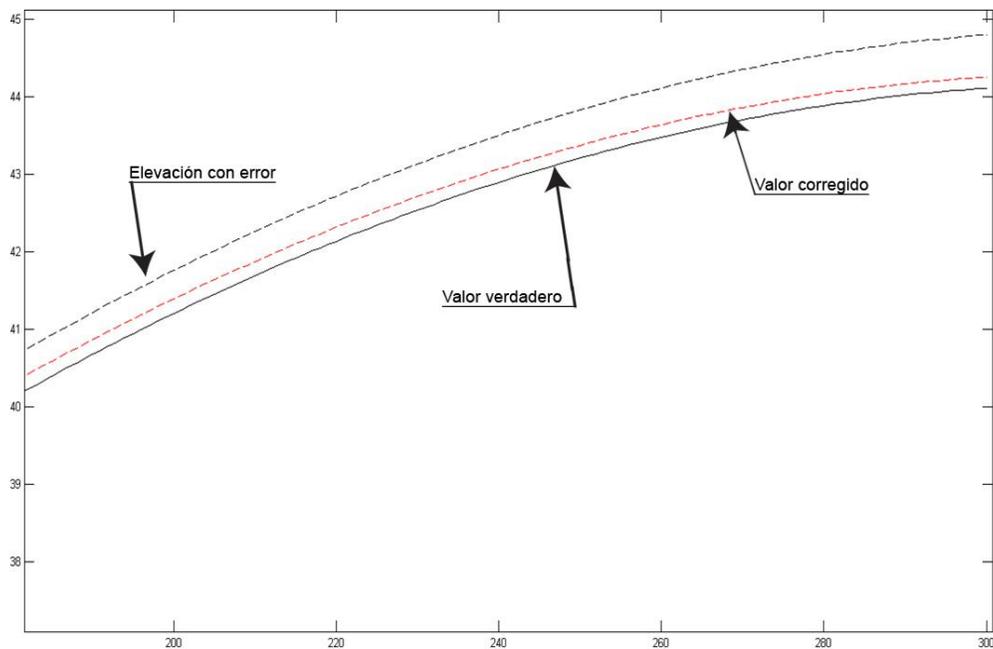


Figura 4.21. Acercamiento del comportamiento de los ángulos de elevación.

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestra que la señal de los valores de elevación con error (guiones negros) se aleja conforme pasa el tiempo de su valor óptimo (línea negra), al mismo tiempo se puede apreciar que la señal de elevación corregida (guiones rojos) con el algoritmo propuesto implementado, logra que se acerque a su valor óptimo. Con esto se consigue disminuir el error de seguimiento con el que se encontró al discretizar el valor.

En el anexo 1 se muestra el código propuesto para el tratamiento del error, este código fue implementado en matlab.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Para concluir este trabajo de tesis, este capítulo se dedicará a mostrar las conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo del trabajo en este proyecto. Lo anterior será con el fin de que se le pueda dar continuidad al proyecto, así como mostrar los beneficios obtenidos.

5.1. Conclusiones

El objetivo de esta tesis ha sido él proponer un sistema de control en lazo cerrado para el equipo de heliostato. Este objetivo se perseguía para lograr en primera instancia minimizar las perturbaciones que se presentan y así obtener un mejor rendimiento en la captación de energía solar, ya que, tales perturbaciones serían indetectables en un sistema de lazo abierto; en la búsqueda de éste objetivo se encontró con un error de seguimiento, el cual desvía el espejo del heliostato de su posición óptima, de aquí surge la necesidad de darle un tratamiento a éste error.

Se desarrolla un algoritmo que dependiendo del comportamiento del error de seguimiento toma acción para corregir tal error. Este algoritmo fue aplicado al equipo en tiempo real y se hicieron pruebas de simulación, donde se pudo observar una mejoría en el comportamiento del error. Gracias a la simulación se pudo hacer una comparación del comportamiento del algoritmo original sin corrección, con el algoritmo con corrección y con el comportamiento óptimo, en base a la comparación de estas tres señales se puede concluir que el algoritmo de corrección del error de seguimiento ha corregido el comportamiento del heliostato y se puede esperar un mejor desempeño en campo, esto se puede dirigir a que se obtendrá mayor cantidad de energía captada por la torre central.

Por causas de presupuesto del proyecto no se pudo llevar a cabo un equipamiento de sensores encoder a los heliostatos, pero se logró hacer pruebas en tiempo real y en simulación para comprobar que la propuesta de control en lazo cerrado sí beneficia el comportamiento final y obviamente a la captura de energía

solar. Con esto se puede concluir que un equipo de seguimiento solar eficiente requiere de varios componentes precisos.

5.2. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se espera lograr equipar los nueve prototipos de helióstatos con sensores medidores de posición encoder, como se ha propuesto anteriormente y hacer las pruebas para la toma de datos y comparación.

5.3. Observaciones

En este proyecto se trabajó con varias áreas expertas en diferentes elementos para complementar el trabajo. Mi aportación ha sido la corrección del ángulo y la proposición y prueba del sistema de control en lazo cerrado.

