

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA

UNIDAD QUERÉTARO

POSGRADO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

"SISTEMA AUTOMATIZADO DE POSICIÓN PARA UN HELIÓSTATO DE REFLEXIÓN"

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

PRESENTA:

CÉSAR DANIEL SÁNCHEZ SEGURA

DIRECTORES DE TESIS: DR. JORGE PINEDA PIÑÓN DR. EDUARDO MORALES SÁNCHEZ

QUERÉTARO, QRO. NOVIEMBRE DE 2014





Acta de revisión de tesis

SIP-14-BIS INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO ACTA DE REVISIÓN DE TESIS En la Ciudad de Querétaro siendo las 12:00 horas del día 27 del mes de Octubre del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada CICATA- QRO por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de para examinar la tesis titulada: SISTEMA AUTOMATIZADO DE POSICIÓN PARA UN HELIÓSTATO DE REFLEXIÓN Presentada por el alumno: Sánchez César Daniel Segura Apellido paterno Apellido materno Nombres(s) Con registro: B 2 0 6 6 5 1 aspirante de: Maestría en Tecnología Avanzada Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron APROBAR LA TESIS, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes. LA COMISIÓN REVISORA Directores de tesis jondo Jorge Pineda Piñón Dr. Eduardo Morales Sánchez Dr. Eduardo Castillo Castañeda naldo Carlos F Dr. Gabriel Villeda Muñoz 1171 PRESIDENTE DEL COLEGIO ESORES Dr. Eva González Jasso DAD QUEF



Carta cesión de derechos



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL secretaría de investigación y posgrado

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de <u>Querétaro, Qro.</u> el día <u>27</u> del mes de <u>Octubre</u> del año <u>2014</u>, el que suscribe <u>César Daniel Sánchez Segura</u> alumno del Programa de <u>Maestría en Tecnología Avanzada</u> con número de registro <u>B120665</u>, adscrito a <u>CICATA-IPN</u>, <u>Querétaro</u>, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de <u>Dr. Jorge Pineda Piñón; Dr.</u> <u>Eduardo Morales Sánchez</u> y cede los derechos del trabajo intitulado <u>Sistema automatizado</u> <u>de posición para un helióstato de reflexión</u>, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección <u>dancos5@hotmail.com</u> Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

César Daniel Sánchez Segura



"Puedo aceptar el fracaso, pero no acepto no intentarlo"

Michael Jordan

"El secreto de la sabiduría, del poder y del conocimiento es la humildad"

Ernest Hemingway

El que no sabe gozar de la ventura cuando le viene, no debe quejarse si se pasa.

Miguel de Cervantes Saavedra

"Feliz aquél que transmite lo que sabe y aprende lo que enseña".

Ana Lins dos Guimarães Peixoto

"Sobrino, siempre debes ser agradecido"

Gerardo Segura Pérez

CICATA – QUERÉTARO



Dedicatorias

Mi tesis la dedico con amor y cariño a mi padre Luis Fernando Sánchez Hernández y a mi madre Lucia Victoria Segura Pérez, quienes son un gran ejemplo a seguir; que me enseñaron a valorar todo aquello que tenemos, que logramos y que compartimos en la vida, por esto y darme la vida... Muchas gracias papás.



Agradecimientos

Al Dr. Jorge Pineda Piñón, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, su apoyo y sobre todo por la confianza brindada.

Al Dr. Eduardo Morales Sánchez, por estar siempre al pendiente de mi trabajo, por su apoyo, orientación, por brindarme consejos cuando más los necesitaba aún sin haberlos pedido y por motivarme a realizar las cosas de una mejor manera.

Al Dr. Gabriel Villeda Muñoz y a M. en C. Maximiano Francisco Ruiz Torres por apoyarme en la realización de este trabajo brindándome sus conocimientos y por haber sido parte de mi comité tutorial.

Al Dr. Eduardo Castillo y al Dr. Reynaldo Pless gracias por haber aceptado ser parte de mi comité revisor por sus comentarios siempre tan atinados.

A mis grandes amigos que conocí en la cabina 2 y que me acompañaron durante este tiempo: Saúl Chávez, Carlos Maciel, Raymundo Vázquez, Robert Montes, Rosa María Barrón, Dulce María Ventura, Javier Gurrola, Ángel Cabrera, Fátima Hernández, Pablo Aburto y Miguel Ángel San Pablo.

A mis amigos de la niñez y estar conmigo en todo momento: Luis Parrilla, Miguel Infante, Christian Escoto, José María García, Paola Pacheco y Valeria Morquecho.

A mis hermanos que no solo han sido hermanos sino mis grandes amigos: Felipe y Fernando Sánchez.

A todos... Muchas gracias!!!



Índice general

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS	I
CARTA CESIÓN DE DERECHOS	11
DEDICATORIAS	.IV
AGRADECIMIENTOS	v
	1
INDICE DE TABLAS	7
SÍMBOLOS	. 7
RESUMEN	. 9
ABSTRACT	10
	11
	40
1.1. ANTECEDENTES	12
I.Z. JUSTIFICACION	19
	20
	20
1.4. ΩRIETIVOS	23
Objetivo general	23
Objetivos específicos	23
1.5 METODOLOGÍA	23
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	26
	26
Calendario solar	20
Calendario Solar	20
l av da Raflavión da Snall	20
Geometría Sol-Tierra	28
Ángulos solares	28
Coordenadas horizontales	29
22 CENTRALES TERMOSOLARES	30
2.3 DISCO PARABÓLICO	30
2.4 HELIÓSTATO	31
Tipo de movimientos.	31
2.5. ABERRACIÓN DE REFLEXIÓN EN HELIÓSTATOS	33
2.6. Representación de la orientación	33
Matrices de rotación	33
Matrices de transformación homogénea	37
Coordenadas esféricas y cilíndricas	38
Motores de corriente directa	39
Control	40
2.7. MOMENTO DE INERCIA DE UNA SUPERFICIE	43
2.8. MOMENTO DE INERCIA DE MASAS	44



2.9. Presión dinámica	45
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	46
 3.1. MATERIALES	46 51 51 53 56 58
CAPÍTULO 4. DEFORMACIÓN DE ACTUADORES LINEALES	61
 4.1. INTRODUCCIÓN	61 62 62 62 63 63
CAPÍTULO 5. MODELADO DE LOS MOVIMIENTOS DE SEGUIMIENTO	65
 5.1. METODOLOGÍA 5.2. CÁLCULO DE VECTOR DE POSICIÓN DE SOL	66 71 75 76 76 76 79 80 81 82 84 88
CAPÍTULO 6. CONTROL DE POSICIÓN	90
 6.1. VARIACIÓN EN LA POSICIÓN DE LOS EJES DE LOS MOVIMIENTOS PRIMARIOS DEBIDO A LA INFLUENC VIENTO 6.2. IDENTIFICACIÓN DEL JUEGO MECÁNICO	CIA DEL 90 91 93 FOS DE 95 97
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIONES	99
7.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES 7.2. REPETITIVIDAD Y EXACTITUD DEL HELIÓSTATO AUTOMATIZADO 7.3. SOFTWARE	99 100 101
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	103
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXO 1	108



Índice de figuras

Figura 1.1 Sistema de horno solar (Villeda Muñoz, 2010)	. 12
Figura 1.2 a) Vista frontal de helióstato. b) Vista posterior del helióstato. (Villeda Muñoz, 2010)	. 12
Figura 1.3 Helióstato Azimutal – elevación (Aiuchi, y otros, 2006)	. 13
Figura 1.4 Posición de las fotoceldas y mecanismo del seguidor solar (Aiuchi, y otros, 2006)	. 13
Figura 1.5 Error angular (Aiuchi, y otros, 2006)	. 14
Figura 1.6 Simulación del sistema (Wei, y otros, 2012)	. 14
Figura 1.7 a) helióstato Azimutal-Elevación, b) Objetivo (Guo, y otros, 2012).	. 15
Figura 1.8 a) Puntos de reflexión de láser en la primera prueba, b) Puntos de reflexión del láser en	una
segunda prueba (Guo, y otros, 2012)	. 15
Figura 1.9 Helióstato Rotación-Elevación (Wei, y otros, 2011).	. 16
Figura 1.10 Contornos medido y calculados de la imagen en a) Helióstato 1 y b) helióstato 10 (Colla	ado,
2010)	. 16
Figura 1.11 Helióstato (Chen, y otros, 2001)	. 17
Figura 1.12 Movimiento de espejos maestro y esclavos (Chen, y otros, 2001)	. 17
Figura 1.13 Rastreador del Sol (Tapia, 2008).	. 18
Figura 1.14 Sistema de control (Tapia, 2008).	. 18
Figura 1.15 Horno tradicional (Villeda Muñoz, 2010)	. 20
Figura 1.16 Sistema de coordenadas a Centro de la Tierra, basada en (Chen, y otros, 2001)	. 21
Figura 1.17 Sistema de coordenadas esféricas, basada en Wei, 2011	. 22
Figura 1.18 Vectores de incidencia y reflexión de la luz (Chen, y otros, 2001).	. 22
Figura 1.19 a) Cambio de posición de espejo central con respecto a la posición del Sol b) Eje	de
rotación y eje de elevación (Chen, y otros, 2001)	. 23
Figura 1.20 Metodología del desarrollo de tesis	. 25
Figura 2.1 Distribución espectral de la luz del Sol (Meinel, 1982)	. 26
Figura 2.2 Representación de constante solar (Garcia-Badell, 1983)	. 27
Figura 2.3 Reflexión de la luz (Hecht, 2002).	. 27
Figura 2.4 Plano de la eclíptica y la posición de la Tierra en los solsticios de invierno y verand	э, у
equinoccios de primavera y otoño. (Eicker, 2011)	. 28
Figura 2.5 Ángulo de declinación solar (Eicker, 2011).	. 28
Figura 2.6 Ángulo horario (Eicker, 2011)	. 29
Figura 2.7 Coordenadas horizontales (Eicker, 2011).	. 29
Figura 2.8 Torre central CESA-I (González, y otros, 2004)	. 30
Figura 2.9 Disco parabólico (García, y otros, 2011)	. 30
Figura 2.10 Helióstato (González, y otros, 2004).	. 31



Figura 2.11 Helióstato Azimutal-Elevación (Chong, y otros, 2011).	. 31
Figura 2.12 Helióstato Elevación-Rotación (Chong, y otros, 2011)	. 32
Figura 2.13 Helióstato Rotación-Rotación (Wei, y otros, 2011).	. 32
Figura 2.14: Error de reflexión (Aiuchi, y otros, 2006).	. 33
Figura 2.15. a) Orientación de un sistema OUV respecto a otro OXY en un plano b) rotación de	un
sistema OUV respecto a otro OXY en un plano (Barrientos, y otros, 1997).	. 34
Figura 2.16 Rotación del sistema OUVW con respecto al eje OX (Barrientos, y otros, 1997)	. 35
Figura 2.17 Rotación del sistema OUVW con respecto al eje OY (Barrientos, y otros, 1997)	. 36
Figura 2.18 Rotación del sistema OUVW con respecto al eje OZ (Barrientos, y otros, 1997)	. 36
Figura 2.19 a) Sistema de coordenadas cilíndricas b) Sistema de coordenadas esféricas (Marsder	п, у
otros, 1991)	. 39
Figura 2.20 Señal PWM (Toncich, 1994).	. 40
Figura 2.21 Componentes básicos del control por lazo cerrado (Visioli, 2006)	. 40
Figura 2.22 Diagrama de bloque del control por lazo cerrado (Visioli, 2006)	. 41
Figura 2.23 Diagrama de control on-off con lazo de control (Balcells, y otros, 1997)	. 43
Figura 2.24 Definición de momento de inercia de área sobre un plano (Hibbeler, 2004)	. 43
Figura 2.25 Definición de momento de inercia de masa (Meriam, y otros, 2002)	. 44
Figura 2.26 Momento de inercia másico respecto a un eje (Meriam, y otros, 2002)	. 45
Figura 3.1 Actuadores lineales (Cortesía de Warner)	. 46
Figura 3.2 Gato de tijera eléctrico (cortesía Mikels).	. 47
Figura 3.3. Placa de desarrollo Arduino Mega 2560	. 47
Figura 3.4 Sensor angular (cortesía de TT electronics)	. 48
Figura 3.5 Placa RTC (Cortesía de 5hertz)	. 48
Figura 3.6 Motodrivers Sabertooth 2x25	. 49
Figura 3.7 Señal PWM con sentido de giro de motor horario con ancho de pulso: a) 98.4% b) 74.6%	% c)
49.2% d) 23.8%	. 50
Figura 3.8 Señal PWM con sentido de giro de motor antihorario con ancho de pulso: a) 23.8%b) 49.	2%
c) 74.6% d) 98.4%	. 50
Figura 3.9 Fuente de voltaje	. 51
Figura 3.10 a) Alcance del movimiento de elevación con el actuador lineal contraído b) CAD	. 51
Figura 3.11 a) Alcance del movimiento de elevación con el actuador lineal extendido b) CAD	. 52
Figura 3.12 Esquema de movimiento de elevación	. 52
Figura 3.13 a) Vista trasera del helióstato con actuador lineal contraído b) Acercamiento	. 54
Figura 3.14 a) Vista trasera del helióstato con actuador lineal extendido b) Acercamiento	. 54
Figura 3.15 Esquema de movimiento de rotación.	. 55
Figura 3.16 Esquema de materiales de control	. 56
Figura 3.17 Conexión de selección de esclavo (cortesía de DimensionEngineering)	. 57



Figura 3.18 Tablero de control 58
Figura 3.19 a) Actuador lineal instalado para el movimiento de elevación b) Sistema cremallera – piñón
instalado sobre el movimiento de rotación
Figura 3.20 Sistema cremallera – piñón del movimiento de rotación.
Figura 3.21 a) vista frontal del sensor angular del movimiento de rotación b) vista lateral del sensor
angular del movimiento de rotación
Figura 3.22 a) vista frontal del sensor angular del movimiento de elevación b) vista lateral del sensor
angular del movimiento de elevación 60
Figura 3.23 a) Vista lateral de actuador instalado de un movimiento secundario, b) Vista trasera de
actuador instalado de un movimiento secundario 60
Figura 4.1 a) Helióstato H1 vista frontal. b) CAD helióstato H1 vista trasera (Cortesía de
LightManufacturing)
Figura 4.2 Comportamiento del viento al incidir con los espejos del helióstato
Figura 5.1 Coordenadas horizontales. (Eicker, 2011)
Figura 5.2 Mapa de uso horario (1995) 68
Figura 5.3 Corrección de ángulo azimut 69
Figura 5.4 Diagrama de flujo para el cálculo del vector de posición de Sol
Figura 5.5 Representación del vector de incidencia HS y vector de reflexión HC
Figura 5.6 a) Ángulos de movimiento de rotación y elevación b) Fie trasladado longitud l 72
Figura 5.7 Vector bisectriz N
Figura 5.7 Vector bisectriz N
Figura 5.7 Vector bisectriz N
Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C 77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C 79
Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80
Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E_3S y vector de reflexión E_3C .80
Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E_3S y vector de reflexión E_3C .80Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.81
Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E_3S y vector de reflexión E_3C .80Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.81Figura 5.14 Representación de vector de incidencia E_4S y vector de reflexión E_4C .81
Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E_3S y vector de reflexión E_3C .80Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.81Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.81Figura 5.14 Representación de vector de incidencia E_4S y vector de reflexión E_4C .81Figura 5.15 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.82
Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E_3S y vector de reflexión E_3C .80Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.81Figura 5.14 Representación de vector de incidencia E_4S y vector de reflexión E_4C .81Figura 5.15 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.82Figura 5.16 Trayectorias afectadas según la latitud geográfica del sistema helióstato - concentrador
Figura 5.7 Vector bisectriz N
Figura 5.7 Vector bisectriz N
Figura 5.0 (a) Augusto do finatimento do fotación y doración (b) Ejo traditado fongitad EFigura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E_3S y vector de reflexión E_3C .80Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.81Figura 5.14 Representación de vector de incidencia E_4S y vector de reflexión E_4C .81Figura 5.15 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.82Figura 5.16 Trayectorias afectadas según la latitud geográfica del sistema helióstato - concentrador84Figura 5.17 Trayectorias afectadas según la fecha con una latitud de 20.57°: a) Movimiento de85
Figura 5.7 Vector bisectriz N
Figura 5.6 d) / Higheo do movimiento do foldation y distriction b) Els traductado folgitad Ellinia (12)Figura 5.7 Vector bisectriz N.75Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .77Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.77Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .79Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.80Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E_3S y vector de reflexión E_3C .80Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.81Figura 5.14 Representación de vector de incidencia E_4S y vector de reflexión E_4C .81Figura 5.15 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.82Figura 5.16 Trayectorias afectadas según la latitud geográfica del sistema helióstato - concentrador84Figura 5.17 Trayectorias afectadas según la fecha con una latitud de 20.57°: a) Movimiento de85Figura 5.18 Trayectorias afectadas por la distancia existente entre el helióstato y el concentrador85Figura 5.18 Trayectorias afectadas por la distancia existente entre el helióstato y el concentrador85
Figura 5.7 Vector bisectriz N. 75 Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E ₁ S y vector de reflexión E ₁ C. 77 Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato. 77 Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E ₂ S y vector de reflexión E ₂ C. 79 Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato. 80 Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E ₃ S y vector de reflexión E ₃ C. 80 Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato. 81 Figura 5.14 Representación de vector de incidencia E ₄ S y vector de reflexión E ₄ C. 81 Figura 5.15 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato. 82 Figura 5.16 Trayectorias afectadas según la latitud geográfica del sistema helióstato - concentrador parabólico en el día 20 de Enero: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación. 84 Figura 5.17 Trayectorias afectadas según la fecha con una latitud de 20.57°: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de rotación. 85 Figura 5.18 Trayectorias afectadas por la distancia existente entre el helióstato y el concentrador parabólico: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación. 85 Figura 5.19. Trayectorias afectadas por la relación de altura existente entre el helióstato y el



Figura 5.20 Trayectorias afectadas por la compensación compensar el ángulo azimut al tener una
desviación entre el eje helióstato concentrador parabólico y el eje Norte - Sur geográfico: a)
Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación
Figura 5.21 Trayectorias afectadas por la distancia entre el pivote del helióstato y la superficie del
espejo maestro en el día 20 de Enero: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación 87
Figura 5.22 Incidencia del vector de reflexión sobre el concentrador parabólico cuando L = 0.6 m, C
(26 _i , 0 _j , -2 _k) m, Y _c =0, φ=20.57° durante el día 20 de Enero
Figura 5.23 Incidencia del vector HC sobre el concentrador al cambiar la posición del Sol cada 3
minutos y mantener la posición angular de los movimientos primarios del helióstato a) 10 horas, b) 11
horas, c) 12 horas y d) 13 horas
Figura 5.24 Área de trabajo del vector de Sol reflejado desde el helióstato hasta el concentrador
parabólico
Figura 6.1 Variación de la posición del movimiento de elevación por la afectación de fuerzas externas
al sistema
Figura 6.2 Variación de la posición del movimiento de rotación por la afectación de fuerzas externas al
sistema
Figura 6.3 Repuesta del movimiento de elevación a una señal escalón en diferentes direcciones 92
Figura 6.4 Repuesta del movimiento de rotación a una señal escalón en diferentes direcciones 92
Figura 6.5 Esquema de control On-Off diseñado
Figura 6.6 Respuesta del movimiento de elevación al controlador On-Off implementado donde el error
máximo obtenido en la posición angular es de \pm 0.79°
Figura 6.7 Respuesta del movimiento de rotación al controlador On-Off implementado donde el error
máximo obtenido en la posición angular es de \pm 1.30°
Figura 6.8 a) Juego mecánico entre el eje del movimiento de elevación con la superficie de los espejos
del helióstato b) Rodamiento del eje de movimiento de elevación
Figura 6.9 Respuesta transitoria y respuesta en estado permanente del movimiento de rotación 96
Figura 6.10 Respuesta transitoria y respuesta en estado permanente del movimiento de elevación 96
Figura 6.11 Sistema automatizado del sistema helióstato con concentrador parabólico fuera de eje 98
Figura 7.1 Sistema helióstato con concentrador parabólico a las 8:15 h en el día 29 de Agosto a)
Helióstato reflejando la luz del Sol hacia el concentrador parabólico, b) incidencia de vector del
reflexión SH sobre el concentrador parabólico, c) vista trasera del helióstato d) vista lateral del
helióstato
Figura 7.2 Sistema helióstato con concentrador parabólico a las 12:32 h en el día 29 de Agosto a)
Helióstato reflejando la luz del Sol hacia el concentrador parabólico, b) incidencia de vector del
reflexión SH sobre el concentrador parabólico, c) vista trasera del helióstato d) vista lateral del
helióstato



Índice de tablas

Tabla 1 Instrucciones de Motodrivers	Sabertooth	2x25 en	modo	"Comunicación	Serial cor	n selección
de esclavo"						57
Tabla 2 Resultado de deformación en	análisis está	tico				64

CET	Tiempo de Europa Central
E₁C	Vector de reflexión del espejo 1
E ₁ C	Vector de incidencia del espejo 1
E_1E_{1a}	Vector auxiliar a del espejo esclavo 1
E ₁ E _{1b}	Vector auxiliar b del espejo esclavo 1
E ₂ C	Vector de reflexión del espejo 2
E ₂ C	Vector de incidencia del espejo 2
E_2E_{2a}	Vector auxiliar a del espejo esclavo 2
E_2E_{2b}	Vector auxiliar b del espejo esclavo 2
E ₃ C	Vector de reflexión del espejo 3
E ₃ C	Vector de incidencia del espejo 3
E_3E_{3a}	Vector auxiliar a del espejo esclavo 3
E_3E_{3b}	Vector auxiliar b del espejo esclavo 3
E ₄ C	Vector de reflexión del espejo 4
E ₄ C	Vector de incidencia del espejo 4
E_4E_{4a}	Vector auxiliar a del espejo esclavo 4
E_4E_{4b}	Vector auxiliar b del espejo esclavo 4

Símbolos



Et	Ecuación de tiempo
Н	Centro de la superficie del espejo maestro
HC	Vector de reflexión
HH₁	Vector auxiliar 1
HH ₂	Vector auxiliar 2
HS	Vector de incidencia
L	Distancia entre el pivote del helióstato y la superficie del espejo
L _c	Corrección horaria
L _{Local}	Hora local
L _{Zone}	Hora estándar
n	Día del año
Ν	Vector bisectriz normal al plano del espejo
φ	Latitud
S	Posición del Sol
TLT	Tiempo solar verdadero
α _s	Ángulo de elevación solar
β	Ángulo formado entre N y HS
β'	Ángulo formado entre N y HC
δ	Declinación solar
3	Movimiento de elevación
ε ₁	Ángulo de elevación del espejo esclavo 1
ε ₂	Ángulo de elevación del espejo esclavo 2
E 3	Ángulo de elevación del espejo esclavo 3
ε ₄	Ángulo de elevación del espejo esclavo 4
θ	Ángulo de incidencia
θ'	Ángulo de reflexión
σ	Movimiento de rotación
Ϋ́c	Ángulo azimut corregido
Ύs	Ángulo azimut
ω	Ángulo horario



Resumen

En el presente trabajo se presenta el desarrollo de un sistema automatizado de posición para un helióstato con concentrador parabólico fuera de eje; siendo el helióstato un conjunto de espejos móviles que reflejan y enfocan la luz solar a la superficie cóncava del concentrador parabólico.

Se propuso y se desarrolló una metodología para la obtención de las ecuaciones de posición de los ejes de seguimiento del helióstato: el método propuesto involucra distancias físicas de los ejes de rotación y elevación con el centro de los espejos del helióstato, la distancia física entre el concentrador parabólico y el helióstato, la orientación y localización del sistema con respecto a la Tierra y la posición del Sol; el resultado es un sistema de ecuaciones no lineales que describen la posición del Sol en el tiempo, y los movimientos que debe seguir el helióstato para mantener la reflexión de los espejos sobre el concentrador parabólico fuera de eje. Este método está planteado para un helióstato con los movimientos de rotación - elevación, sin embargo, puede ser utilizado para otras configuraciones de movimientos de seguimiento, como lo es el azimut - elevación.

La automatización del helióstato está basada en el uso de actuadores lineales para realizar el movimiento de rotación y el movimiento de elevación, los cuales son los movimientos primarios del helióstato. Para el movimiento de rotación, se diseñó un sistema cremallera – piñón con un rango de movimiento poco mayor a 180°; por otro lado, para el movimiento de elevación, se acopló un actuador lineal a la estructura de los espejos del helióstato y a la flecha del movimiento de rotación, convirtiendo de esta manera el movimiento lineal de los actuadores a movimientos angulares.

Una vez obtenido el modelo matemático del sistema helióstato con concentrador parabólico y teniendo instalados los actuadores en los movimientos de seguimiento, se procedió a corroborar el funcionamiento del sistema, para ello, se seleccionó un día cualquiera del año observándose el comportamiento del vector de reflexión del helióstato sobre el concentrador parabólico. Se observó que el vector de reflexión se mantiene constante a un punto validando las ecuaciones y el sistema automatizado de posición desarrollado.



Abstract

This work present the development of the automatize position of a heliostat with parabolic collector system; the heliostat consist of a set of mobile mirrors which reflect and focus the solar light onto the concave surface of the parabolic collector.

A methodology for obtaining the heliostat position tracking equations is proposed and developed: proposed method involves the physical distances from rotation and elevation axes with the heliostat mirrors' center, physical distances between parabolic collector and the heliostat, orientation and localization between the systems and the Earth and sun position. Resulting in a set of nonlinear equation system which describe the sun's position in time domain, and the movements which the heliostat most follow in order to maintain the mirrors' reflection over the off-axis parabolic collector. This method is constructed for a rotation-elevation movement heliostat; nevertheless it can be used for other movement configurations like azimuth-elevation.

Heliostat's automation is based on the use of linear actuators to achieve rotation and elevation movements which are heliostat's primary movements. For the rotation movement a rack and pinion gear system with movement range above 180° was designed ; on the other hand, for the elevation movement a linear actuator was coupled to the heliostat mirrors' structure and in to the rotation movement shaft which convert the linear actuators' movement in to angular movement.

Once the parabolic collector heliostat system's mathematic model is obtained and the movement actuators are installed, the next step was to corroborate the system's correct function, for this, a random day of the year was selected and the parabolic collector heliostat system reflection vector was observed. It was concluded that the reflection vector remains constant in a surface thus validating the developed automated position system equations.



Capítulo 1. Introducción

La mayor cantidad de helióstatos de espejos utilizan un sistema de posicionamiento automático donde la única variable de entrada es la posición aparente del Sol, esta posición cambia segundo a segundo a lo largo del día y la trayectoria que sigue cambia día a día, así mismo, la posición del sistema con respecto a la latitud ocasiona que la trayectoria que sigue el Sol sea diferente, esto es debido a la relación geométrica existente entre la posición del sistema, la posición aparente del Sol y el movimiento de rotación de la Tierra, por lo que es necesario modelar la relación geométrica existente entre el vector de posición del Sol, la localización del sistema, las características geométricas del helióstato y la localización del punto a donde se desea reflejar la luz del Sol.

Por esta razón, la presente investigación se estructura de la siguiente manera:

Capítulo 1. Se habla sobre investigaciones realizadas con anterioridad, se plantea el motivo y las metas de esta investigación.

Capítulo 2. Se explican los fundamentos teóricos que sustentan la investigación.

Capítulo 3. Se enlistan los materiales y la manera de cómo son utilizados para adaptar el sistema automatizado de posición para los movimientos de seguimiento diseñados por el Dr. Gabriel Villeda para el helióstato.

Capítulo 4. Se plantea una metodología de seguimiento del helióstato en base a matrices de transformación homogéneas involucrando la posición geográfica (latitud y longitud de ubicación del sistema), la posición aparente del Sol a lo largo del año, magnitudes físicas del sistema y óptica geométrica y se implementan actuadores lineales para la realización de ello.

Capítulo 6. Se explica el desarrollo de la propuesta del sistema automatizado de posición del helióstato.

Capítulo 7. Se presenta el resultado obtenido sobre el comportamiento del vector de reflexión en el concentrador parabólico implantando el algoritmo de posicionamiento desarrollado en el Capítulo 4 y utilizando el sistema de control desarrollado en el Capítulo 6.

Capítulo 8. Se presentan las conclusiones y los posibles trabajos futuros.



1.1. Antecedentes.

En Junio de 2010, el Doctor Gabriel Villeda presentó su tesis titulada "Horno solar de alta temperatura para el cocimiento de tabiques de arcilla", presenta el diseño de un horno solar conformado por un helióstato, un concentrador parabólico fuera de eje y una cámara de cocción (Figura 1.1), con una capacidad teórica de cocimiento de 10 tabiques de arcilla a una temperatura de 1050 °C (Villeda Muñoz, 2010).



Figura 1.1 Sistema de horno solar (Villeda Muñoz, 2010).

El helióstato consta de 9 espejos de 1 m² colocados en matriz de 3 filas y 3 columnas, tiene 2 movimientos primarios (elevación y rotación) y 4 movimientos secundarios; por el arreglo de los movimientos secundarios, el helióstato tiene 1 espejo maestro y 8 esclavos (Figura 1.2) con la finalidad de enfocar la luz solar sobre el concentrador parabólico al cambiar la posición del Sol a lo largo del día (Villeda Muñoz, 2010).



Figura 1.2 a) Vista frontal de helióstato. b) Vista posterior del helióstato. (Villeda Muñoz, 2010).



En el año 2004 en la ciudad de Tokio, Japón, se realiza una investigación sobre la implementación de un seguidor solar con dos fotosensores para colocar correctamente los ángulos de posición de un helióstato con respecto la posición del Sol y el concentrador. El helióstato prototipo consta de 2 movimientos globales (Azimutal-Elevación), utiliza 36 espejos circulares con movimientos independientes (Figura 1.3). La Figura 1.4 muestra la posición de dos fotoceldas colocadas de lado a lado en el fondo de la caja; hay una apertura en la parte delantera de la caja con una separación de 10 cm con respecto al fondo de la caja, reduciendo el efecto de la luz difusa. Cuando es reflejada la radiación solar desde un espejo a las fotoceldas, una fracción de la radiación pasa por la apertura y ambas fotoceldas son iluminadas parcialmente; primeramente se utilizó un sistema de control de lazo abierto (no existe retroalimentación) controlado por una computadora y posteriormente se implementa un sistema de control de lazo cerrado (Aiuchi, y otros, 2006).



Figura 1.3 Helióstato Azimutal - elevación (Aiuchi, y otros, 2006).



Figura 1.4 Posición de las fotoceldas y mecanismo del seguidor solar (Aiuchi, y otros, 2006).



La Figura 1.5 muestra el error angular observado en un solo día. El error se determinó comparando el centro de la imagen de la radiación sobre el objetivo con el obtenido por la simulación, mostrando que la refracción de la luz del Sol ocasionada por la nubes afecta el comportamiento del helióstato (Aiuchi, y otros, 2006).



Figura 1.5 Error angular (Aiuchi, y otros, 2006)

En el Instituto de Óptica Changchun del Área Mecánica y Física de la Academia de Ciencia en China se proponen ecuaciones para la simulación de trazado de rayos solares de un sistema de reflexión de torre de "haz hacia abajo" (beam-down); éstas consisten en el análisis de 31 helióstatos que reflejan la luz directa del Sol hacia un concentrador parabólico, que a su vez, refleja la luz hacia un punto debajo de él. Las ecuaciones están basadas en la Ley de reflexión de Snell y han sido modeladas en base a matrices homogéneas, el resultado de la simulación se muestra en la Figura 1.6 (Wei, y otros, 2012).



Figura 1.6 Simulación del sistema (Wei, y otros, 2012).



En el Instituto de Ingeniería Eléctrica de Beijín (China) se construyó un prototipo (Figura 1.7) de helióstato con los movimientos azimutal y elevación, el modelo matemático es en base a matrices homogéneas para identificar las variables que pueden ocasionar errores geométricos en la proyección de la imagen. Una vez obtenidas las ecuaciones del sistema, se realizan pruebas físicas con la proyección de un rayo láser direccionado al helióstato y reflejado hacia el objetivo, el resultado de la prueba se muestra en la Figura 1.8 (Guo, y otros, 2012).



Figura 1.7 a) helióstato Azimutal-Elevación, b) Objetivo (Guo, y otros, 2012).



Figura 1.8 a) Puntos de reflexión de láser en la primera prueba, b) Puntos de reflexión del láser en una segunda prueba (Guo, y otros, 2012).

Así mismo, en la Escuela Superior Changchun en colaboración con el Instituto de Ingeniería Eléctrica de China se realizó un modelo matemático de la reflexión solar de un helióstato con los movimientos rotación y elevación (Figura 1.9) en base a matrices de rotación y la ley de reflexión de Snell, tomando



en cuenta que el eje de rotación del helióstato se encuentra alineado con el objetivo (Wei, y otros, 2011).



Figura 1.9 Helióstato Rotación-Elevación (Wei, y otros, 2011).

En la Universidad de Zaragoza (España) se realiza un estudio sobre el ajuste de la densidad de flujo de los helióstatos de la Plataforma Solar de Almería (PSA). El análisis está basado en las imágenes producidas por los helióstatos. La Figura 1.10 muestra la comparación en la medición de la imagen producida por dos helióstatos de la Plataforma Solar de Almería, donde Deltax y Deltay son la diferencia entre el cálculo realizado y la mancha formada (Collado, 2010).



Figura 1.10 Contornos medido y calculados de la imagen en a) Helióstato 1 y b) helióstato 10 (Collado, 2010).



Se realiza en la Universidad de Tecnología de Malasia un prototipo de helióstato con 25 espejos acomodados en filas y columnas (Figura 1.11), lo que permite concentrar la luz solar en una superficie y no formar una imagen propia de la geometría del helióstato. Existen espejos maestros (fila 3) y espejos esclavos con la finalidad de modificar el foco del helióstato y poder direccionar la luz al objetivo de manera eficiente como lo muestra la Figura 1.12 (Chen, y otros, 2001).



Figura 1.11 Helióstato (Chen, y otros, 2001).



Figura 1.12 Movimiento de espejos maestro y esclavos (Chen, y otros, 2001).

En la Universidad Autónoma de Yucatán se desarrolla un control de posicionamiento automático del complejo de helióstatos de una plataforma solar en función de los parámetros de posición del Sol y la ubicación relativa de cada helióstato respecto al receptor central, en cualquier instante diurno de cualquier día del año y en cualquier situación geográfica en el mundo. Estos movimientos son



controlados por el programa desarrollado en función de la posición del Sol a lo largo de su trayectoria diaria aparente, determinada y transmitida por el Rastreador del Sol (Figura 1.13) o calculada por el Módulo de Cálculo de Posición del Sol (MCPS). La Figura 1.14 muestra el sistema de control (Tapia, 2008).



Figura 1.13 Rastreador del Sol (Tapia, 2008).



Figura 1.14 Sistema de control (Tapia, 2008).

Todas las investigaciones pasadas mantienen un factor característico que es el conocer la posición del Sol, ya sea calculándola o midiéndola en base a fotosensores; también suelen calcular la posición de los movimientos del helióstato en base a matrices de rotación, sin embargo, en esta investigación la posición de los movimientos del helióstato estarán basadas en matrices de trasformación homogénea desde el punto de vista de la robótica, viendo al helióstato como un manipulador que necesita posicionarse y orientarse en base a la posición del Sol calculada y la posición fija del concentrador parabólico.



1.2. Justificación

Justificación social y energética

La utilización de combustibles fósiles, la deforestación, la quema de biomasa y la ganadería son actividades humanas que liberan Gases de Efecto Invernadero (GEI), que absorbe y refleja gran parte de la radiación infrarroja que emite el Sol a la superficie del globo terráqueo, sin embargo, aquella radiación del Sol que atraviesa la capa de GEI incide sobre la Tierra, siendo reemitida en el espectro infrarrojo, pero la capa de GEI no permite que salga al exterior elevando la temperatura de la Tierra. Existe una gran cantidad de estudios sobre el calentamiento global y se estima que la temperatura aumentará entre 1.4 y 5.8 °C durante los siguientes 100 años (Fernández, y otros, 2009).

Los GEI, como el CO₂, han contribuido alrededor de dos terceras partes en el crecimiento del efecto invernadero producido por el hombre en los últimos 100 años. Sin embargo, actualmente el CO₂ contribuye al 50% de las emisiones anuales de GEI (Fernández, y otros, 2009).

En 1990, se produjeron alrededor de 6 y 8 billones de toneladas de CO_2 , las fuentes principales fueron la quema de combustibles fósiles, fabricación de cemento y deforestación. Se estima que aproximadamente se emiten 5.6 billones de toneladas de CO_2 al año por la utilización de petróleo, gas natural y carbono; y solamente los países industrializados contribuyen con el 80% de la producción total de CO_2 . Sin embargo, los países en vías de desarrollo tienen un incremento mayor de producción de CO_2 que los países industrializados, por lo que se estima que más del 50% de la producción de este gas será producido por éstos después del 2020 (Fernández, y otros, 2009).

Existen diversas aplicaciones en las que se puede utilizar la energía calorífica del Sol, como lo es en el cocimiento de ladrillos, secado de semillas y frutas, ejemplos limitados a climas calurosos y humedades relativamente bajas (40-60%) con vientos fuertes (Gómez, 2009). En México la producción de ladrillos en hornos, se lleva a cabo de forma tecnificada y de forma artesanal; del total de hornos (reportadas como unidades de proceso), el 70% son tradicionales (12,264/16,953) y representan entre 30 al 50% de la producción total (Cárdenas, 2012).

Los hornos tradicionales (cámara construida con tabiques cocidos) pueden producir entre 9000 a 13000 tabiques funcionando una vez al mes. Como fuente de calor, utilizan la quema de combustibles fósiles como aceite quemado, desechos domésticos o industriales, basura, llantas, diésel y combustóleo; produciendo una gran cantidad de GEI que contribuyen al calentamiento global. Los hornos trabajan durante 12 horas requiriendo aproximadamente 0.8 m³ de aceite quemado para hornear 10000 tabiques, como lo muestra la Figura 1.15 (Villeda Muñoz, 2010).





Figura 1.15 Horno tradicional (Villeda Muñoz, 2010).

Sin embargo, mediante el uso de energías alternativas, como es el caso de la utilización de radiación solar como fuente de energía calorífica, es posible remplazar el uso de la quema de combustibles fósiles como fuente térmica implementando un sistema con la capacidad de concentrar la energía solar.

El sistema de concentración de energía debe tener capacidad de concentrar la luz del Sol en un punto a lo largo de todo el día, este punto debe mantenerse constante, por lo tanto, se seleccionó el sistema de helióstato con concentrador parabólico fuera de eje, donde el helióstato puede captar y reflejar la radiación solar de un área mayor en un área menor de un concentrador parabólico que mantendrá la concentración en una área determinado (posición concentrador parabólico); el Sol, al cambiar de posición a lo largo del día y cambiar su trayectoria a lo largo del año, obliga al helióstato a modificar su posición para mantener constante la mancha de concentración de la luz solar en el concentrador parabólico, por lo que es necesario que el helióstato cuente con un sistema automático de seguimiento solar para lograr una mayor eficiencia al realizar la concentración.

Justificación técnica

El trabajo que se propone es la automatización del helióstato construido en el CICATA-QRO que tiene de 2 movimientos primarios y 4 secundarios, un concentrador parabólico que es fijo y su relación con la posición del Sol.

Se requiere automatizarlo con actuadores que soporten las variaciones del clima, sensores de posición angular que retroalimenten la posición de los ejes de seguimiento, etapa de potencia y un controlador, todo en un sistema de automatización para controlar la posición del helióstato construido.

Además, se requiere resolver la relación que existe entre la posición del Sol, la posición del concentrador parabólico y la geometría y los movimientos mecánicos del helióstato involucrando leyes físicas, problema que se resuelve mediante el uso de algebra vectorial por la relación geométrica que se mantiene entre ellos.