6. BIBLIOGRAFÍA

Alciatore, D. G., & Histand, M. B. (2008). *Introducción a la Mecatrónica y los Sistemas de Medición*. Mexico, D.F.: McGraw-Hill.

Arvizu, D. E. (1991). *National Renewable Energy Laboratory*. Recuperado el 26 de Abril de 2011, de NREL: <http://www.nrel.gov>

Atlas de Radiación Solar de Colombia. (1990). 113-126.

Benitez Baltazar, V. H., Anaya Eredias, C., & Ramirez Ponce de León, H. M. (2010). Síntesis de Señales de Control para Seguimiento Solar y su Aplicación a un Prototipo de Heliostato. *IEEE* , 642-647.

Benitez, V. H., Mizquez, Z. E., & Pacheco, J. H. (2012). *Real time solar tracking algorithm applied to a solar power plant*. Hermosillo: IEEE.

Bishop, R. H. (2002). Mechatronics Sensors and Actuators. En *The Mechatronics Handbook*. Austin, Texas: Editor-in-Chief.

Blanco Muriel, M., Alarcón Padilla, D. C., Lopez Moratalla, T., & Lara Coira, M. (2001). Computing the Solar Vector. *Elsevier* , 431-441.

Cabanillas, R. E. (2008). *Perspectivas de las Tecnologías de Concentración Solar en México*. México: Reporte Técnico, Universidad de Sonora.

Condit, R. (2004). Stepping Motors Fundamentals. *Microchip* , 1-22.

Csanyi, E. (2008). Solar Power Tower. *The California Energy Commission* , 6-23.

De Groot, H. (2008). *Solar Energy - Power for a new age*. Auckland, Nueva Zelandia: Archgen.

Herbert, D. A., & Mutone, G. A. (1980). A Distributed Computer Control Configuration. *IEEE* , 1062-1063.

INEGI. (2011). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 9 de Junio de 2011, de INEGI: <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/son/clim.cfm?c=444&e=26>

ITACA. (Abril de 2005). Recuperado el 1 de Febrero de 2011, de <http://itacanet.org>

Kearney, D. (2005). Los recursos energéticos renovables. En A. Donald W., *Transición para un futuro basado en la fuentes renovables de energía* (págs. 56-70). México: ISES.

Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* . México: Pearson.

Lee, C. Y. (2009). Sun Tracking Systems: A Review. *Sensors* , 16.

Lior, N. (2010). The current status and possible sustainable paths to energy generation and use. *IEEE* .

Ogata, K. (2008). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson Educación.

- Osuna, R., & Cerón, F. (1999). Desarrollo de un prototipo de heliostato para la planta Colon Solar. *energía* , 71-79.
- Pacheco Ramírez, J. H., Anaya Pérez, M. E., & Benitez Baltazar, V. H. (2010). Sistema de control para seguimiento solar basado en visión artificial. *CIINDET* , 1-6.
- Peña Cruz, M. I. (2011). *Caracterización de helióstatos por el método de proyección de imágenes*. Texmico: Maestría .
- Pier, V. (2000). Industrial transformation towards sustainability of the energy system. *Baltzer* , 157-163.
- Rincón Mejía, E. A. (1999). Estado del arte de la investigación en energía solar en México. México: ICA.
- Schnatbaum, L. (2009). Solar Thermal Power Plants. *Springer* , 127-140.
- Stanley R., B. (2001). Renewable energy today and tomorrow. *IEEE* , 1216-1226.
- Villa Martínez, H. A., Robles Garcia, S., & Cabanillas López, R. E. (2001). Página climática de la Universidad de Sonora. *X Congreso Internacional de Computación* , 2-30.
- Wang, Z., & Li, J. (2009). China's renewable energy development. *Emerald* , 50-61.
- Ward Cheney, E., & Ronald Kincaid, D. (2008). Numerical Mathematics and Computing. Belmont: Thomson.
- Wu, J., CK, C., JW, L., FH, C., & LH, C. (2009). Solar Radiation Prediction Using Statistical Approaches. *The institute of electrical and electronics engineers* , 1-4.

7. ANEXOS

7.1. Anexo 1

Algoritmo implementado en matlab para la corrección del error de seguimiento solar.

```

For i = 1:721,
    if i < 721
        if x(i, 1) < 1
            x(i + 1, 1) = x(i + 1, 1) + x(i, 1)
        end
        if x(i, 1) == 1
            if x(i + 1, 2) > 0
                x(i + 1, 2) = x(i + 1, 2) - 1
            else
                x(i + 1, 2) = x(i + 1, 2) + 1
            end
        end
    end
    if x(i, 1) > 1
        a = x(i, 1) - 1
        x(i + 1, 1) = x(i + 1, 1) + a
        if x(i + 1, 2) > 0
            x(i + 1, 2) = x(i + 1, 2) - 1
        else
            x(i + 1, 2) = x(i + 1, 2) + 1
        end
    end
end
end
end

```