1.3. Planteamiento del problema

Un helióstato tiene como objetivo reflejar la luz del Sol que incide en sus espejos hacia el concentrador parabólico. Esto quiere decir, aunque el Sol se mueve por todo el horizonte, que el helióstato debe siempre de reflejar la luz solar hacia el concentrador (una posición fija). Para lograr esto se requiere solucionar los problemas siguientes:

- a) Determinar la posición del Sol en un punto sobre la superficie de la Tierra con determinada latitud y longitud:
 - 1. Posición del Sol con respecto al centro de la Tierra

Para determinar el vector de posición del Sol *S* con respecto a un punto *Q* en la superficie de la Tierra, se ha establecido un sistema de coordenadas esféricas, donde el Origen *C* es el Centro de la Tierra (Figura 1.16). El vector de posición del Sol se define con dos ángulos de posición, ángulo de elevación δ y ángulo de rotación en términos horarios ω referenciado a un meridiano *M*. La posición del punto Q es determinada con el ángulo de elevación ϕ , donde el ángulo horario ω es 0 (Chen, y otros, 2001).



Figura 1.16 Sistema de coordenadas a Centro de la Tierra, basada en (Chen, y otros, 2001).

2. Trasladar la posición del Sol hacia un punto sobre la superficie de la Tierra

Para describir la posición del Sol con respecto al helióstato (observador) se puede establecer un sistema de coordenadas esféricas con respecto a la orientación geográfica del mismo, determinando de esta manera dos ángulos, ángulo de elevación a_s y ángulo de rotación Y_s y una magnitud p del vector (Figura 1.17) (Wei, y otros, 2011).





Figura 1.17 Sistema de coordenadas esféricas, basada en Wei, 2011.

 b) Seguimiento de la posición del helióstato según una posición dada del Sol y la posición del concentrador parabólico

En base a la Ley de reflexión de Snell, se establecen dos vectores, el primer vector de incidencia de la luz sobre el helióstato SO, y el segundo vector de reflexión del helióstato al concentrador OT. Sin embargo, el vector OT se mantiene constante y el vector SO cambia a lo largo del día. Así mismo, existe un tercer vector auxiliar normal al plano formado por el espejo central del helióstato ON que a su vez, es una bisectriz de los vectores SO y OT, como lo muestra la Figura 1.18 (Chen, y otros, 2001).



Figura 1.18 Vectores de incidencia y reflexión de la luz (Chen, y otros, 2001).



A lo largo del día la posición del Sol cambia con respecto a la posición del plano formado por el espejo central del helióstato, por lo tanto, la posición de éste debe ser ajustada utilizando su eje de elevación FF' y su eje de rotación TT' para mantener direccionada la luz del Sol al concentrador (Figura 1.19).



Figura 1.19 a) Cambio de posición de espejo central con respecto a la posición del Sol b) Eje de rotación y eje de elevación (Chen, y otros, 2001).

c) Mantener la reflexión del Sol sobre el concentrador parabólico

Se requiere diseñar el sistema automatizado que posicione al helióstato según la posición del Sol, manteniendo la reflexión de la luz solar sobre el concentrador parabólico.

1.4. Objetivos

Objetivo general

• Diseño e implementación del sistema automatizado de posición para un helióstato de reflexión.

Objetivos específicos

- Obtención de ángulos de posición del Sol.
- Obtención de ecuaciones de los movimientos de seguimiento del helióstato (f₁ y f₂)
- Diseño eléctrico-mecánico de actuadores para movimientos primarios y secundarios del helióstato.
- Instalación e instrumentación de los actuadores para los movimientos de seguimiento.
- Implementación de algoritmo de control.



1.5. Metodología

- 1. Definición del problema:
 - Propuesta de automatización del helióstato
- 2. Diseño a bloques de la propuesta de automatización
 - Selección de actuadores:
 - 6 actuadores
 - 2 Movimiento primario
 - 4 Movimiento secundario
 - Instrumentación de actuadores
 - Fuentes
 - Sensores
 - Etapa de potencia
 - Montaje y ensamblaje de actuadores
 - Diseño de control de posición de los actuadores
 - Algoritmo de identificación de vector de posición del Sol a partir de una fecha y un lugar: 2 ángulos relativos de la posición del Sol
 - Algoritmo para determinar la posición de los movimientos del helióstato para reflejar la luz del Sol al concentrador: entrega 6 posiciones angulares
 - Posicionar los movimientos de seguimiento del helióstato con los ángulos obtenidos
 - Ciclo continuo de posición de los actuadores



La Figura 1.20 muestra el procedimiento de la Metodología del desarrollo de la tesis.



Figura 1.20 Metodología del desarrollo de tesis.



Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Conceptos básicos

Calendario solar

El calendario solar es un anuario que publica efemérides astronómicas como eclipses solares y lunares, parámetros geométricos y físicos de planetas y sus satélites, así como el crepúsculo, salida y puesta del Sol con respecto a la Tierra en hora local en base a la latitud (distancia angular desde la línea ecuatorial); para calcular los acontecimientos en los instantes que ocurren se toma como base el meridiano que pasa por el Golfo de México (90° al oeste del meridiano de Greenwich) (UNAM, 2012).

Constante solar

La constante solar es la radiación solar que incide en el límite exterior de la atmósfera. Tiene un valor aproximado de 1400 W/m² (Castillo, y otros, 2001).

La radiación solar que incide en la corteza terrestre, puede clasificarse como difusa y directa. La radiación difusa es producida por la reflexión de la luz con la superficie terrestre y la atmósfera, la dispersión de la luz por moléculas de aire y partículas de polvo. La radiación directa es aquella que incide directamente con la superficie de la Tierra sin sufrir ningún desvío por el estado del tiempo. Sin embargo, se considera radiación total a la suma de la radiación difusa y la radiación directa (Meinel, 1982).

La Figura 2.1 muestra la distribución espectral de la luz del Sol en la atmósfera y sobre el nivel del mar para una atmósfera con 20 mm de vapor de agua precipitada (Meinel, 1982).



Figura 2.1 Distribución espectral de la luz del Sol (Meinel, 1982).



La constante solar está definida como la radiación recibida del Sol en 1m² perpendicular a los rayos solares en el límite exterior de la atmósfera terrestre, por lo tanto no es afectada por las condiciones meteorológicas, pero varía con respecto a la distancia existente entre el Sol y la Tierra (Figura 2.2), sin embargo, el flujo solar dentro de la Tierra se verá afectado por la latitud del lugar, la época, hora y la inclinación del plano receptor (Garcia-Badell, 1983).



Figura 2.2 Representación de constante solar (Garcia-Badell, 1983).

Ley de Reflexión de Snell

Cuando un haz de luz incide en un medio, una porción es absorbida, otra es trasmitida y otra es reflejada. El vector incidente, el transmitido y el reflejado tienen diferentes magnitudes y direcciones pero son coplanarios entre sí (se encuentran en el mismo plano). El haz de luz transmitido cambia de dirección debido a que el índice de refracción es diferente en el nuevo medio que el anterior, por otro lado, la porción reflejada cambia su dirección pero mantiene una relación con el ángulo de incidencia del haz de luz, por lo que la ley de Snell nos dice que el ángulo de incidencia de la luz (θ_i) es igual al ángulo de reflexión (θ_r) como lo muestra la Figura 2.3 (Hecht, 2002).



Figura 2.3 Reflexión de la luz (Hecht, 2002).



Geometría Sol-Tierra

La órbita que la Tierra describe alrededor del Sol es conocida como eclíptica (Figura 2.4) y se realiza en 365.256 días, y la Tierra gira alrededor de su eje polar (con inclinación de 23,45° a la normal del plano de la eclíptica) en 23 h 56 m 4s (Eicker, 2011).



Figura 2.4 Plano de la eclíptica y la posición de la Tierra en los solsticios de invierno y verano, y equinoccios de primavera y otoño. (Eicker, 2011).

Ángulos solares

Para definir la trayectoria aparente del Sol con respecto a la Tierra se ha utilizado el concepto de esfera celeste (esfera imaginaria con radio no definido y concéntrico al astro en cuestión) y las coordenadas ecuatoriales (Declinación solar δ y Ángulo horario ω) (Garcia-Badell, 1983).

El **ángulo de declinación solar** δ (Figura 2.5) está definido como el ángulo de inclinación entre el eje de rotación de la Tierra y plano ecuatorial, este ángulo cambia con respecto a la época del año y el hemisferio de localización del observador, por ejemplo, en el Solsticio de Verano equivale 23° 26' 54" en el Hemisferio Norte, mientras que en Invierno equivale -23° 26' 54" y en los equinoccios tiene un valor igual a 0° (Eicker, 2011).



Figura 2.5 Ángulo de declinación solar (Eicker, 2011).



El **ángulo horario** $\boldsymbol{\omega}$ (Figura 2.6) influye en las fluctuaciones de irradiación diarias debido a la rotación de la Tierra, por lo que se define como el ángulo entre la longitud local y la longitud cuando el Sol se encuentra en el Cenit (Eicker, 2011).



Figura 2.6 Ángulo horario (Eicker, 2011).

Coordenadas horizontales

En base a la declinación, al ángulo horario ω y a la latitud ϕ se puede obtener el ángulo de elevación α_s (ángulo que se forma por los rayos solares con el plano tangente a la Tierra en el punto de observación) y el ángulo azimut Y_s (ángulo que forma la proyección de la radiación solar sobre el plano tangente a la tierra en el punto de observación y el eje sur de dicho plano); el ángulo de elevación es determinado desde el plano horizontal y el azimut está definido como 0° al Norte, 90° al Este, 180° al Sur y 270° al Oeste como lo muestra la Figura 2.7 (Eicker, 2011).



Figura 2.7 Coordenadas horizontales (Eicker, 2011).


2.2. Centrales termosolares

Las centrales termosolares consisten en un complejo de helióstatos que reflejan la luz a una torre central, donde se ubica un contenedor con un fluido, el cual es calentado hasta lograr el cambio de fase, el vapor generado es usado para mover las aspas de un generador eléctrico. La Figura 2.8 muestra un complejo de helióstatos con una torre central con una capacidad de producción de 7 MW; cada helióstato precisa una posición diferente con respecto a la torre central, por lo tanto cada uno tiene un sistema de control diferente y de potencia, además de ello, existe un sistema de control encargado de controlar la presión y la temperatura que se genera en la torre central indicándole a sus esclavos (controladores de los helióstatos) que actividad deben hacer (González, y otros, 2004).



Figura 2.8 Torre central CESA-I (González, y otros, 2004).

2.3. Disco parabólico

Los discos parabólicos concentran los rayos solares que inciden en el eje óptico en un solo punto (foco o zona de concentración). La Figura 2.9 muestra un disco parabólico que alcanzo una temperatura de 233°C en la zona de concentración con una temperatura del 36°C en la zona de captación. Se considera una tecnología de baja potencia debido a que la zona de reflexión es pequeña (García, y otros, 2011).



Figura 2.9 Disco parabólico (García, y otros, 2011).



2.4. Helióstato

Un helióstato es un dispositivo con la capacidad de reflejar y concentrar la luz solar para fines de procesos térmicos mediante el uso de espejos con la finalidad de calentar un material, por ejemplo, agua en una torre central. Existen diversos arreglos de granjas de helióstatos, sin embargo, se pueden utilizar de manera individual o en grupo según la aplicación y la cantidad de energía calorífica que se desea transmitir.



Figura 2.10 Helióstato (González, y otros, 2004).

Tipo de movimientos

• Azimutal-Elevación.

Es el helióstato más utilizado en colectores solares. El eje azimutal es el eje principal y se fija al plano de Tierra, apuntando hacia el cenit. El eje de altura es el eje secundario y está girando de manera ortogonal al eje azimutal (Guo, y otros, 2012).

La Figura 2.11 muestra el helióstato Azimutal-Elevación.







• Elevación-Rotación.

El eje de elevación se direcciona horizontalmente hacia el Este geográfico, siendo el eje principal. El eje secundario, eje de rotación, se direcciona de manera perpendicular al eje de elevación (Figura 2.12).



Figura 2.12 Helióstato Elevación-Rotación (Chong, y otros, 2011).

• Rotación-Rotación

El eje de rotación (principal) es paralelo a la dirección Este-Oeste, el eje secundario (rotación) es perpendicular al primer eje (Figura 2.13) (Wei, y otros, 2011).



Figura 2.13 Helióstato Rotación-Rotación (Wei, y otros, 2011).



2.5. Aberración de reflexión en helióstatos

La aberración de reflexión ocurre cuando el Sol cambia su posición y el helióstato refleja una imagen distinta en el concentrador.

La Figura 2.14 muestra cómo se modifica la mancha de reflexión, cambia con respecto al ángulo del helióstato: A) error angular, B) desplazamiento paralelo de la trayectoria del haz y C) la expansión de la radiación sobre el objetivo (Aiuchi, y otros, 2006).



Figura 2.14: Error de reflexión (Aiuchi, y otros, 2006).

2.6. Representación de la orientación

Para definir un punto en el espacio es suficiente con los datos de su posición, sin embargo, para definir un sólido, es necesario definir su orientación como su posición con respecto a un sistema de referencia. La orientación en un espacio tridimensional viene definido por 3 grados de libertad o tres componentes linealmente independientes, por lo que para asignar la posición y orientación de un objeto en el espacio suele utilizarse un sistema coordenado relacionado con el objeto y referenciado al sistema coordenado origen.

Matrices de rotación

Las matrices de rotación son herramientas utilizadas en robótica, análisis de imágenes, mecánica y mecatrónica para la descripción de la orientación de un objeto debido a la facilidad de uso de algebra matricial.

Supóngase que se tienen en el plano dos sistemas de referencia OXY y OUV con un mismo origen O, siendo el sistema OXY el de referencia fijo y el sistema OUV el móvil relacionado al objeto (Figura 2.15). Los vectores unitarios de los ejes coordenados del sistema OXY son i_x , j_y , mientras que los del sistema OUV son i_u , j_v , por lo que un vector P se puede representar en ambos sistemas como:

$$P_{(x,y)} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} = P_x \cdot i_x + P_y \cdot j_y$$

$$P_{(u,v)} = \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \end{bmatrix} = P_u \cdot i_u + P_v \cdot j_v$$



Figura 2.15. a) Orientación de un sistema OUV respecto a otro OXY en un plano b) rotación de un sistema OUV respecto a otro OXY en un plano (Barrientos, y otros, 1997).

Por lo que se puede proponer una matriz de rotación R donde se representen cada una de las componentes unitarias de cada uno de los ejes, definiendo la orientación de un sistema OUV con respecto al sistema OXY.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} = R * \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \end{bmatrix}$$

Dónde:

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v \\ j_y i_u & j_y j_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

En un espacio tridimensional el análisis es similar, donde un sistema OUVW coincide en el origen con un sistema OXYZ, siendo OXYZ el sistema de referencia fijo y OUVW el sistema relacionado al objeto, por lo tanto, los vectores unitarios del sistema OXYZ son i_x, j_y, k_z, mientras que los del sistema OUVW son i_u, j_v, k_w, por lo que un vector P puede ser representado como en ambos sistemas como:



$$P_{(x,y,z)} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = P_x \cdot i_x + P_y \cdot j_y + P_z \cdot k_z$$
$$P_{(u,v,w)} = \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} = P_u \cdot i_u + P_v \cdot j_v + P_w \cdot k_w$$

Al igual que en dos dimensiones, se puede obtener la siguiente igualdad:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = R * \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix}$$

Donde

$$R = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, la matriz de rotación en el eje OX se representa como:

$$R_{(x,\alpha)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0\\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$



Figura 2.16 Rotación del sistema OUVW con respecto al eje OX (Barrientos, y otros, 1997).



La matriz de rotación en el eje OY se puede representar como:



Figura 2.17 Rotación del sistema OUVW con respecto al eje OY (Barrientos, y otros, 1997).

La matriz de rotación en el eje Oz se representa como:



Figura 2.18 Rotación del sistema OUVW con respecto al eje OZ (Barrientos, y otros, 1997).



Matrices de transformación homogénea

Sin embargo, las matrices de rotación no son suficientes para describir la posición y la orientación de un objeto en el espacio, por lo que se hace uso de las denominadas coordenadas homogéneas.

Las representaciones mediante coordenadas homogéneas de un objeto en el espacio n-dimensional se realiza mediante coordenadas de un espacio (n+1)-dimensional, por lo que un vector P(x,y,z) estará representado por P(wx,wy,wz,w), donde *w* es un valor escalar, por lo que el vector $P=a_i+b_j+c_k$ estará representado en coordenadas homogéneas mediante un vector columna:

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix} = w \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix}$$

Por lo que se puede considerar que una **matriz de transformación homogénea T** está compuesta por cuatro submatrices: una submatriz de rotación, una submatriz del vector de traslación, una submatriz de transformación de prospectiva y una submatriz de escalado global. Sin embargo, se puede considerar la transformación de prospectiva nula y el escalado global unitario (Barrientos, y otros, 1997).

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rotación & Traslación \\ Perspectiva & Escalado \end{bmatrix}$$

Matriz homogénea de translación

Suponiendo que el sistema O'UVW se encuentra trasladado al punto $P=P_xi+P_yj+P_zk$ con respecto al sistema OXYZ, la matriz T estará representada por la matriz básica de translación.

$$T_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por lo que un vector cualquiera r, representado en el sistema O'UVW por r_{uvw} tendrá como componentes del vector con respecto al sistema OXYZ:



$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x + r_u \\ r_y + r_v \\ r_z + r_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

Matriz homogénea de rotación

Suponiendo que el sistema O'UVW se encuentra rotado con respecto al sistema OXYZ, la submatriz de rotación estará definida como una matriz de rotación, sin embargo, se pueden definir tres matrices homogéneas básicas de rotación debido al eje de coordenadas en el que se desea realizar la rotación.

$$T_{(x,\alpha)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{(y\phi)} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{(z,\theta)} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Coordenadas esféricas y cilíndricas

Existes distintos sistemas coordenados para representar la posición de un punto en el espacio, sin embargo, la manera usual de representarlo es mediante coordenadas cartesianas rectangulares (x, y, z) (Marsden, y otros, 1991).

Existen sistemas coordenados alternativos adecuados para ciertos tipos de problemas, por ejemplo, se utilizan los sistemas de coordenadas cilíndricas (r, θ , z) o de coordenadas esféricas (ρ , θ , ϕ) donde existe una simetría cilíndrica o esférica, respectivamente, alrededor de una recta (Marsden, y otros, 1991).

Para transformar un sistema de coordenadas rectangulares en un sistema de coordenadas cilíndricas se utilizan las siguientes formulas (Marsden, y otros, 1991):

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$x = r\cos\theta$$



 $y = r \operatorname{sen} \theta$ z = z

Para transformar un sistema de coordenadas rectangulares en un sistema de coordenadas esféricas se utilizan las siguientes formulas (Marsden, y otros, 1991):

 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ $x = \rho \, sen \phi \, \cos \theta$ $y = \rho \, sen \phi \, sen \theta$ $z = \rho \, cos \phi$

La Figura 2.19 muestra la representación de un punto (x, y, z) en términos de coordenadas cilíndricas y esféricas respectivamente.



Figura 2.19 a) Sistema de coordenadas cilíndricas b) Sistema de coordenadas esféricas (Marsden, y otros, 1991).

Motores de corriente directa

Los motores eléctricos son dispositivos capaces de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para realizar un trabajo mecánico.

Los motores de corriente continua constan de un estator y un rotor, pueden ser conectados en serie, paralelo o de forma separada. El devanado del estator (baja potencia) se utiliza para generar un



campo magnético constante, que desarrolla una corriente inicial de fuerza electromotriz grande, que ocasiona un par de torsión, acelerando la armadura. Sin embargo, la corriente inicial generalmente es muy grande y se debe limitar la corriente desde la unidad de potencia (Firoozian, 2009).

La velocidad de los motores de CD puede ser controlada mediante una señal PWM (Modulación por Ancho de Pulso, por sus siglas en inglés). La Figura 2.20 muestra como la señal PWM varía el tiempo en alto del pulso con una frecuencia determinada. Sin embargo, el motor interpretará la salida de la señal PWM como el promedio de la misma (Toncich, 1994).

PWM Output Voltage Average for 0% Duty Cycle Time
PWM Output Voltage Average for 20% Duty Cycle Time
PWM Output Voltage Average for 50% Duty Cycle
PWM Output Voltage Average for 100% Duty Cycle Time

Figura 2.20 Señal PWM (Toncich, 1994).

Control

Los actuadores deben ser controlados para poder realizar su tarea correctamente. Existen distintos métodos de control, en este trabajo se implementará un sistema de control por lazo cerrado, ya que es necesario conocer la posición del controlador para definir el error con respecto a la salida y realizar las acciones necesarias para que el sistema se sitúe en la posición correcta de manera eficiente.

Control por lazo cerrado y lazo abierto

Cuando el control de un sistema no depende de la variable de salida, puede realizarse como un control de lazo abierto, es decir, no existe retroalimentación del estado del actuador hacia el controlador. En el control por lazo cerrado (Figura 2.21), a diferencia del control por lazo abierto, es necesaria la retroalimentación de la salida hacia el controlador (Visioli, 2006).



Figura 2.21 Componentes básicos del control por lazo cerrado (Visioli, 2006).



La Figura 2.22 muestra el procedimiento del sistema de control por lazo cerrado, donde la señal de referencia *r*, es procesada por el filtro *F* para ser restada por el estado de la variable de salida *y*, produciendo el error e (e = r-y). El controlador C, procesa el error y manipula la variable u, siendo la variable de entrada del proceso *P*. La variable *d* es la perturbación de carga y *n* es el ruido de la señal de retroalimentación (Visioli, 2006).



Figura 2.22 Diagrama de bloque del control por lazo cerrado (Visioli, 2006).

•Control PID

El control PID combina la acción del control proporcional, el control integral y el control derivativo (Visioli, 2006).

• Componente proporcional

La acción de la componente proporcional pretende disminuir el tiempo de restablecimiento, multiplicando el error por la constante proporcional. Sin embargo, genera un sobre impulso al disminuir rápidamente el error (Visioli, 2006).

La componente proporcional responde a la siguiente ecuación, donde la señal de control u(t) es el producto de la constante proporcional K_p y e(t) el error. El error e(t) se obtiene por la diferencia de la señal de referencia r(t) menos la señal de salida y(t).

$$u(t) = K_p e(t) = K_p(r(t) - y(t))$$

La función de transferencia de la componente proporcional se representa como:

$$C(s) = K_p$$

• Componente integral

Corrige el error de la salida en estado estacionario provocado por la componente proporcional. Se integra el error $e(\tau)$, promediándolo por un periodo determinado, posteriormente es multiplicado por la ganancia integral K_i (Visioli, 2006).



$$u(t) = K_i \int_o^t e(\tau) d\tau$$

La función de transferencia de la componente integral:

$$C(s) = \frac{\kappa_i}{s}$$

Componente derivativa

Corrige la salida con la derivada del error. Mantiene el error corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad con la que se produce, evitando que el error incremente y tenga un sobre impulso. Tiene un retraso de acción, porque se basa en valores anteriores. La señal de control u(t) es el producto de la constante derivativa K_d y el error e(t) (Visioli, 2006).

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

La función de transferencia de la componente derivativa.

$$C(s) = K_d S$$

Por lo tanto, la estructura del control PID está dada por la siguiente ecuación.

$$u(t) = K_p\left(e(t) + K_i \int_o^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}\right)$$

• On-Off

El control On-Off es considerado el control más básico, debido a que su salida sólo tiene 2 estados posibles, completamente apagado (0) y completamente encendido (1). Debe existir una variable de control para poder cambiar de un estado a otro, es decir, para acceder a un estado, la variable de control deberá superar un valor deseado y, para acceder al otro estado, la variable de control deberá ser inferior a otro valor deseado. La variable de control puede ser temperatura, voltaje, nivel de fluido, velocidad, tiempo, entre otros (Bartelt, 2011).

Se puede combinar un sistema de On-Off con histéresis (proceso cíclico donde es diferente el camino de ascenso y descenso) para que el sistema maneje un tiempo muerto y pueda aumentar la vida de los actuadores. La Figura 2.23 muestra el diagrama a bloques donde se emplea la histéresis, donde *h* es la banda muerta y el sistema no realiza ningún movimiento de la planta, *k* es la ganancia estática del sistema, E(t) es el punto de suma y S(t) es la salida (Balcells, y otros, 1997).





Figura 2.23 Diagrama de control on-off con lazo de control (Balcells, y otros, 1997).

2.7. Momento de inercia de una superficie

El momento de inercia de una superficie se puede definir como una medida de la distribución de una superficie en torno a un eje, por lo tanto, deberá ser una propiedad constante de la superficie. "*Los momentos de inercia de una superficie plana A respecto a los ejes x e y de su plano y respecto al eje z normal a su plano están definido como*" (Meriam, y otros, 2002) (Hibbeler, 2004):

$$I_x = \int y^2 * dA$$
$$I_y = \int x^2 * dA$$
$$I_z = \int r^2 * dA = I_x + I_y$$

Donde dA es un elemento infinitesimal del área como lo muestra la Figura 2.24.



Figura 2.24 Definición de momento de inercia de área sobre un plano (Hibbeler, 2004).



2.8. Momento de inercia de masas

"Consideramos un cuerpo de masa m en rotación alrededor de un eje O-O con aceleración angular α , los puntos del cuerpo se mueven todos en planos paralelos normales al eje de rotación O-O" (Figura 2.25). Si un elemento de masa dm tiene una aceleración tangencial a su trayectoria circular igual a r α , la fuerza tangencial que se ejerce sobre el elemento está dado por: (Meriam, y otros, 2002) (Hibbeler, 2004)



Figura 2.25 Definición de momento de inercia de masa (Meriam, y otros, 2002).

Y el momento de esas fuerzas respecto un eje es $r^2 \alpha \, dm$, si en la suma de los momentos de esas fuerzas en todos los elementos la aceleración α es constante el momento de inercia de masa estaría dada por (Meriam, y otros, 2002):

$$I = \int r^2 * dm$$

El momento de inercia de masa se puede definir como una medida de la distribución de la masa en torno a un eje y como una medida de la resistencia de un cuerpo a ser acelerado en un eje de rotación. (Meriam, y otros, 2002) (Hibbeler, 2004)

• Cambio de ejes

Al conocer el momento de inercia de un cuerpo respecto a un eje, se puede determinar el momento de inercia relativo a un eje paralelo. La figura muestra 2 ejes paralelos, uno de ellos pasa por el centro de masa G y la distancia radial de un elemento de masa *dm* para ambos ejes está definida como r_0 y r_1 y la distancia entre ejes es *d* (Figura 2.26). Mediante la ley de cosenos se obtiene: (Meriam, y otros, 2002)

$$I = \int r^2 * dm = \int (r_0^2 + d^2 + 2dr_0 \cos \theta) * dm$$



$$= \int r_0^2 * dm + d^2 \int dm + 2d \int u * dm$$



Figura 2.26 Momento de inercia másico respecto a un eje (Meriam, y otros, 2002).

Según el teorema de los ejes paralelos (Steiner), en la ecuación anterior la primera integral es el momento de inercia \overline{I} respecto al eje que pasa por el centro de masa, la segunda integral es el termino md^2 y la tercera integral es igual a 0 obteniendo: (Meriam, y otros, 2002) (Hibbeler, 2004)

$$I = \overline{I} + md^2$$

Los momentos de inercia respecto a un eje normal a un plano de movimiento son nombrados con un subíndice sencillo. Sin embargo, en un sistema tridimensional existen componentes de rotación en más de un eje, se utilizan subíndices dobles, por lo tanto los momentos de inercia respecto a los ejes x, y y z se representan como: (Meriam, y otros, 2002) (Hibbeler, 2004)

$$I_{xx} = \int r_x^2 * dm = \int (y^2 + z^2) * dm$$
$$I_{yy} = \int r_y^2 * dm = \int (x^2 + z^2) * dm$$
$$I_{zz} = \int r_z^2 * dm = \int (x^2 + y^2) * dm$$

2.9. Presión dinámica

La presión dinámica se produce cuando un fluido en un sistema abierto o cerrado adquiere velocidad produciendo un incremento a la presión en el área de contacto; depende directamente de la velocidad y de la densidad del fluido, sin embargo, no depende de la gravedad porque está afecta a la densidad del fluido en base a la altura del mismo (Daily, y otros, 1975).



Capítulo 3. Materiales y Métodos

El presente capítulo se encuentra dividido en Materiales y Métodos, debido a que en la sección de materiales se explica las características técnicas de los actuadores y dispositivos electrónicos utilizados para realizar el control de posición del helióstato, mientras que en la sección métodos se explica cómo éstos fueron utilizados.

3.1. Materiales

• Actuador lineal

Un actuador lineal (Figura 3.1) tiene la capacidad de crear movimiento en línea recta, su mecanismo está basado en un motor eléctrico, un arreglo de engranes y un tornillo sin fin. Se seleccionarán dos actuadores lineales con distinta longitud de vástago para cada movimiento primario, así mismo, ambos actuadores lineales tendrán la capacidad de carga necesaria para actuar los mecanismos correspondientes. El valor de la longitud del vástago y de la capacidad de carga se calculan en función de los mecanismos del helióstato y el procedimiento para el cálculo se muestra en el subcapítulo Métodos y a lo largo del Capítulo 4



Figura 3.1 Actuadores lineales (Cortesía de Warner).



Gatos eléctricos

Se implementan gatos de tijera eléctricos para controlar la posición de los movimientos secundarios de seguimiento del helióstato, para esto, se hace uso de una barra de 2.5 m que trasmite su movimiento a toda una fila o columna de espejos del helióstato. Los gatos de tijera eléctricos (Figura 3.2) trabajan con voltaje nominal de 12 VDC y una corriente máxima de 6 A, tienen la capacidad de carga de 1 Ton.



Figura 3.2 Gato de tijera eléctrico (cortesía Mikels).

Controlador Arduino Mega 2560

Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmeg1280 (Figura 3.3), cuenta con 16 entradas analógicas (10 bits) y 54 entradas/salidas digitales, de las cuales 14 salidas proporcionan señales PWM, 16 entradas digitales, maneja hasta 4 puertos UARTS (comunicación serial); cuenta con un cristal oscilador de 16 MHz y conexión USB. Maneja hasta 256 KB de memoria flash para almacenamiento de código, distribuyéndolos para la memoria EEPROM, memoria SRAM y sistema de arranque. Su convertidor analógico – digital ADC tiene una resolución de 10 bits.



Figura 3.3. Placa de desarrollo Arduino Mega 2560.



• Sensores angulares

Se utilizan 6 potenciómetros 6187R5KL1.0 (Figura 3.4) como sensores angulares para medir la posición de los ejes del seguimiento del helióstato; tienen una resistencia de 5 k Ω , maneja una linealidad de ±0.5%, puede trabajar a intemperie, el rango de temperatura de operación es de -40°C a 125°C, y en cuanto a la resolución, se considera infinita, pero está limitada por la capacidad de conversión analógica-digital del controlador, el ADC del controlador trabaja a 10 bits, teniendo una resolución máxima de 0.35°.



Figura 3.4 Sensor angular (cortesía de TT electronics).

• DS1338 RTC (Reloj tiempo real)

Es un circuito integrado (Figura 3.5) dedicado a la medición del tiempo, cuenta con la capacidad de proporcionar la fecha (día, mes, año) y la hora (hora, minutos, segundos), cuenta con una batería para no perder la fecha si ocurre una desconexión o una pérdida de energía del controlador; se comunica al controlador mediante el protocolo I2C.



Figura 3.5 Placa RTC (Cortesía de 5hertz).



• Motodrivers Sabertooth 2x25

Es un controlador de motores de corriente directa, tiene la capacidad de controlar el sentido y velocidad de giro de 2 motores (1 motor por canal). Para controlar el sentido y la velocidad de giro del motor de los actuadores hace uso de un "puente H" y señales PWM; el puente H puede cambiar el sentido de giro del motor al invertir la dirección del flujo de corriente, mientras que la velocidad es controlada por la señal PWM. Maneja dos canales de potencia y cada canal puede disipar hasta 30 V y 25 A y soportar picos de corriente de hasta 50 A por varios segundos. Cuenta con un microcontrolador y un DIP switch (Figura 3.6) para seleccionar el modo de operación. Cuenta con el controlador mediante protocolo serial con paquetes de datos de 8 bits. Tiene la finalidad de ser utilizado como etapa de potencia para el control de 2 motores cada uno. .



Figura 3.6 Motodrivers Sabertooth 2x25.

La señal PWM de los Motodrivers Sabertooth 2x25 tiene una resolución porcentual de 1.587, que se refiere al mínimo cambio que el sistema puede realizar en la amplitud de los pulsos en alto o en bajo con una frecuencia de 31.37 kHz. En la Figura 3.7 y en la Figura 3.8 se muestran señales PWM con distintos anchos de pulso, en la primera se muestran señales con un voltaje medio positivo mientras que en la segunda un voltaje medio negativo; la velocidad de motor está relacionada con la magnitud del voltaje medio, mientras que el sentido de giro con el signo de mismo.





Figura 3.7 Señal PWM con sentido de giro de motor horario con ancho de pulso: a) 98.4% b) 74.6% c) 49.2% d) 23.8%.



Figura 3.8 Señal PWM con sentido de giro de motor antihorario con ancho de pulso: a) 23.8%b) 49.2% c) 74.6% d) 98.4%.



• Fuente de voltaje.

Se utiliza una fuente de voltaje de 24 V a 25 A (600 W) (Figura 3.9) con la finalidad de alimentar los actuadores lineales y los gatos eléctricos. Se ha decidido mover sólo un actuador a la vez para evitar una sobrecarga de corriente a la fuente de voltaje.



Figura 3.9 Fuente de voltaje.

3.2. Métodos

Movimientos de elevación

Para realizar el movimiento de elevación se utiliza un actuador lineal de 24 plgs de largo, en la Figura 3.10 se observa al actuador lineal contraído 23 plgs, permitiendo un ángulo mínimo de posición de 28.47°, se ha dejado 1 plg de tolerancia para el fin de carrera con la finalidad de evitar contraer todo el actuador y dañarlo por una colisión mecánica.



Figura 3.10 a) Alcance del movimiento de elevación con el actuador lineal contraído b) CAD.



Cuando el actuador lineal se encuentra extendido (23 plg) permite un ángulo máximo de 72.43° para este movimiento como lo muestra la Figura 3.11.



Figura 3.11 a) Alcance del movimiento de elevación con el actuador lineal extendido b) CAD.

• Modelo Cinemático del movimiento de elevación

En base a la Figura 3.12 se obtiene el modelo cinemático del movimiento de elevación, el ángulo de elevación cambia su amplitud en base a la extensión del vástago del motor lineal:



Figura 3.12 Esquema de movimiento de elevación.

Obteniendo el valor de los ángulos $\alpha_{1 y} \alpha_{3}$:

$$\alpha_1 = \tan(\frac{L_2}{L_3})$$



$$\alpha_3 = \tan(\frac{L_5}{L_4})$$

Mediante la ley de cosenos se obtiene α_2 :

$$(L_1 + l)^2 = H_1^2 + H_2^2 - 2 * H_1 * H_2 * \cos(\alpha_2)$$

Dónde:

$$H_1^2 = L_2^2 + L_3^2$$

 $H_2^2 = L_4^2 + L_5^2$

Despejando α_2 y sustituyendo H_1 y H_2 se obtiene:

$$\alpha_{2} = \cos^{-1}\left(\frac{H_{1}^{2} + H_{2}^{2} - (L_{1} + l)^{2}}{2 * H_{1} * H_{2}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{L_{2}^{2} + L_{3}^{2} + L_{4}^{2} + L_{5}^{2} - (L_{1} + l)^{2}}{2 * \sqrt{L_{2}^{2} + L_{3}^{2}} * \sqrt{L_{4}^{2} + L_{5}^{2}}}\right)$$

Como el ángulo de elevación es igual a la suma de α_1, α_2 y α_3 se obtiene que:

$$\varepsilon = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$$
$$\varepsilon = \tan(\frac{L_2}{L_3}) + \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 + L_4^2 + L_5^2 - (L_1 + l)^2}{2 * \sqrt{L_2^2 + L_3^2} * \sqrt{L_4^2 + L_5^2}}\right) + \tan(\frac{L_5}{L_4})$$

Movimiento de rotación

El movimiento de rotación se ha diseñado para alcanzar una libertad de movimiento de alrededor de 180° en base a un sistema cremallera-piñón, se utiliza un actuador lineal con una longitud de vástago de 20 plgs, de las cuales se utiliza 3 plgs para sujetar la cremallera al actuador lineal y se ha dejado 1 plg de seguridad en los finales de carrera, por lo que se tienen 16 plgs efectivas de movimiento.

El diámetro de paso del piñón se obtiene a partir del perímetro del círculo y la carrera del actuador lineal, sin embargo, sólo es necesaria la libertad de movimiento de 180°:

$$P_{180^{\circ}} = \pi * \frac{D}{2} = \pi * r$$



Sustituyendo la carrera del actuador lineal se obtiene:

$$r = \frac{P}{\pi} = \frac{16 \ plgs}{\pi} = 5.09 \ plgs$$

Redondeando el radio del piñón a 5 plgs, el diámetro de paso del piñón será 10 plgs, teniendo una disminución en la libertad de movimiento del 1.82 %, por lo que el ángulo total de movimiento es 176.71°.

La Figura 3.13 y la Figura 3.14 muestran el alcance del movimiento utilizando el sistema cremallerapiñón propuesto, donde *A* es el piñón, *B* el actuador lineal, *C* la cremallera, *D* la guía de la cremallera, *E* soportes auxiliares para el actuador lineal y *F* estructura de PTR.



Figura 3.13 a) Vista trasera del helióstato con actuador lineal contraído b) Acercamiento.



Figura 3.14 a) Vista trasera del helióstato con actuador lineal extendido b) Acercamiento.

• Modelo cinemático del movimiento de rotación

El modelo cinemático del movimiento de rotación (σ) se obtiene en base a la Figura 3.15 debido a que existe una relación entre el avance del vástago del actuador lineal, el perímetro y el diámetro de paso del piñón.





Figura 3.15 Esquema de movimiento de rotación.

 $\sigma = \frac{360^\circ * l}{2 * \pi * r}$



3.3. Instrumentación

La Figura 3.16 muestra los materiales seleccionados para realizar los movimientos de seguimiento del helióstato.



Figura 3.16 Esquema de materiales de control.

El Arduino Mega 2560 es utilizado como controlador de los movimientos de seguimiento primarios y secundarios del helióstato; en él se encuentra programado el algoritmo para obtener la posición de los movimiento de seguimiento, así como la metodología para alcanzar esa posición. Para obtener la posición del vector del Sol, el Arduino Mega 2560 solicita la fecha y hora al módulo RTC mediante el protocolo de comunicación SPI.

Los sensores se colocan en el eje de cada uno de los movimientos de seguimiento, son los encargados de retroalimentar la posición de éstos mediante un divisor de voltaje, por lo que se han habilitado 6 entradas analógicas del Arduino Mega 2560; el voltaje leído oscila entre 0 y 5 V, debido a la resolución del ADC, puede tomar valores entre 0 (0 V) y 1023 (5 V), el cual será transformado en una posición angular, donde 0 es 0° y 1023 es 359.65°.

Para la etapa de potencia, el Arduino Mega 2560 utiliza un solo puerto serial y tres salidas digitales para comunicarse con los tres Motodrivers Sabertooth 2x25 configurados en modo "Comunicación Serial con selección de esclavo" (Figura 3.17); las salidas digitales tienen la finalidad de seleccionar



qué Motodriver Sabertooth 2x25 deberá atender las órdenes del Arduino Mega 2560, mientras que por el puerto serial se selecciona el motor, la velocidad y el sentido de giro mediante un número definido desde 1 a 255 como lo muestra la Tabla 1.



Figura 3.17 Conexión de selección de esclavo (cortesía de DimensionEngineering).

Número	Efecto				
1 a 127	Motor izquierdo gira a la izquierda, donde 1 es la velocidad máxima y 63 es la velocidad mínima.				
64	Motor izquierdo se detiene.				
65 a 127	Motor izquierdo gira a la derecha, donde 127 es la velocidad máxima y 65 es la velocidad mínima.				
128 a 191	Motor derecho gira a la izquierda, donde 128 es la velocidad máxima y 191 e la velocidad mínima.				
192	Motor derecho se detiene.				
193 a 255	193 a 255Motor derecho gira a la derecha, donde 255 es la velocidad máxima y 193 la velocidad mínima.				

Tabla 1 Instrucciones de Motodrivers Sabertooth 2x25 en modo "Comunicación Serial con selección de esclavo"

La Figura 3.18 muestra el tablero de control diseñado para los movimientos de seguimiento del helióstato, donde 1) Arduino Mega 2560, 2) Entradas analógicas, 3) Reloj tiempo real, 4) Puerto serial y salidas digitales, 5) Motodrivers Sabertooth 2x25 y 6) Fuente de voltaje.





Figura 3.18 Tablero de control.

3.4. Instalación de actuadores

En la Figura 3.19 se muestra los actuadores lineales de los movimientos primarios instalados en el helióstato.



Figura 3.19 a) Actuador lineal instalado para el movimiento de elevación b) Sistema cremallera – piñón instalado sobre el movimiento de rotación.



En la Figura 3.20 se muestra el sistema cremallera – piñón instalado en el eje del movimiento de rotación del helióstato; el piñón tiene un diámetro de paso de 10" y esta dentado un poco más de 190° de su circunferencia debido a que el movimiento de rotación sólo necesita un alcance máximo de 180°.



Figura 3.20 Sistema cremallera – piñón del movimiento de rotación.

Se instala el sensor angular en el centro del eje del piñón y se fija a su vez en la estructura que soporta al sistema con la finalidad de tener una parte móvil y otra fija (Figura 3.21).



Figura 3.21 a) vista frontal del sensor angular del movimiento de rotación b) vista lateral del sensor angular del movimiento de rotación.



Se fabricaron dos piezas para la instalación del sensor para el movimiento de elevación, tienen la finalidad de soportar y unir el sensor al eje de movimiento de elevación y a una parte fija del helióstato (Figura 3.22).



Figura 3.22 a) vista frontal del sensor angular del movimiento de elevación b) vista lateral del sensor angular del movimiento de elevación.

En la Figura 3.23 se muestra un gato de tijera eléctrico instalado como actuador para un movimiento secundario del helióstato.



Figura 3.23 a) Vista lateral de actuador instalado de un movimiento secundario, b) Vista trasera de actuador instalado de un movimiento secundario



Capítulo 4. Deformación de actuadores lineales

4.1. Introducción

Existen en el mercado helióstatos que utilizan mecanismos de tornillo sin fin para realizar movimientos de rotación (Figura 4.1). El tornillo sin fin esta acoplado a la flecha de un motor (motor a pasos), que al rotar su flecha hace girar al tornillo sin fin y este a su vez inclina los espejos del helióstato, actuando como mecanismo de tijera al jalar los espejos del helióstato; sin embargo, sus especificaciones están basadas en la máxima velocidad del viento en la zona de instalación y con un máximo alcance en la rotación de los ejes del heliostato por las limitaciones del mecanismo (Light Manufacturing, EUA)(Sat Control, Eslovenia).



Figura 4.1 a) Helióstato H1 vista frontal. b) CAD helióstato H1 vista trasera (Cortesía de LightManufacturing).

4Existen investigaciones sobre la deformación en la estructura de algunos helióstatos utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD) con el fin de conocer los límites de operación, estableciendo un diseño capaz de soportar las condiciones climatológicas a las cuales estarán sometidos, por ejemplo, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes se realiza un análisis estático de esfuerzos y deformaciones de los componentes considerados críticos de un helióstato con la finalidad de conocer las condiciones de frontera (Chacón, y otros, 2011); en Sandia National Laboratory existen varias investigaciones donde se realiza 2 estudios estáticos, uno donde se analiza la deformación de la estructura por causa de la gravedad y otro donde se analiza la afectación que tiene la combinación de presión que ejerce la velocidad máxima del viento de la zona y la gravedad sobre el helióstato Dahan (Wang, 2007) (Moya, y otros, 2011).



4.2. Metodología

Debido a que el helióstato se encuentra instalado a la intemperie, el viento de la región juega un papel importante sobre las cargas y deformaciones que puedan presentarse sobre los actuadores al incidir sobre los espejos del helióstato (9 m²). Por lo que se realizó el análisis de las cagas y deformaciones sobre los actuadores seleccionados ocasionadas por la influencia del viento sobre el helióstato.

Primeramente, se calculó la presión máxima que ejerce el viento sobre la estructura del helióstato, con la finalidad de conocer las cargas que se presentaran sobre los actuadores seleccionados; se realizaron 3 análisis en 3 posiciones distintas del movimiento de elevación del helióstato (35°, 55°, 70°).

Los análisis realizados son:

- Análisis sobre el vástago del actuador con la afectación de la gravedad.
- Análisis sobre el vástago del actuador con la afectación de la gravedad y la presión del viento en la parte media superior de los espejos.
- Análisis sobre el vástago del actuador con la afectación de la gravedad y la presión del viento en la parte media inferior de los espejos.

4.3. Desarrollo

Análisis de presión del viento sobre los espejos del helióstato.

Para calcular el impacto del aire sobre e helióstato se plantean las siguientes consideraciones:

- Superficie total $A=9m^2$.
- Densidad del aire a 15°C, 1 atm y humedad relativa 37%, $\rho_v = 1.222 \text{ kg/m}^3$ (CENAM)
- Velocidad máxima en la ciudad de Querétaro, V=15m/s (CNA).

La fuerza que el viento ejerce sobre una superficie puede ser calculada a partir de la ecuación de presión dinámica (Daily, y otros, 1975) (Zang, y otros, 2012).

$$q = \frac{1}{2}\rho_v * v^2$$

Por lo que presión dinámica que ejerce el viento con las consideraciones planteadas es:

$$q = \frac{1}{2} * (1.2226417 \text{ kg/m}^3) * (15 \text{m/s})^2$$
$$q = 137.547 Pa$$



Análisis de presión del viento sobre los espejos del mediante software (SolidWoks)

Se procede a realizar un análisis de presión del viento mediante software con las consideraciones planteadas anteriormente con la finalidad de comparar resultados.

Los datos arrojados por la simulación son:

• Presión dinámica 112.30 Pa.

En la Figura 4.2 se puede visualizar el comportamiento del viento al incidir en la parte frontal con los espejos del helióstato.



Figura 4.2 Comportamiento del viento al incidir con los espejos del helióstato.

Comparando ambos resultados, se selecciona la presión dinámica máxima obtenida (137.54 Pa) para realizar el análisis sobre las cargas y deformaciones en los actuadores lineales ocasionadas por el viento.

Resultado de deformación en el vástago.

A continuación se presentan las deformaciones del vástago del actuador de cada una de las simulaciones (Tabla 2), el ángulo de posición se encuentra referenciado al eje X, es decir, si el movimiento de elevación se encuentra en la posición angular 90°, el plano del espejo maestro es perpendicular al horizonte.



Posición		G	G, VS	G, VI
70°	Fuerza	426 N	2077.2 N	2074.1 N
	Deformación	0.083 mm	0.101 mm	0.093 mm
55°	Fuerza	474.85 N	1816.4 N	1790.3 N
	Deformación	0.090 mm	0.106 mm	0.111 mm
35°	Fuerza	516 N	1547.9 N	1498.8 N
	Deformación	0.093 mm	0.106 mm	0.124 mm

Tabla 2 Resultado de deformación en análisis estático.

Donde:

G: Afectación por la gravedad.

VS: Afectación por el viento en la parte media superior.

VI: Afectación por el viento en la parte media inferior.

Según los resultados de las simulaciones sobre la fuerza que ejerce el viento sobre los actuadores lineales, la fuerza máxima teórica se presente cuando el movimiento de elevación se encuentra a 70° con velocidades y densidades de viento muy elevadas.

Las especificaciones de diseño para la selección de los actuadores lineales son: 1) la capacidad de carga dinámica deberá ser 2 veces mayor a la necesaria para realizar cada movimiento primario solamente con la afectación de la gravedad, b) la capacidad de carga estática axial deberá ser mayor 2 veces a la máxima carga ocasionada por el viento incidente en los espejos, de esta manera existe la seguridad que el actuador trabaje al 50% de su capacidad.

Por lo tanto, la capacidad de carga dinámica de los actuadores deberá ser mayor de 1032 N mientras que la capacidad de carga estática axial será mayor a 5158 N, debido a esto, los actuadores seleccionados tienen una capacidad de carga dinámica de 1500 N y capacidad de carga estática axial de 13500N con una longitud de carrera de 24 plgs y 20 plgs para los movimientos de elevación y rotación respectivamente, ambos trabajan con un voltaje nominal de 24 VDC y una corriente máxima de 16A.



Capítulo 5. Modelado de los movimientos de seguimiento

Un sistema de helióstato con concentrador parabólico fuera de eje está formado por un helióstato que refleja y concentra la luz del Sol en el concentrador parabólico, el cual pretende concentrar la luz del Sol, teniendo de esta manera una mayor concentración de la radiación solar (Villeda Muñoz, 2010). Existen varios metodos de seguimiento solar implementados en helióstatos, entre los cuales podemos mencionar al metodo Rotación – Elevación y al metodo Azimuth - Elevación.

El Método Rotación – Elevación consiste en tener dos ejes de seguimiento de rotación ortogonales conocidos como eje de rotación y eje de elevación. El punto donde ambos ejes de seguimiento se intersectan es conocido como pivote del helióstato y corresponde al punto donde se encuentra el espejo central. Sin embargo, dicho espejo se encuentra desfasado del pivote del helióstato una distancia correspondiente al ancho de la estructura que soporta al espejo, esta distancia es conocida como desfasamiento del espejo al pivote del helióstato, y dificulta la obtención de un modelo matemático exacto debido a que no es tomada en cuenta en la elaboración de las ecuaciones de seguimiento (Chong, y otros, 2011).

Las ecuaciones de seguimiento involucran variables físicas del sistema como lo es la distancia existente entre el helióstato y concentrador parabólico, el desfasamiento del espejo al pivote, la desviación del eje de seguimiento de rotación, la posición del vector del Sol y la ley de reflexión de Snell (Chong, y otros, 2011) (Wei, y otros, 2011).

Para obtener las ecuaciones de seguimiento para el Método Rotación – Elevación se utiliza matrices de rotación las cuales sirven para describir la orientación utilizando ejes de rotación. Sin embargo las matrices de rotación no permiten tomar en cuenta la distancia del desfasamiento del espejo al pivote, por lo que se hace uso del ángulo de corrección del movimiento de elevación para compensar el error de seguimiento (Guo, y otros, 2011) (Guo, y otros, 2013).

Existe una herramienta matemática llamada matrices de transformación homogéneas que definen la posición y orientación de un objeto tomando en cuenta tanto la rotación como la traslación (Barrientos, y otros, 1997).

Por ello el presente capítulo propone la utilización de matrices de transformación homogéneas para la obtención de las ecuaciones de seguimiento sistema helióstato con concentrador parabólico fuera de eje tomando en cuenta todos los parámetros físicos del sistema.


5.1. Metodología

La metodología planteada para la formulación de las ecuaciones de seguimiento del sistema helióstato con concentrador parabólico fuera de eje consiste en calcular el vector de posición de Sol *HS* en función de la posición aparente del sol dada por los ángulos de elevación solar α_s y azimut Υ_s , quienes están determinados por la latitud, hora, día y mes del año (Eicker, 2011). Una vez calculado el vector de posición de Sol *HS* (variables independientes del sistema), se procede a obtener la posición del plano del espejo maestro, restringido por los movimientos de seguimiento del helióstato (Rotación σ y Elevación ϵ), por medio de la ley de Snell (función f_1) y el vector Bisectriz a los vectores *HS* y *HC* (función f_2) para mantener el vector de reflexión *HC* en el centro del concentrador parabólico. Obteniendo la posición del plano se resolverá la posición angular de los movimientos de seguimiento del helióstato.

5.2. Cálculo de vector de posición de Sol

Debido a que el vector de Sol al estar tan alejado de la Tierra es definido en un sistema coordenado esférico, con un radio igual a uno y dos ángulos definidos al plano horizontal de la Tierra y al eje formado entre el Norte y Sur geográfico (ángulo de elevación α_s y de azimut Υ_s), estos ángulos son conocidos como coordenadas horizontales (Figura 5.1). Tanto el ángulo de elevación α_s y de azimut Υ_s son calculados en base a la declinación solar δ , al ángulo horario ω y la latitud ϕ . Es importante señalar que la referencia de un sistema coordenado es la posición del observador, así, a pesar que la Tierra se mueve alrededor del Sol, para este caso el Sol es quien se mueve alrededor de la Tierra.



Figura 5.1 Coordenadas horizontales. (Eicker, 2011)



La declinación solar δ está basada en el día del año, debido a que existe un cambio de declinación solar diaria promedio aproximadamente 0.25° y puede ser calculada de dos maneras, con una ecuación de proximidad o por series de Fourier (Eicker, 2011).

$$\delta = 23^{\circ} 26' 54'' (360/365 (284 + n))$$

$$\delta = \begin{pmatrix} 0.006918 - 0.399912 cos(B) + 0.070257 sen(B) - 0.006758 cos(2B) \\ + 0.000907 sen(2B) - 0.002697 cos(3B) + 0.00148 sen(3B) \end{pmatrix} \frac{180^{\circ}}{\pi}$$

$$B = 360^{\circ} \frac{n-1}{365}$$

Dónde:

n= día del año.

El ángulo horario ω está basado en la hora del lugar, siendo necesario calcular el Tiempo Solar Verdadero *TLT* a la hora local y a la longitud del observador, además de esto, es necesario calcular una corrección de tiempo debido a que un día solar no tiene una duración de 24 h, esta desviación temporal es calculada mediante la Ecuación de tiempo *E*_t (Eicker, 2011).

 $E_t = 229.2 \begin{pmatrix} 0.000075 + 0.001868cos(B) - 0.032077sen(B) \\ -0.01461cos(2B) - 0.040849sen(2B) \end{pmatrix} [min]$

La corrección del tiempo local se realiza debido a que en zonas alrededor de los 15° de longitud tienen su propio tiempo estándar. Para cada grado de desviación entre la hora local L_{Local} y la hora estándar L_{zone} existe una corrección horaria L_c de 4 minutos por grado.

$$L_c = 4(L_{Zone} - L_{local})$$
 [min]

Una vez definida la corrección horaria L_c y la Ecuación de tiempo E_t , el Tiempo Solar Verdadero TLT se puede calcular en base a la hora referida a la Central Europea del Tiempo *CET*.

$$TLT = CET - L_c + E_t$$

Una vez definido el Tiempo Solar Verdadero *TLT*, el ángulo horario ω se calcula de la siguiente manera:

$$\omega = (TLT - 12:00h)\frac{15^\circ}{h}$$

Una vez calculado la declinación δ , al ángulo horario ω y en base a la latitud ϕ se obtiene el ángulo de elevación α_s y el azimut Υ_s de la siguiente manera (Eicker, 2011):

$$sen(\alpha_s) = sen(\delta)sen(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)$$

$$Y_{s} = \begin{cases} 180^{\circ} - \arccos\left(\frac{sen(\alpha_{s})sen(\varphi) - sen(\delta)}{cos(\alpha_{s})cos(\varphi)}\right) \text{ cuando } TLT \leq 12:00 \text{ h}\\ 180^{\circ} + \arccos\left(\frac{sen(\alpha_{s})sen(\varphi) - sen(\delta)}{cos(\alpha_{s})cos(\varphi)}\right) \text{ cuando } TLT > 12:00 \text{ h} \end{cases}$$

Sin embargo, para evitar errores por la referencia del huso horario utilizado en la zona de localización del sistema, el cálculo del *TLT* se realizar en base a la longitud; en este caso, el huso horario utilizado para la ciudad de Querétaro es 5 h menor a la hora en el Meridiano Cero, pero el huso horario que corresponde es -7 h (Figura 5.2), existe un error de 2 horas para definir el *TLT*, por lo que se calculó de la siguiente manera:

$$TLT = CET + \frac{24 h * longitud}{360^{\circ}} + E_t$$



Figura 5.2 Mapa de uso horario (1995).





Sin embargo, puede existir un desfasamiento entre la dirección del movimiento del eje de rotación del helióstato con respecto al eje formado entre el Norte y el Sur geográfico, teniendo que compensar el ángulo azimut Y_c . la finalidad de esto es mantener la referencia al movimiento de rotación y no al eje formado entre el Norte y el Sur geográfico (Figura 5.3).



Figura 5.3 Corrección de ángulo azimut.

Ya que el vector de posición de Sol está descrito en coordenadas esféricas, es necesario hacer una transformación a coordenadas ortogonales, pues las matrices de transformación homogéneas sólo pueden operar con éstas.

$$V_{s} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{s})\cos(\gamma_{s} - \gamma_{c}) \\ \cos(\alpha_{s})\sin(\gamma_{s} - \gamma_{c}) \\ \sin(\alpha_{s}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{s})\cos(\gamma) \\ \cos(\alpha_{s})\sin(\gamma) \\ \sin(\alpha_{s}) \end{bmatrix}$$



En la Figura 5.4 se muestra el diagrama de flujo para el cálculo del vector de posición de Sol.



Figura 5.4 Diagrama de flujo para el cálculo del vector de posición de Sol.

A continuación se describe el procedimiento para plantear las ecuaciones que describan los movimientos de seguimiento del helióstato.



5.3. Cálculo de posición de movimientos de seguimiento primarios

Una vez descritos los ángulos del vector de Sol, se procede a formular un sistema de ecuaciones que mantenga constante el vector de reflexión del helióstato al concentrador *HC*. La metodología para formular el sistema de ecuaciones consiste en el trazado de puntos en base a matrices de transformación homogéneas, con la finalidad de formar vectores y realizar operaciones vectoriales debido a que el problema a resolver es geométrico, por lo tanto, se involucra la posición del concentrador parabólico *C*, el vector de Sol *HS*, las restricciones mecánicas del helióstato (movimientos de seguimiento) y la distancia existente entre el pivote del helióstato y la superficie del espejo maestro *L*.

Función f_1 . Igualación de ángulos de incidencia θ y ángulo de reflexión θ ' (Ley de Snell)

La función f_1 está formulada en base a la ley de Snell, que indica que el ángulo de incidencia θ de una onda electromagnética sobre una superficie (plano) debe ser igual al ángulo de reflexión θ' , debido a esto el vector de incidencia *HS* es el vector formado por la posición de Sol *S* y el centro de la superficie del espejo maestro del helióstato *H* (Figura 5.5). El vector de posición del Sol es un vector libre que se puede trasladar a cualquier punto en el espacio y que el centro de la superficie del espejo maestro es el origen de todos los vectores para formular las funciones f_1 y f_2 .



Figura 5.5 Representación del vector de incidencia HS y vector de reflexión HC.

Cada uno de los movimientos primarios del helióstato (rotación σ y elevación ϵ) son representados por un eje coordenado independiente del otro pero manteniendo el mismo origen (pivote del helióstato), representados mediante matrices de transformación homogéneas; sin embargo, para identificar la



posición central del espejo maestro del helióstato H es necesario realizar una translación L con respecto a los dos ejes anteriores como lo muestra la Figura 5.6.



Figura 5.6 a) Ángulos de movimiento de rotación y elevación b) Eje trasladado longitud L.

Los ejes de seguimiento del helióstato y la longitud *L* son representados por medio de una matriz de trasformación homogénea cada uno.

$$R_{(X,\sigma)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 0 \\ 0 & \sin(\sigma) & \cos(\sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$R_{(Y,\varepsilon)} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{(X,L)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para establecer la orientación y posición de *H* se realiza la multiplicación de las matrices anteriores (por orden de aparición) y posteriormente se multiplican por el punto origen P_{H0} .

$$H = {}^{0}M_{H_{3}} * P_{H0} = \begin{bmatrix} H_{x} \\ H_{y} \\ H_{z} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Dónde:



$${}^{0}M_{H_{3}} = {}^{0}R_{(X,\sigma)_{1}} * {}^{1}R_{(Y,\varepsilon)_{2}} * {}^{2}T_{(X,L)_{3}}$$
$$P_{H0} = \begin{bmatrix} 0\\0\\0\\1\end{bmatrix}$$

Debido a que *H* es el origen de todos los vectores, los demás puntos se deben trazar en base a él; de la misma manera, para formular los puntos H_1 y H_2 se realiza la serie de multiplicaciones de las matrices homogéneas hasta *H* pero ahora, se agrega la respectiva translación en el eje Z.

$$H_{1} = {}^{0}M_{H_{3}} * {}^{3}T_{(Z,1)_{4}} * P_{H0} = \begin{bmatrix} H_{1x} \\ H_{1y} \\ H_{1z} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L * \cos(\varepsilon) + sen(\varepsilon) \\ L * sen(\sigma) * sen(\varepsilon) - sen(\sigma) * \cos(\varepsilon) \\ -L * \cos(\sigma) * sen(\varepsilon) + \cos(\sigma) * \cos(\varepsilon) \\ 1 \end{bmatrix}$$
$$H_{2} = {}^{0}M_{H_{3}} * {}^{3}T_{(Z,-1)_{4}} * P_{H0} = \begin{bmatrix} H_{2x} \\ H_{2y} \\ H_{2z} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L * \cos(\varepsilon) - sen(\varepsilon) \\ L * sen(\sigma) * sen(\varepsilon) + sen(\sigma) * \cos(\varepsilon) \\ -L * \cos(\sigma) * sen(\varepsilon) - \cos(\sigma) * \cos(\varepsilon) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Una vez descritos los puntos H, H_1 y H_2 se procede a obtener los vectores HH_1 y HH_2 y sus respectivas magnitudes.

$$HH_{1} = \begin{bmatrix} H_{1x} - H_{x} \\ H_{1y} - H_{y} \\ H_{1z} - H_{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sen(\varepsilon) \\ -sen(\sigma) * cos(\varepsilon) \\ cos(\sigma) * cos(\varepsilon) \end{bmatrix}$$
$$|HH_{1}| = 1$$
$$HH_{2} = \begin{bmatrix} H_{2x} - H_{x} \\ H_{2y} - H_{y} \\ H_{2z} - H_{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -sen(\varepsilon) \\ sen(\sigma) * cos(\varepsilon) \\ -cos(\sigma) * cos(\varepsilon) \end{bmatrix}$$
$$|HH_{2}| = 1$$

Por otro lado, el vector de reflexión *HC* se obtiene por la diferencia del punto central del espejo maestro y las coordenadas del concentrador parabólico.

$$HC = C - H = \begin{bmatrix} C_x - H_x \\ C_y - H_y \\ C_z - H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_x - L * \cos(\varepsilon) \\ C_y - L * sen(\sigma) * sen(\varepsilon) \\ C_z + L * \cos(\sigma) * sen(\varepsilon) \end{bmatrix}$$
$$|HC| = \left(\left(C_x - L * \cos(\varepsilon) \right)^2 + \left(C_y - L * sen(\sigma) * sen(\varepsilon) \right)^2 + \left(C_z + L * \cos(\sigma) * sen(\varepsilon) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Sin embargo, para obtener el vector de incidencia HS se hace uso del vector de Sol V_s , pero al ser un vector libre es posible trasladarlo hasta H para poder obtener el punto donde se localiza el Sol S:

$$S = V_{s} + H = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{s})\cos(\gamma) + L * \cos(\varepsilon) \\ \cos(\alpha_{s})\sin(\gamma) + L * sen(\sigma) * sen(\varepsilon) \\ sin(\alpha_{s}) - L * \cos(\sigma) * sen(\varepsilon) \end{bmatrix}$$

Una vez establecido el punto S se procede a obtener el vector de incidencia HS y su magnitud.

$$HS = S - H = V_s = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_s)\cos(\gamma) \\ \cos(\alpha_s)\sin(\gamma) \\ \sin(\alpha_s) \end{bmatrix}$$

$$|HS| = 1$$

Una vez definidos los vectores HH_1 , HH_2 , HC y HS se calcula el ángulo de incidencia θ y el ángulo de reflexión θ ' para ser igualados en base a la Ley de Snell. El ángulo de incidencia θ se calcula con el producto punto *de los* vectores HS y HH_1 , *mientras que el* ángulo de reflexión θ ' se calcula con el producto punto de los vectores HC y HH_2 .

$$Cos (\theta) = \frac{HS \cdot HH_1}{|HS| * |HH_1|} = HS \cdot HH_1$$
$$Cos (\theta') = \frac{HC \cdot HH_2}{|HC| * |HH_2|} = \frac{HC \cdot HH_2}{|HC|}$$

Igualando el ángulo de incidencia θ con el ángulo de reflexión θ' .

$$HS \cdot HH_1 = \frac{HC \cdot HH_2}{|HC|}$$

Despejando e igualando la ecuación a 0 obtenemos:

$$f_1 = HS \cdot HH_1 * |HC| - HC \cdot HH_2 = 0$$

Por lo tanto f1 es:



Función f₂. Bisectriz

Ya que la Ley de Snell es aplicada a un plano y el problema a solucionar es tridimensional debido a que el plano formado por el espejo maestro depende de los movimientos de seguimiento del helióstato, es necesario formular otra ecuación para resolverlo. Por esto, se establece una ecuación a partir de la formación de un vector bisectriz *N* entre los vectores *HC* y *HS* y que sea un vector normal al plano del espejo (Chen, y otros, 2001), siendo ortogonal a cualquier vector que se encuentre en ese plano, donde β y β ' tienen la misma magnitud (Figura 5.7).



Figura 5.7 Vector bisectriz N.

El vector Nestá definido entre el punto H y el punto medio de los vectores unitarios de los vectores HC y HS.

$$N = \begin{bmatrix} \frac{HC_x}{|HC|} + HS_x \\ \frac{2}{|HC|} + HS_y \\ \frac{|HC|}{2} + HS_y \\ \frac{2}{|HC|} + HS_z \\ \frac{HC_z}{2} \end{bmatrix}$$



$$N = \begin{bmatrix} \frac{c1 - L * \cos(\varepsilon)}{\left(\left(c3 + L * \cos(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c2 - L * \sin(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c1 - L * \cos(\varepsilon)\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}} + \cos(\alpha_{s}) * \cos(\gamma_{s})}{\frac{c2 - L * \sin(\sigma) * \sin(\varepsilon)}{\left(\left(c3 + L * \cos(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c2 - L * \sin(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c1 - L * \cos(\varepsilon)\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}} + \cos(\alpha_{s}) * \sin(\gamma_{s})} \right|^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \frac{c3 + L * \cos(\sigma) * \sin(\varepsilon)}{\left(\left(c3 + L * \cos(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c2 - L * \sin(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c1 - L * \cos(\varepsilon)\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}} + \sin(\alpha_{s})}{\left(\left(c3 + L * \cos(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c2 - L * \sin(\sigma) * \sin(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c1 - L * \cos(\varepsilon)\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}} + \sin(\alpha_{s})}$$

Como el vector N debe ser ortogonal al HH_1 se debe cumplir:

$$Cos (90) = \frac{N \cdot HH_1}{|N| * |HH_1|} = 0$$

Despejando e igualando la ecuación a 0 obtenemos:

$$f_2 = N \cdot H H_1$$

Por lo tanto f₂ es:

$$f_{2} = -\frac{\cos(\alpha_{s}) * \operatorname{sen}(Y_{s}) * \cos(\sigma) + \operatorname{sen}(\alpha_{s}) * \operatorname{sen}(\sigma)}{2} + \frac{\cos(\sigma) * (c2 - L * \operatorname{sen}(\sigma) * \operatorname{sen}(\varepsilon)) + \operatorname{sen}(\sigma) * (c3 + L * \cos(\sigma) * \operatorname{sen}(\varepsilon))}{\left(2 * \left(\left(c3 + L * \cos(\sigma) * \operatorname{sen}(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c2 - L * \operatorname{sen}(\sigma) * \operatorname{sen}(\varepsilon)\right)^{2} + \left(c1 - L * \cos(\varepsilon)\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}\right)}$$

5.4. Cálculo de posición de movimientos de seguimiento secundarios

Una vez obtenida la posición de los movimientos de seguimiento primario, se pueden formular una ecuación para cada uno de los movimientos de seguimiento secundarios; la metodología planteada es igual a la metodología para obtener la función f₁, es decir, en base a la Ley de Snell.

Función f₃. Movimiento de elevación del espejo esclavo 1

Para formular la ecuación de ángulo de elevación del espejo esclavo 1 se establecen los vectores involucrados, como lo muestra la Figura 5.8.





Figura 5.8 Representación de vector de incidencia E_1S y vector de reflexión E_1C .

Para establecer la posición y dirección del vector E_1S , se describe la posición y orientación del centro del espejo secundario 1 E_1 ; la Figura 5.9 muestra los ejes, rotaciones y translaciones involucradas para la formulación de las matrices homogéneas.



Figura 5.9 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.

$$E_{1} = {}^{0}M_{E1_{6}} * P_{H0} = \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{1z} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Dónde:

$${}^{0}M_{E1_{6}} = {}^{0}R_{(X,\sigma)_{1}} * {}^{1}R_{(Y,\varepsilon)_{2}} * {}^{2}T_{(Z,L1)_{3}} * {}^{3}R_{(X,L2)_{4}} * {}^{4}R_{(Y,\varepsilon1)_{5}} * {}^{5}T_{(X,L3)_{6}}$$



$${}^{0}M_{E1_{6}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 0 \\ 0 & \sin(\sigma) & \cos(\sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varepsilon1) & 0 & \cos(\varepsilon1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon1) & 0 & \sin(\varepsilon1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varepsilon1) & 0 & \cos(\varepsilon1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varepsilon1) & 0 & \cos(\varepsilon1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para obtener los puntos E_{1a} y E_{1b} se involucra la respectiva traslación en el eje coordenado Z.

$$E_{1a} = {}^{0}M_{E1_{6}} * {}^{6}T_{(Z,1)_{7}} * P_{H0} = \begin{bmatrix} E_{1ax} \\ E_{1ay} \\ E_{1az} \\ 1 \end{bmatrix}$$
$$E_{1b} = {}^{0}M_{E1_{6}} * {}^{6}T_{(Z,-1)_{7}} * P_{H0} = \begin{bmatrix} E_{1bx} \\ E_{1by} \\ E_{1bz} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Una vez descritos los puntos E_1 , E_{1a} y E_{1b} se pueden obtener los vectores E_1E_{1a} y E_1E_{1b} y sus respectivas magnitudes.

$$E_{1}E_{1a} = \begin{bmatrix} E_{1ax} - E_{1x} \\ E_{1ay} - E_{1y} \\ E_{1az} - E_{1z} \end{bmatrix}$$
$$|E_{1}E_{1a}| = 1$$
$$E_{1}E_{1b} = \begin{bmatrix} E_{1bx} - E_{1x} \\ E_{1by} - E_{1y} \\ E_{1bz} - E_{1z} \end{bmatrix}$$
$$|E_{1}E_{1b}| = 1$$

De la misma manera se obtiene el vector de reflexión E_1C , y su magnitud, donde C son las coordenadas del concentrador parabólico.

$$E_{1}C = C - E_{1} = \begin{bmatrix} C_{x} - E_{1x} \\ C_{y} - E_{1y} \\ C_{z} - E_{1z} \end{bmatrix}$$
$$|E_{1}C| = \left((E_{1}C_{x})^{2} + (E_{1}C_{y})^{2} + (E_{1}C_{z})^{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Una vez definidos los vectores E_1E_{1a} , E_1E_{1b} , E_1C y el vector de Sol *HS* se calcula el ángulo de incidencia θ_1 y el ángulo de reflexión θ'_1 siendo igualados en base a la Ley de Snell.

$$Cos (\theta_{1}) = \frac{HS \cdot E_{1}E_{1a}}{|HS| * |E_{1}E_{1a}|} = HS \cdot E_{1}E_{1a}$$
$$Cos (\theta_{1}') = \frac{E_{1}C \cdot E_{1}E_{1b}}{|E_{1}C| * |E_{1}E_{1b}|} = \frac{E_{1}C \cdot E_{1}E_{1b}}{|E_{1}C|}$$

Igualando el ángulo θ_1 con el ángulo de reflexión θ'_1 .

$$HS \cdot E_1 E_{1a} = \frac{E_1 C \cdot E_1 E_{1b}}{|E_1 C|}$$

Despejando e igualando a 0 la ecuación obtenemos la función f3:

$$f_3 = HS \cdot E_1 E_{1a} * |E_1 C| - E_1 C \cdot E_1 E_{1b} = 0$$

Función f₄. Movimiento de elevación del espejo esclavo 2

Para formular la ecuación de ángulo de elevación del espejo esclavo 2 se establecen los vectores involucrados, como lo muestra la Figura 5.10.



Figura 5.10 Representación de vector de incidencia E_2S y vector de reflexión E_2C .

Para establecer la posición y dirección del vector E_2S , se describe la posición y orientación del centro del espejo secundario 2 E_2 ; la Figura 5.11 muestra los ejes, rotaciones y translaciones involucradas para la formulación de las matrices homogéneas.





Figura 5.11 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.

La metodología utilizada es igual que la del espejo esclavo 1, por lo que la función f_4 que describe la posición del eje de seguimiento del espejo secundario 2 es:

$$f_4 = HS \cdot E_2 E_{2a} * |E_2 C| - E_2 C \cdot E_2 E_{2b} = 0$$

Función f₅. Movimiento de elevación del espejo esclavo 3

Para formular la ecuación de ángulo de elevación del espejo esclavo 3 se establecen los vectores involucrados, como lo muestra la Figura 5.12.



Figura 5.12 Representación de vector de incidencia E₃S y vector de reflexión E₃C.



Para establecer la posición y dirección del vector E_3S , se describe la posición y orientación del centro del espejo secundario 3 E_3 ; la Figura 5.13 muestra los ejes, rotaciones y translaciones involucradas para la formulación de las matrices homogéneas.



Figura 5.13 a) Vista frontal del helióstato b) Vista lateral del helióstato.

La metodología utilizada es igual que la del espejo esclavo 1, por lo que la función f_5 que describe la posición del eje de seguimiento del espejo secundario 3 es:

$$f_5 = HS E_3 E_{3a} * |E_3 C| - E_3 C E_3 E_{3b} = 0$$

Función f₆. Movimiento de elevación del espejo esclavo 4

Para formular la ecuación de ángulo de elevación del espejo esclavo 3 se establecen los vectores involucrados, como lo muestra la Figura 5.14.



Figura 5.14 Representación de vector de incidencia E_4S y vector de reflexión E_4C .



Para establecer la posición y dirección del vector E_3S , se describe la posición y orientación del centro del espejo secundario 4 E_4 ; la Figura 5.15 muestra los ejes, rotaciones y translaciones involucradas para la formulación de las matrices homogéneas.



Figura 5.15 a) Vista frontal del helióstato b) Vista superior del helióstato.

La metodología utilizada es igual que la del espejo esclavo 1, por lo que la función f_6 que describe la posición del eje de seguimiento del espejo secundario 4 es:

$$f_6 = HS \cdot E_4 E_{4a} * |E_4 C| - E_4 C \cdot E_4 E_{4b} = 0$$

5.5. Solución de ecuaciones

Para los movimientos de seguimiento primario se obtiene un sistema de ecuaciones no lineales con dos incógnitas, mientras que para cada uno de los movimientos de seguimiento secundario una ecuación no lineal; se utiliza el método numérico Newton-Raphson (Won, y otros, 2005) para aproximar la solución de cada uno de los movimientos de seguimiento.

Por lo tanto, para obtener el valor de los movimientos de seguimiento primarios se utiliza el algoritmo de aproximación de la solución de un sistema de ecuaciones de dos ecuaciones con dos incógnitas con este método:

$$\begin{bmatrix} x_{1,k+1} \\ x_{2,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \partial f_1 / \partial x_1 \\ \partial f_2 / \partial x_1 & \partial f_2 / \partial x_2 \end{bmatrix}^{-1} \Big|_{x_{1k}, x_{2k}} * \begin{bmatrix} f_1 (x_{1k}, x_{2k}) \\ f_2 (x_{1k}, x_{2k}) \end{bmatrix}$$

Para solucionar las ecuaciones de seguimiento de los movimientos de seguimiento secundarios se hace uso del algoritmo de aproximación de una ecuación con una incógnita.



$$x_{1,k+1} = x_{1k} - \frac{f_1(x_{1k}, x_{2k})}{\partial f_1} \Big|_{x_1k}$$

Donde:

k: Valor actual.

k+1: Valor siguiente.

Una vez obtenida la solución de los movimientos de seguimiento, se realiza un corrimiento a las soluciones con varias revoluciones para representar una posición angular alcanzable mecánicamente por el helióstato.



5.6. Trayectorias de movimientos de seguimiento del helióstato

Una vez definidas las ecuaciones que describen al sistema helióstato con concentrador parabólico fuera de eje con los movimientos de seguimiento elevación y rotación, se puede trazar las trayectorias de estos resolviendo las ecuaciones a lo largo del día en distintas fechas del año, variando la localización, orientación y magnitudes físicas del helióstato, así como la separación existente entre él y el concentrador parabólico.

Al variar la localización del sistema helióstato con concentrador parabólico se observa que la trayectoria de los movimientos de seguimiento son afectadas por la latitud geográfica (Figura 5.16), debido a la altura máxima que puede tomar el ángulo de elevación solar α_s , mientras más cercano al meridiano Ecuador esté el sistema, mayor altura tomará este ángulo solar, por otro lado, la longitud geográfica del sistema afecta a la hora solar pero no a la trayectoria de los movimientos de seguimiento.



Figura 5.16 Trayectorias afectadas según la latitud geográfica del sistema helióstato - concentrador parabólico en el día 20 de Enero: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación.

Debido a que el ángulo de elevación solar α_s cambia su magnitud a lo largo del año, es importante conocer las trayectorias de los movimientos de seguimiento, al variar esta magnitud, para obtener las amplitudes máximas y mínimas de los movimientos de seguimiento. Se realizó el análisis en los solsticios y equinoccios, debido a que en los solsticios se presenta la amplitud máxima y mínima del ángulo de elevación solar α_s y en los equinoccios son aquellas fechas cuando la duración del día es igual al de la noche. La trayectoria del movimiento de rotación del helióstato sufre una rotación sobre el punto de inflexión que se presenta al medio día solar (el ángulo de elevación solar alcanza su



mayor altura en el día), mientras que la trayectoria del movimiento de elevación del helióstato sufre un desplazamiento hacia arriba o hacia abajo como lo muestra la Figura 5.17.



Figura 5.17 Trayectorias afectadas según la fecha con una latitud de 20.57°: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación.

La relación de posición entre el helióstato y el concentrador parabólico afecta directamente a las trayectorias de los movimientos de seguimiento. Se realizan simulaciones variando la cercanía y la relación de altura del concentrador parabólico con el helióstato. La Figura 5.18 muestra como es afectada la amplitud del movimiento de rotación y elevación del helióstato al cambiar la distancia entre ellos.



Figura 5.18 Trayectorias afectadas por la distancia existente entre el helióstato y el concentrador parabólico: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación.



Por otro lado, al variar la relación de altura entre el concentrador parabólico y el helióstato, se observa que la amplitud que alcanza el movimiento de elevación aumenta al estar por encima del helióstato, mientras que en el movimiento de rotación se presenta una curvatura más pronunciada (Figura 5.19).



Figura 5.19. Trayectorias afectadas por la relación de altura existente entre el helióstato y el concentrador parabólico: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación.

Las trayectorias de seguimiento del helióstato son afectadas por la orientación en la que se encuentre el movimiento de rotación, es decir, el ángulo formado entre la dirección de este movimiento y el eje formado entre el Norte y Sur geográfico. La trayectoria en los movimientos de seguimiento cambian al variar la referencia de salida y puesta del Sol con el ángulo azimut Υ_s . La Figura 5.20 muestra las trayectorias de los movimientos de seguimiento de seguimiento primarios del helióstato al tener que compensar el ángulo azimut Υ_c .



Figura 5.20 Trayectorias afectadas por la compensación compensar el ángulo azimut al tener una desviación entre el eje helióstato concentrador parabólico y el eje Norte - Sur geográfico: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación.



La distancia entre el pivote del helióstato y la superficie del espejo L afecta directamente al movimiento de elevación y no al de rotación del helióstato, por esta razón, se utiliza una variable angular para corregir el error producido por despreciar esa distancia (Guo, y otros, 2011). En la Figura 5.21 se muestra las trayectorias que siguen los movimientos de seguimiento del helióstato cuando L es diferente a cero.



Figura 5.21 Trayectorias afectadas por la distancia entre el pivote del helióstato y la superficie del espejo maestro en el día 20 de Enero: a) Movimiento de rotación, b) Movimiento de elevación.

Una vez definida la trayectoria de los movimientos de seguimiento, se corrobora que el vector de reflexión *HS* se mantenga contante sobre el centro del concentrador parabólico a lo largo del día (Figura 5.22).



Figura 5.22 Incidencia del vector de reflexión sobre el concentrador parabólico cuando L = 0.6



m, C (26_i, 0_j, -2_k) m, Y_c=0, φ=20.57° durante el día 20 de Enero.

5.7. Error permitido por el sistema

Debido a la distancia que existe entre el concentrador parabólico y el helióstato, el mínimo error en la posición de los movimientos de seguimiento puede ocasionar que el vector de reflexión *HC* no incida en el concentrador parabólico, el cual tiene un área aproximada de 2 m². Se realiza la simulación calculando la posición de los movimientos de seguimiento a una hora determinada, manteniendo esta posición constante mientras que el vector de posición del Sol cambia con el tiempo, con la finalidad de observar el error producido por no actualizar la posición de los movimientos de seguimientos de seguimiento seguimiento de seguimiento de seguimiento de seguimiento de seguimiento (Figura 5.23).



Figura 5.23 Incidencia del vector HC sobre el concentrador al cambiar la posición del Sol cada 3 minutos y mantener la posición angular de los movimientos primarios del helióstato a) 10 horas, b) 11 horas, c) 12 horas y d) 13 horas.

La finalidad de estimar el tiempo mínimo de actualización de la posición de los actuadores es obtener el área de trabajo donde se pretende que incida el vector de reflexión *HC* y establecer el error



permitido en la posición de éstos. Se seleccionó la distancia máxima de separación de la incidencia del vector de reflexión *HC* con el centro del concentrador de 0.65 m (radio menor del concentrador parabólico) como lo muestra la Figura 5.24 y se concluye que el tiempo de actualización de la posición angular de los movimientos primarios debe ser cada 9 minutos como máximo, y el error permitido para cada movimiento es de \pm 0.378° para el movimiento de elevación y de \pm 3.32° para el movimiento de rotación.







Capítulo 6. Control de posición

6.1. Variación en la posición de los ejes de los movimientos primarios debido a la influencia del viento.

Para identificar el error en la posición sobre el movimiento de elevación por la incidencia del viento sobre los espejos del helióstato, se aplica una fuerza intermitente de 147 N tangencial a este movimiento en el extremo del helióstato simulando la fuerza del viento calculada en Capítulo 4.

La Figura 6.1 muestra el error en la posición del movimiento de elevación al realizar la prueba al simular la incidencia del viento sobre los espejos; se inicia la prueba en la posición angular de -25.55° obteniendo oscilaciones desde -25.39° hasta -25.74°, tomando el valor más alejado a la referencia, se establece que la variación de la posición por la afectación del viento es de \pm 0.24°.





Por otro lado, para identificar el error en la posición ocasionado por el viento sobre el movimiento de rotación, se aplica una fuerza intermitente de 147 N tangencial a éste movimiento en un extremo del helióstato. La Figura 6.2 muestra la variación de la posición del movimiento de rotación al realizar esta prueba; se inicia la prueba en la posición angular de -1.52° obteniendo oscilaciones desde -4.329° hasta 5.497°, resultando que la variación de la posición por la afectación del viento es de \pm 3.977°.





Figura 6.2 Variación de la posición del movimiento de rotación por la afectación de fuerzas externas al sistema.

6.2. Identificación del juego mecánico

El juego mecánico se presenta en todo el sistema mecánico debido a la unión de dos o más piezas, por esta razón, es importante identificarlo sobre los movimientos del helióstato para poder estimar el error que puede ocasionar y planear una estrategia para minimizar ese error.

Al someter fuerzas que cambian de magnitud con el tiempo a la unión de dos o más piezas mecánicas se producen oscilaciones debido a la existencia de huecos entre las piezas. El sistema helióstato con concentrador parabólico al encontrarse estático en una posición y ser sometido a fuerzas exteriores como el viento, presentará oscilaciones con una amplitud máxima su posición en ambos movimientos de seguimiento, las cuales pueden ser identificadas.

Por lo anterior, se pretende identificar el tiempo que tarda el sistema en responder cuando existe un cambio de dirección del avance del actuador lineal en cada uno de los movimientos de seguimiento del helióstato. Se plantea una prueba para identificar el tiempo de respuesta de los actuadores, la prueba consiste en la programación de varios ciclos de avance y retroceso de los actuadores, entre cada cambio de sentido de avance existe un tiempo muerto con la finalidad de que el sistema se estabilice, el ancho de pulso del voltaje de entrada a los actuadores es el mismo tanto para el avance como para el retroceso del actuador; cada ciclo tiene una duración de 30 s, de los cuales, 10 s son de avance hacia adelante, 10 s de avance hacia atrás y 5 s por cada tiempo muerto entre cambio de sentido de avance, esto se realiza para ambos movimientos primarios.



La Figura 6.3 muestra la velocidad de respuesta del movimiento de elevación al implementar una señal cuadrada con un ancho de pulso de 8% en ambos sentidos, en azul se muestra el sentido de la señal de entrada utilizada para realzar cada intervalo de los ciclos; se observa que el tiempo de respuesta se encuentra alrededor de 0.9 s y prácticamente no existe impulso en la señal de la posición angular.



Figura 6.3 Repuesta del movimiento de elevación a una señal escalón en diferentes direcciones

La Figura 6.4 muestra la velocidad de respuesta del movimiento de rotación en ambos sentidos, la señal cuadrada utilizada tiene un ancho de pulso del 5%, se observa que la velocidad de respuesta del movimiento de rotación al cambiar el sentido de avance del actuador se encuentra alrededor de 0.4 s y no presenta un impulso al detener la señal de entrada.



Figura 6.4 Repuesta del movimiento de rotación a una señal escalón en diferentes direcciones



La velocidad de la señal de salida de la posición es distinta al avanzar y al retroceder en ambos movimientos, esto es ocasionado por el momento generado por la masa desequilibrada del sistema con respecto a cada eje de movimiento. Así mismo, el retraso en la señal de salida, al cambiar la dirección de sentido de giro, es ocasiona por el juego mecánico existente entre las piezas que conforman los actuadores lineales y el mecanismo de acople hacia el helióstato.

6.3. Control On-Off (lazo cerrado)

Para controlar la posición de los movimientos de seguimiento del helióstato, se elabora un controlador del tipo On-Off con lazo cerrado. Consiste en retroalimentar la posición angular actual (Salida) y restarla a la posición angular deseada (Entrada) para obtener el error en la posición, posteriormente se evalúa la magnitud del error para identificar si es lo suficientemente pequeño para considerarlo cero (Histéresis), en caso contrario, se evalúa el signo del error (Signo) para seleccionar el sentido de avance de los actuadores y multiplicarlo por una velocidad establecida (Ganancia K) como lo muestra la Figura 6.5.



Figura 6.5 Esquema de control On-Off diseñado.

Para determinar la ganancia K de cada uno de los movimientos de seguimiento del helióstato, primeramente se plantea una velocidad de trabajo de cada actuador lineal de acuerdo a las necesidades de cada movimiento y posteriormente se calcula el valor del voltaje que se aplicara al actuador. Para esto, se estableció que la velocidad de trabajo del movimiento de elevación es de 2.2 mm/s, corresponde a 67 rpm del motorreductor del actuador y equivale a 1.92 V; para el movimiento de rotación se estableció una velocidad de avance del actuador de 1.4 mm/s, corresponde a 43 rpm del motorreductor del actuador de 1.2 V.

Para verificar el controlador propuesto en cada movimiento primario, se plantea indicarle al controlador que mantenga alguna posición angular previamente seleccionada durante 2 minutos; para el movimiento de elevación, se implementa un ancho de pulso de 8% para la señal PWM de entrada al actuador y se programa un ciclo que inicia en -46° con una disminución de la posición angular de 3°



en 4 posiciones más, al llegar a la última posición, regresar de la misma manera hasta la posición inicial como lo muestra la Figura 6.6, donde la posición deseada es representada por la señal roja.



Figura 6.6 Respuesta del movimiento de elevación al controlador On-Off implementado donde el error máximo obtenido en la posición angular es de \pm 0.79°.

Para comprobar el comportamiento del controlador sobre el movimiento de rotación se implementa un ancho de pulso del 5% de la señal PWM como entrada al actuador y se programa un ciclo de prueba que consiste en iniciar en 20° y trasladarse hasta -20° con aumentos de 10° y regresar de la misma manera a la posición inicial (Figura 6.7).



Figura 6.7 Respuesta del movimiento de rotación al controlador On-Off implementado donde el error máximo obtenido en la posición angular es de \pm 1.30°.



Como se mencionó en el subcapítulo 5.7. de acuerdo a la geometría del concentrador parabólico, los errores en estado estacionario para el movimiento de elevación y rotación son 0.378° y 3.32° respectivamente, conforme a los resultados experimentales del controlador, concluyendo que el controlador para el movimiento de rotación cumple con su especificación de error, sin embargo, esto no ocurre con el controlador para el movimiento de elevación, debido a que la diferencia del error en estado estacionario y el error máximo medido es de 0.41°, este error se encuentra asociado a la existencia del juego mecánico entre los eslabones que une al actuador lineal con el helióstato, el juego mecánico se presenta entre el rodamiento que une el eje de movimiento de elevación y los espejos de helióstato como lo muestra la Figura 6.8.



Figura 6.8 a) Juego mecánico entre el eje del movimiento de elevación con la superficie de los espejos del helióstato b) Rodamiento del eje de movimiento de elevación.

6.4. Respuesta transitoria y en estado permanente de la posición de los movimientos de seguimiento del helióstato.

Para analizar el desempeño del controlador On-Off implementado para la automatización de helióstato se analiza el comportamiento de cada movimiento de seguimiento al indicarle el cambio de posición con la finalidad de observar el tiempo de respuesta y su respuesta en estado estacionario.

La Figura 6.9 muestra el tiempo que tarda el movimiento de rotación en llegar a una posición indicada; debido a que la velocidad implementada es muy lenta se obtuvo una señal sobreamortiguada, no se



presenta un sobre impulso mayor a la tolerancia dentro del error estacionario para este movimiento, manteniéndose estable en la posición deseada.



Figura 6.9 Respuesta transitoria y respuesta en estado permanente del movimiento de rotación.

La Figura 6.10 muestra el tiempo que tarda el movimiento de elevación en llegar a una posición indicada; la señal medida no presenta un sobre impulso al llegar a posición deseada, sin embargo, cuando el controlador intenta estabilizar la señal dentro de la tolerancia de error, la posición del movimiento de elevación suele salir de este rango.



Figura 6.10 Respuesta transitoria y respuesta en estado permanente del movimiento de elevación.



6.5. Sistema automatizado

El sistema automatizado diseñado a lo largo de este trabajo para el sistema helióstato con concentrador parabólico está constituido por:

- Cálculo de la posición del Sol
- Solución de las ecuaciones de los movimientos de seguimiento (f₁ y f₂)
- Instrumentación e instalación de actuadores para los movimientos de seguimiento
- Diseño de algoritmo de control de posición.

Las actividades nombradas anteriormente deben estar relacionadas sinérgicamente para que el vector de incidencia *HS* sea reflejado desde el helióstato hacia el concentrador parabólico manteniendo la colección de radiación solar de manera eficiente. En la Figura 6.11 se muestra el diagrama de las tareas que realiza el controlador para posicionar los movimientos de seguimiento del helióstato con respecto a la posición del Sol y del concentrador parabólico.





Figura 6.11 Sistema automatizado del sistema helióstato con concentrador parabólico fuera de eje



Capítulo 7. Resultados y discusiones

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos por el cálculo de las trayectorias calculadas en el Capítulo 4 utilizando el control propuesto en el Capítulo 3 implementado en el helióstato diseñado por el Dr. Gabriel Villeda en las instalaciones de CICATA-QRO.

7.1. Resultados experimentales

Se realizan pruebas físicas de las trayectorias de los movimientos primarios del helióstato a lo largo del día 29 de agosto del 2014 en la ciudad de Querétaro ($\phi = 20.57^{\circ}$) con la finalidad de comprobar el modelo matemático del sistema helióstato con concentrador parabólico planteado en el Capítulo 4. Debido a que el concentrador parabólico refleja la luz del vector de reflexión *SH* al foco, es forrado con una lona negra. Se presentan aberraciones en la imagen reflejada del helióstato al concentrador parabólico debido a las irregularidades existentes en la lámina de aluminio anodizado que se utiliza como espejo.

Se seleccionaron tres horas del día (8, 12 y 18 h) para observar el comportamiento de los movimientos de seguimiento del helióstato y del vector de reflexión *SH*. Se realizó la medición de cada uno de los movimientos primarios durante una hora, se identificó el error de posición en ellos y se simuló la incidencia del vector de reflexión *SH* sobre el concentrador parabólico.

En la Figura 7.1 se presenta el sistema helióstato con concentrador parabólico a las 8:15 h, la posición de los movimientos de elevación y rotación del helióstato son -50.76° y-58.64° respectivamente y en la Figura 7.4 se presenta la incidencia del vector de reflexión *SH* sobre el concentrador parabólico.



Figura 7.1 Sistema helióstato con concentrador parabólico a las 8:15 h en el día 29 de Agosto a) Helióstato reflejando la luz del Sol hacia el concentrador parabólico, b) incidencia de vector del reflexión *SH* sobre el concentrador parabólico, c) vista trasera del helióstato d) vista lateral del helióstato.



En la Figura 7.2 se presenta el sistema helióstato con concentrador parabólico a las 12:32 h, la posición del movimiento de elevación es de -55.92° mientras para el movimiento de rotación es de 6.28°.



Figura 7.2 Sistema helióstato con concentrador parabólico a las 12:32 h en el día 29 de Agosto a) Helióstato reflejando la luz del Sol hacia el concentrador parabólico, b) incidencia de vector del reflexión *SH* sobre el concentrador parabólico, c) vista trasera del helióstato d) vista lateral del helióstato.

En la Figura 7.3 se presenta el sistema helióstato con concentrador parabólico a las 18:29 h, la posición del movimiento de elevación es de -54.70° mientras para el movimiento de rotación es de 68.64°.



Figura 7.3 Sistema helióstato con concentrador parabólico a las 18:29 h en el día 29 de Agosto a) Helióstato reflejando la luz del Sol hacia el concentrador parabólico, b) incidencia de vector del reflexión *SH* sobre el concentrador parabólico, c) vista trasera del helióstato d) vista lateral del helióstato.

7.2. Repetitividad y exactitud del helióstato automatizado

La Figura 7.4 muestra la incidencia del vector de reflexión sobre el concentrador parabólico a lo largo de una hora en tres horas distintas del día. En pocos instantes de la medición, el vector de reflexión incide fuera del concentrador parabólico; seleccionando los dos vectores incidentes más alejados



entre ellos, se obtiene una repetividad de 1.43 m, por otro lado, la precisión obtenida en estas pruebas es de 0.67 m. por lo que el máximo error angular es de 1.54° tomando la distancia entre el centro del concentrador parabólico y la superficie del espejo del helióstato (26 m) y la incidencia más alejada sobre el centro del concentrador parabólico del vector de reflexión.



Figura 7.4 Simulación del vector de reflexión *SH* sobre el concentrador parabólico comparando los datos medidos contra los calculados a) 8:00 a 9:00 hrs, b) 12 a 13 hrs, c) 18 a 19 hrs.

7.3. Software

Se realiza el programa del control del helióstato en el lenguaje de programación Arduino (basado en C/C++). Se realizan funciones como subrutinas para seccionar el programa (Anexo 1).

 Vector_sol(): esta función tiene la capacidad de calcular la posición del vector de Sol, las variables de salida son el ángulo azimut y el ángulo de elevación solar en grados. La función hace llamar a una función del RTC con la finalidad de conocer la fecha y hora. Como constantes maneja la latitud y la longitud de la localización del helióstato.


- 2) Movimientos_Primarios(c1,c2,c3,L,a_s,y_s,E,D): esta función tiene la capacidad de calcular los ángulos de elevación y rotación del helióstato. Tiene como variables de entrada la posición del Concentrador con respecto al helióstato (c1, c2, c3), la longitud L existente entre el origen de los ejes de elevación y rotación y el centro del espejo maestro (L), el ángulo de elevación (a_s), el ángulo azimut (y_s) y la posición actual de los ángulos de elevación y rotación (E, D).
- 3) Movimientos_Secundarios(c1,c2,c3,L, L1, L2, L3, L4, a_s,y_s,E,D): esta función tiene la capacidad de calcular los ángulos secundarios (4 espejos) del helióstato. Tiene como variables de entrada la posición del Concentrador con respecto al helióstato (c1, c2, c3), la longitud L existente entre el origen de los ejes de elevación y rotación y el centro del espejo maestro (L), la distancia existente entre el centro del espejo maestro y el centro de los espejos esclavos (L1, L2, L3, L4), el ángulo de elevación (a_s), el ángulo azimut(y_s) y la posición precalculada de los ángulos de elevación y rotación (E, D).
- 4) Movimiento_actuadores(): esta función tiene la finalidad de posicionar a los actuadores según los resultados obtenidos en las funciones de cálculo de los movimientos primarios y secundarios, indica la velocidad y sentido de giro de cada uno de los actuadores por separado y monitorea constantemente el estado de los sensores. Se auxilia de la función Leer_Sensores() para conocer la posición de cada uno de los actuadores.
- 5) Leer_Sensores(): esta función se encarga de leer la posición de los sensores de los movimientos primarios y secundarios, tiene implementado un filtro digital para minimizar el error por la lectura que realiza con ADC del Arduino Mega 2560.



Capítulo 8. Conclusiones y trabajo futuro

En el estado del arte existen algoritmos y ecuaciones que pueden solucionar el problema de la posición de los movimientos primarios del helióstato, sin embargo, estos algoritmos desprecian algunas distancias físicas del helióstato debido a que las ecuaciones se obtienen por matrices de rotación que no incluyen desplazamientos ocasionando error en la reflexión y posteriormente se pretende minimizar ese error con uso de variables de ajuste de la reflexión; por lo que la formulación de las ecuaciones en base a la formación de los vectores de incidencia y reflexión basándose en matrices de transformación homogéneas puede resolver el problema sin variables de ajuste y relacionando todas las distancias físicas existente entre el helióstato y el objetivo.

El modelado matemático se resume en la formación de dos ecuaciones no lineales igualadas a cero, las cuales deben resolverse con métodos numéricos, siendo indispensable el uso de un controlador con la capacidad de uso de operaciones matemáticas. En el Capítulo 4 se plantea una metodología de formulación de ecuaciones para un helióstato con los movimientos de seguimiento Rotación – Elevación, sin embargo, esta metodología puede ser implementada en helióstatos con otro par de movimientos, como lo son el Azimut – Elevación, la diferencia radicaría en el planteamiento del eje de acción de cada uno de los movimientos sobre las matrices de trasformación homogéneas.

Tanto la longitud y la latitud geográfica se deben considerar como parámetros de diseño de los helióstatos, debido a que los ángulos solares son afectados por éstos. La longitud geográfica mantienen una relación directa con la hora solar y el ángulo azimutal, afectando la duración del día y a la velocidad de los movimientos de seguimiento, por otro lado, la latitud geográfica afecta a la amplitud del movimiento de elevación debido a que mantiene una relación con el ángulo de elevación solar y éste a su vez cambia su amplitud máxima diaria en relación al día del año.

Debido a que la velocidad del movimiento de rotación y elevación, 4 min/° y 19 min/° respectivamente, son considerablemente lentas, un controlador On-Off puede producir una curva de control sobreamortiguada evitando sobreimpulsos en la posición debido a las bajas velocidades a las que estarán sometidos los movimientos de seguimiento del sistema.

El helióstato automatizado tiene una repetitividad de 1.43 m y una precisión de 0.67 m. Estos valores son relativamente grandes debido a que la parte mecánica del helióstato tiene un juego mecánico muy grande que evita que tenga mayor precisión.

Trabajo futuro

1. La construcción e implementación de un dispositivo que pueda medir la posición del Sol en todo momento, con la finalidad de obtener el ángulo de elevación solar y el ángulo azimut,



debido a que estos son las variables de entrada del sistema, así mismo, evitar depender de las ecuaciones del tiempo que tienen errores de precisión.

- Diseñar un dispositivo que pueda medir la posición del vector de reflexión del helióstato al concentrador, con la finalidad de tener una retroalimentación hacia el controlador y poder corregir errores de posición de los movimientos de seguimiento.
- 3. Realizar estudios de momentos de masa con la finalidad de reducir el torque que necesitan los actuadores para realizar los movimientos de seguimiento primarios.
- Corregir problemas mecánicos sobre los movimientos secundarios con la finalidad de poder implementar un actuador en cada uno de ellos y poder medir la cantidad de radiación reflejada sobre el concentrador parabólico.



Bibliografía

Aiuchi A [y otros] "Sensor - controlled heliostat with an equatorial mount" [Publicación periódica] // Solar Energy 80. - 2006. - págs. 1089-1097.

Balcells Josep y Romeral José Luis Autómatas programables [Libro]. - España : MARCOMBO, 1997.

Barrientos Antonio [y otros] Fundamentos de robótica [Libro]. - Madrid, España : McGraw-Hill, 1997.

Bartelt Terry Industrial Automated Sistem Instrumentation and motion control [Libro]. - New York : Delmar, 2011.

Cárdenas Beatriz INE Memorias del Taller sobre políticas públicas para Mitigar Impacto Ambiental de Ladrilleras Artesanales (Sesión II b. Políticas Públicas sobre producción de ladrillo). - Guanajuato : Instituto Nacional de Ecología, 4 - 6 de Septiembre de 2012.

Castillo Francisco Elias y Sentis Francest Castellví Agrimeteorología [Libro]. - Madrid : Mundi Prensa, 2001.

CENAM Cálculo de densidad [En línea]. - 06 de julio de 2013. - http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx.

Chacón Ruben [y otros] Diseño de un helióstato empleando técnicas computacionales [Publicación periódica] // Ciencia e Ingeniería. - 2011. - págs. 17-22.

Chen Y. T [y otros] Non-Imaging, Focusing Heliostat [Publicación periódica] // Pergamon. - 2001. - págs. 71, 155-164.

Chong K y Tan M. H. Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field [Publicación periódica] // Solar Energy. - May de 2011. - págs. 85, 1837–1850.

CNA Resumen decenal de información sinóptica de superficie [En línea]. - 06 de julio de 2013. - http://smn.cna.gob.mx/observatorios/decenal/rd76625.html.

Collado Francisco J. One-point fitting of the flux density produced by a heliostat [Publicación periódica] // Solar Energy. - 2010. - págs. 84, 673–684.

Daily James. y Donald R Dinámica de los fluidos con aplicaciones en ingeniería [Libro]. - Mexico : Trillas, 1975.

Eicker Ursula Solar technologies for buildings [Libro]. - Stuttgart, Alemania : Wiley, 2011.



Fernández Juan, Durán José y Lage Federico INEGI. Boletín de los Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica Vol. 2. - Septiembre-Diciembre de 2009.

Firoozian Riazollah Servo Motors and Industrial Control Theory [Libro]. - New York, USA : Springer, 2009.

García Jose Luis y Paris Luis Santiago Diseño de un sistema prototipo de conversión de energía solar en potencia mecánica compuesto por un concentrador solar y un motor stirling [Publicación periódica] // LACCEI. - Medellín, : LACCEI, 2011.

Garcia-Badell Jose Javier Cálculo de la energía solar [Libro]. - Madrid, España : INIA, 1983.

Gómez Mayra Soledad Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias. -Huajuapan de León : Universidad Tecnológica de la Mixteca, Diciembre de 2009.

González Jose [y otros] Sistema de tiempo real distribuido para el control de campos de helióstatos [Publicación periódica] // XXV Jornadas de Automática. - 2004.

Guo Minghuan [y otros] Accurate altitude–azimuth tracking angle formulas for a heliostat with mirror– pivot offset and other fixed geometrical errors [Publicación periódica] // Solar Energy. - March de 2011. - págs. 85, 1091–1100.

Guo Minghuan [y otros] Determination of the angular parameters in the general altitude–azimuth tracking angle formulas for a heliostat with a mirror-pivot offset based on experimental tracking data [Publicación periódica] // Solar Energy. - 2012. - págs. 86, 941-950.

Guo Minghuan, Wang Zhifeng y Sun Feihu Simulations of reflected sun beam traces over a target plane for an azimuth–elevation tracking heliostat with fixed geometric error sources [Publicación periódica] // Solar Energy. - 2013. - págs. 97, 102–111.

Hecht Eugene Optics [Libro]. - San Francisco : Addison Wesley, 2002.

Hibbeler Russel Mecánica vectorial para ingenieros. Estática [Libro]. - Atlacomulco : Pearson Eduación, 2004.

Marsden Jerrold E. y Tromba Anthony J. Calculo vectorial [Libro]. - Wilmington, E.U.A. : Addison-Weley Iberoamericana, 1991.

Meinel A.B. Aplicaciones de la energía solar [Libro]. - Barcelona : Reverté, 1982.

Meriam L y Kraige L Mecánica para ingenieros. Dinámica [Libro]. - Barcelona, España : Reverté, 2002.



Moya Adam C. y Ho Clifford K. Modeling and Validation of Heliostat Deformation Due to Static Loading [Publicación periódica] // Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability. - Washington, DC, USA : [s.n.], 2011.

Tapia Ignacio Alta concentración de energía solar en receptor central. Sistema de posicionamiento automático de helióstatos reflectores una tecnología nacional. - Mérida : [s.n.], 2008.

Time and Date [En línea]. - 1995. - 12 de Febrero de 2013. - http://www.timeanddate.com/time/map.

Toncich Dario Computer Architecture and Interfacing to Mechatronic Systems [Libro]. - Australia : Chrystobel Engineering, 1994.

UNAM Instituto de Astronomía. Anuario del Observatorio Astronómico Nacional [Informe]. - México : [s.n.], 2012.

Villeda Muñoz Gabriel Horno solar de alta temperatura para el cocimiento de tabiques de arcilla. -Querétaro : [s.n.], Junio de 2010.

Visioli Antonio Practical PID Control [Libro]. - Italy : Springer, 2006.

Wang Zhifeng. Wu, Zhiyoung. Lui, Xiaobin Wind dynamics testing on Dahan heliostat [Publicación periódica] // Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement. - 2007.

Wei Xiudong [y otros] Ray tracing and simulation for the beam-down solar concentrator [Publicación periódica] // Renewable Energy. - 2012. - págs. 50, 161-167.

Wei Xiudong [y otros] Tracking and ray tracing equations for the target-aligned heliostat for solar tower power plants [Publicación periódica] // Renewable Energy. - 2011. - págs. 36, 2687-2693.

Won Y [y otros] Applied Numerical Methods Using Matlab [Libro]. - Estados Unidos : Wiley, 2005.

Zang Chucheng [y otros] Experimental wind load model for heliostats [Publicación periódica] // Elsevier. - 2012. - págs. 444-448.



Anexo 1

Programa considerado para el control del helióstato para los movimientos primarios.

#include <math.h> #define isnanf isnan #include <Wire.h> // Incluye la librería Wire #include "RTClib.h" RTC_Millis RTC; // Crea el objeto RTC ////-----variables globales-----//// const float pi = 3.14159265358979323846; const float c1= 26, c2=0, c3=-2; // Concentrador // Centro de espejos const float L=0.60; float S1=30, S2=240; // Sol especificaciones S=[as; ys; r][49 a 90; 100 a 245.2;1] float a s=S1*pi/180, y s=S2*pi/180; float D=0, E=-45*pi/180; // Condiciones iniciales de angulos de espejos // float TLT=12: //----- Sensores -----// int S_Elevacion = A0; // Sensor Elevacion int S Rotacion = A1; // Sensor Rotacion float G Elevacion = 0; // Grados Elevacion float G Rotacion = 0; // Grados Rotacion float Posicion E=0; float Posicion D=0; //----- Saberthoot -----// int Sabertooth Primarios = 25; int Velocidad_Elevacion=10; int Velocidad Rotacion=8; /// Filtros Digitales// const int Tam Vector=10; int Lectura Elevacion[Tam Vector]; //Vector de lecturas. int Lectura Rotacion[Tam Vector]; //Vector de lecturas. int Total Elevacion = 0; int Total_Rotacion = 0; //-----Calibracion sensores-----// int Elevacion calibracion=-8 ; int Rotacion_calibracion=12.3;

void setup(){

Serial.begin(9600); // Establece la velocidad de datos del puerto serie Serial1.begin(9600,SERIAL_8N1); Wire.begin(); // Establece la velocidad de datos del bus I2C RTC.begin(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));



```
delay(1000);
 pinMode(Sabertooth Primarios,
                                     OUTPUT);
}
void loop(){
  Vector sol();
  Movimientos_Primarios(c1,c2,c3,L,a_s,y_s,E,D,TLT);
  if (TLT<=6 || TLT>=20){
  }
  else{
    Movimiento actuadores();
  }
  //delay(2000);
}
//----- Movimientos_Primarios -----//
void Movimientos Primarios(float c1 0, float c2 0, float c3 0, float L 0, float a s 0, float y s 0,float
E_0, float D_0,float TLT_0){
  a_s=a_s_0; y_s=y_s_0;
  E=E_0; D=D_0;
  int r=0, control=0;
  while (control==0){
    float a = pow(c3 + L^*cos(D)^*sin(E), 2) + pow(c2 - L^*sin(D)^*sin(E), 2) + pow(c1 - L^*cos(E), 2);
    float p=cos(D)*cos(E)*sin(a_s) + sin(E)*cos(a_s)*cos(y_s) - cos(E)*sin(D)*cos(a_s)*sin(y_s);
    float q=sin(D)*sin(a_s)+cos(D)*cos(a_s)*sin(y_s);
    float der aD=-1/(pow(a,0.5))*L*sin(E)* (c3*sin(D)+c2*cos(D));
    float
                  der_aE=1/(pow(a,0.5))*L*(cos(E)*(c3*cos(D)-c2*sin(D))+L*sin(E)*cos(E)+sin(E)*(c1-
L^{*}cos(E));
    float F2=q^{pow}(a,0.5)+c2^{cos}(D)+c3^{sin}(D);
    float
                         DER F2 D=(cos(D)*sin(a s)-sin(D)*cos(a s)*sin(y s))*pow(a,0.5)+q*der aD-
c2*sin(D)+c3*cos(D);
    float DER_F2_E=q*der_aE;
    float F1=p^{pow}(a,0.5)-c2^{sin}(D)^{cos}(E)+c3^{cos}(D)^{cos}(E)+sin}(E)^{c1};
    float DER_F1_D= -\cos(E)*pow(a,0.5)*(sin(D)*sin(a_s) + cos(D)*cos(a_s)*sin(y_s)) + p*der_aD-
\cos(E)^{*}(c2^{*}\cos(D) + c3^{*}\sin(D));
    float
              DER F1 E=pow(a,0.5)*(-cos(D)*sin(E)*sin(a s)
                                                                 +
                                                                       \cos(E)^*\cos(a s)^*\cos(y s)
                                                                                                    +
sin(E)*sin(D)*cos(a s)*sin(y s)) + p*der aE+sin(E)*(c2*sin(D) - c3*cos(D)) + c1*cos(E);
    float Det=DER F1 D*DER F2 E-DER F1 E*DER F2 D;
    float DM= D - (F1*DER F2 E-F2*DER F1 E)/Det;
    float EM= E - (-F1*DER_F2_D+F2*DER_F1_D)/Det;
    float R=abs(E-EM), RR=abs(D-DM);
    if (R<0.001 && RR<0.001){
       control=10;
     }
    r++;
    E=EM;
```



```
D=DM:
  }
  // Modification de posicion en radianes E
  float Control E=0;
  if(E<-2*pi || E>2*pi ){E =E-trunc(E/(2*pi))*2*pi;}
  if(E == 2*pi || E == -2*pi){E=0; Control E=1;}
  if(E > pi && E < 2*pi && Control E==0){E=E-2*pi; Control E=1; }
  if(E<- pi && E < -2*pi && Control E==0){E=E+2*pi; Control E=1; }
  float Control D=0;
  if(D<-2*pi || D>2*pi ){ D=D-trunc(D/(2*pi))*2*pi; }
  if(D == 2*pi || D == -2*pi){ D=0; Control D=1; }
  if(D > pi && D < 2*pi && Control D==0){ D=D-2*pi; Control D=1; }
  if(D<- pi && D < -2*pi && Control D==0){D=D+2*pi; Control D=1;}
  if (TLT 0 >= 12){
    if (D <-0){D =D+pi;}
  if (D <-0 && D >-pi){D =D+pi; }
   }
  if (TLT_0 < 12){
    if (D >-0 && D <pi){D =D-pi; }
    if (D < -pi){D=D+pi; }
    if (D < -pi*130/180){ D=D+pi; }
    }
  if (TLT_0 >= 12){
    if (D > pi*130/180){ D=D-pi; }
   }
  if (E>0){ E=-E;}
  if (E<-1){E=-(E+pi); }
  if (E>0){ E=-E;}
  if (E<-1){ E=-(E+pi);}
}
//----- Calculo_vector_sol-----//
void Vector sol(){
  float Declinacion; // Declinacion
  float E tiempo; // Ecuacion de tiempo
  float B;
               // Constante B
  int n;
               float W;
               // Angulo horario en horas obtiene grados
               // Correccion de longitud
  float Lc;
  float Longitud; // Longitud de Queretaro Cicata -100°22.264'
  float Latitud; // Latitud de Queretaro Cicata 20° 34.532'
  float CET;
                // Central european time 6 horas a mi reloj MOdificar hora
  // Ecuaciones //
  DateTime now = RTC.now(); // Obtiene la fecha y hora del RTC
  int mes=now.month();
  int dia=now.day();
  float hora=now.hour();
  float minuto=now.minute();
```



```
float segundo=now.second();
  minuto=minuto-6; //Compesar minutos de mi rtc
  if (minuto>=60){ minuto=minuto-60;}
  hora=hora+minuto/60+segundo/60/60;
                                          //Compesar horas de mi rtc
  //CET=hora+6;
  CET=hora+5; // Error del RTC con CET
  if (mes==1){n=0}
  if (mes==2){n=31;}
  if (mes==3){n=59;}
  if (mes==4){n=90;}
  if (mes==5){n=120;}
  if (mes==6){n=151;}
  if (mes==7){n=181;}
  if (mes==8){n=212;}
  if (mes==9){n=243;}
  if (mes==10){n=273;}
  if (mes==11){n=304;}
  if (mes==12){n=334;}
  n=n+dia;
  Longitud=(360-100+22.264/60)*pi/180;
  Latitud=(20+34.532/60)*pi/180;
  B=360*(n-1)/365*pi/180;
  Declinacion=pi/180*(23.45*sin(pi/180*(360*(284+n)/365)));
  //Declinacion=(0.006918-0.399912*cos(B)+0.070257*sin(B)-
0.006758*cos(2*B)+0.000907*sin(2*B)-0.002697*cos(3*B)+0.00148*sin(3*B));
  E tiempo=229.2*(0.000075+0.001868*cos(B)-0.032077*sin(B)-0.014615*cos(2*B)-
0.040849*sin(2*B));
  Lc=Longitud*180/pi*24/360; // °/(h*min/h)
  Lc=24-Lc;
  TLT=CET-Lc+E_tiempo/60;
  //TLT=TLT-1;
  if (TLT>=24){TLT=TLT-24;}
  // TLT=CET+E tiempo;
  W=(TLT-12)*pi/12;
                         // (h)°/h
  a_s=asin(sin(Declinacion)*sin(Latitud)+cos(Declinacion)*cos(Latitud)*cos(W));
  if (TLT<=12){
    y_s=180-180/pi*acos((sin(a_s)*sin(Latitud)-sin(Declinacion))/(cos(a_s)*cos(Latitud)));
  }
  else{
    y_s=180+180/pi*acos((sin(a_s)*sin(Latitud)-sin(Declinacion))/(cos(a_s)*cos(Latitud)));
  }
  y_s=y_s-(6+7/60); //azimut corregido ojo
  y_s=y_s*pi/180;
}
//----- Lectura de sensores-----//
void Leer Sensores(){
```



```
int i=1:
 while (i<=Tam Vector){
  Total Elevacion=Total Elevacion-Lectura Elevacion[i];
  Total Rotacion=Total Rotacion-Lectura Rotacion[i];
  Lectura Elevacion[i] = analogRead(S Elevacion);
  Lectura Rotacion[i] = analogRead(S Rotacion);
  Total Elevacion = Total Elevacion+Lectura Elevacion[i];
  Total Rotacion = Total Rotacion+Lectura Rotacion[i];
  i=i+1;
  if (i >= Tam Vector){
   G Elevacion = Total Elevacion/Tam Vector;
   G Rotacion = Total Rotacion/Tam Vector;
   G_Elevacion = G_Elevacion * (359.00/1023.00);
   G Rotacion = G Rotacion * (359.00/1023.00);
   //G Elevacion=-abs(G Elevacion)-15;
   G Elevacion=-abs(G Elevacion)+Elevacion calibracion;
   G_Rotacion=(G_Rotacion-180)+Rotacion_calibracion;
   Serial.print(TLT);
                        Serial.print(" ");
   Serial.print(Posicion E); Serial.print(" ");
   Serial.print(G Elevacion); Serial.print(" ");
   Serial.print(Posicion_D); Serial.print(" ");
   Serial.print(G Rotacion); Serial.print(" ");
    int a_ss=a_s*180/pi;
    int y_ss=y_s*180/pi;
   Serial.print(a_ss); Serial.print(" ");
   Serial.println(y ss);
   i=100;
   }
 }
}
//-----Movimiento actuadores-----//
void Movimiento actuadores(){
// Left Motor = 1 to 127 (Full Rev = 1, Stop = 64, Full Fwd = 127)
// Right Motor = 128 to 255 (Full Rev = 128, Stop = 192, Full Fwd = 255)
// Sabertooth Dip Switches, 1, 3 & 6 set ON (Mode 3, 38,400 Baud Simple Serial)
// 1 to 127 -> control motor 1 64 stop
 // 128 to 255 -> control motor 2 192 stop
 Posicion E=E*180/pi;
 Posicion_D=D*180/pi;
float Diferencia=0;
float Diferencia_Ref=0;
int Control Movimientos=0;
int Giro=0;
 int Mot1 Der=64+Velocidad Elevacion;
 int Mot1 Izq=64-Velocidad Elevacion;
 int Mot1 Stop=64;
```



```
int Mot2_Der=192-Velocidad_Rotacion;
int Mot2_Izq=192+Velocidad_Rotacion;
int Mot2 Stop=192;
float Resolucion=1.5*360/1024;
//-----Movimiento Elevacion-----//
Diferencia=0;
Diferencia_Ref=0;
Control Movimientos=0;
Giro=0;
while (Control Movimientos==0){
if (Posicion E>=-80 && Posicion E<=-35){ //57
  digitalWrite(Sabertooth Primarios, HIGH);
  Leer Sensores();
  if (G Elevacion <= Posicion E){
   Giro=1;
  }
  else{
   Giro=2;
  }
  Diferencia = abs(G Elevacion - Posicion E);
  if (Diferencia <= abs(Resolucion)){
   Serial1.write(Mot1_Stop);
   Control_Movimientos=1;
   Giro=5;
  }
  else{
   if (Giro == 1){
    Serial1.write(Mot1_Der);
   }
   if (Giro == 2){
    Serial1.write(Mot1_lzq);
   }
  }
   delay(100);
   Control_Movimientos=1;
  }
 else{
 Control Movimientos=1;
 }
}
//-----Movimiento_rotacion-----//
Diferencia=0;
Diferencia Ref=0;
Control_Movimientos=0;
Giro=0:
while (Control Movimientos==0){
if (Posicion D>=-70 && Posicion D<=70){
```



```
digitalWrite(Sabertooth_Primarios, HIGH);
  Leer_Sensores();
  if (G_Rotacion <= Posicion_D){</pre>
   Giro=1;
  }
  else{
   Giro=2;
  }
  if (G_Rotacion>17){
   Mot2_lzq=Mot2_lzq+7;
  }
  if (G_Rotacion<-18){
   Mot2_Der=Mot2_Der-7;
  }
  Diferencia = abs(G_Rotacion - Posicion_D);
  if ( Diferencia <= Resolucion){</pre>
   Serial1.write(Mot2_Stop);
   Control_Movimientos=1;
  }
  else{
   if (Giro == 1){
    Serial1.write(Mot2_Der);
   }
   if (Giro == 2){
    Serial1.write(Mot2_Izq);
   }
  }
   delay(100);
   Control_Movimientos=1;
 }
 else{
  Control_Movimientos=1;
 }
}
```

}