

TESIS

“AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL PARA CAMPO DE HELIÓTATOS”

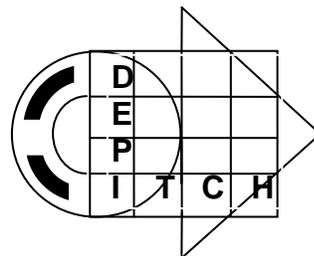
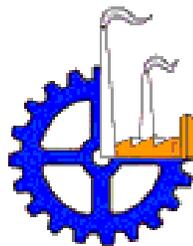
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

CUITLÁHUAC IRIARTE CORNEJO

DIRECTOR DE TESIS: DR. JAVIER VEGA PINEDA
CODIRECTOR DE TESIS: DR. RAFAEL ENRIQUE CABANILLAS LÓPEZ

**Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación**



CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO, ABRIL 2013

PERMISO DE IMPRESIÓN

REVISIÓN DEL COMITÉ DE TESIS

DEDICATORIA

Antes que nada quiero agradecer a mi compañera de vida y esposa Sara Irene, por su comprensión y por los momentos de desvelo en la conclusión de esta etapa de mi vida.

Este documento se lo dedico con especial cariño a mi familia a mi esposa Sara Irene y a mis hijos Alejandro y Briseis Victoria, para ellos y por ellos.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mi maestro y amigo el Dr. Javier Vega Pineda por su apoyo incondicional y su paciencia.

Un especial agradecimiento a los investigadores Dr. Camilo A. Arancibia Bulnes y Dr. Rafael E. Cabanillas López, por sus consejos y su guía es, que fue posible la conclusión de este trabajo de Tesis.

Agradecer al CONACyT por su apoyo al proyecto LN-123767, que complementó una segunda etapa en el desarrollo del “Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar” (LACYQS), proyecto cabalmente dirigido por el Dr. Claudio A. Estrada Gasca.

A todos mis profesores, por sus conocimientos y por haber sembrado en mí la semilla de la investigación.

A mis compañeros de asoleadas en el Campo de Pruebas, Rodolfo Peón y Pablo Sosa.

RESUMEN

AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL PARA CAMPO DE HELIÓSTATOS

Cuitláhuac Iriarte Cornejo

Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica
División de Estudios de Posgrado e Investigación del
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Chihuahua, Chih., 2013

Director: Dr. Javier Vega Pineda

Codirector: Dr. Rafael Enrique Cabanillas López

En una planta de concentración solar para generación de energía eléctrica del tipo torre central, se requiere de un gran conocimiento de la trayectoria solar y por supuesto de un cálculo muy preciso de la misma. Lo anterior debido a que el equipo requerido para realizar la concentración solar denominado Helióstato para su correcta operación requiere precisiones de alrededor de 0.1 grados o menores de arco angular. Sin embargo, la complejidad del problema no solo radica en la precisión necesaria, también requiere que el sistema sea implementado a un bajo costo debido a que una planta regularmente cuenta con miles de heliostatos. Para poder alcanzar estos requerimientos es necesaria la instalación de sensores de posición, monitoreo de variables ambientales, un sistema de retroalimentación por visión artificial, y un trabajo extenso en el desarrollo del software de control para el procesamiento de toda esa información y la toma de decisiones. Esto implica toda una gama de problemáticas a resolver, desde la adquisición de datos ambientales, control de motores de potencia, alineamiento de mecanismos, cálculos vectoriales de posición solar y heliostático, así como de procesamiento de imágenes para retroalimentación de imagen solar.

En el presente trabajo de tesis se muestra un esquema completo y bastante específico de solución a muchos de los problemas presentados en la automatización de una planta de torre central, así como de las variables necesarias para la correcta operación de los heliostatos. Además, se presenta un esquema de retroalimentación fuera de línea (*offline*) que cumple con los requerimientos para mantener una eficiencia del 100% en el funcionamiento de heliostatos, compensando el problema de “deriva” de imagen solar, al menos por 7 días continuos de operación.

El sistema de control del Campo de Pruebas de Heliostatos está en funcionamiento en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Es un proyecto de investigación solar creado por el Centro de Investigación en Energía (CIE) y la Universidad de Sonora (UNISON).

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.1.1 Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH)	2
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivo	4
1.4 Objetivos Específicos	4
1.5 Metodología	5
1.6 Presentación de la tesis	6
CAPÍTULO II. LA ENERGÍA SOLAR	7
2.1 Tecnologías Solares	8
2.1.1 Fotovoltaicos	9
2.1.2 Fototérmicas	10
2.1.3 Calentadores Solares	11
2.2 Sistemas de Concentración Solar y Generadoras de Potencia Eléctrica	12
2.2.1 Canal Parabólico	12
2.2.2 Fresnel	13
2.2.3 Disco Parabólico	13
2.2.4 Torre Central	14
2.2.5 Tecnología de Receptor Central (CRS)	14
2.3 Plantas de Torre Central o de Receptor Central Demostrativas y Comerciales	16
2.4 LACYQS	19
2.4.1 Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH)	19
CAPÍTULO III. MEDICIONES SOL-TIERRA Y HELIÓSTATOS	21
3.1 Posición Solar	21
3.1.1 Declinación Solar	22
3.1.2 Ecuación de Tiempo	24
3.2 Ángulos Solares de Posicionamiento	26
3.2.1 Vector Solar	28
3.3 Seguimiento Solar (<i>Solar Tracking</i>)	29
3.3.1 Montura Ecuatorial	29
3.3.2 Montura Acimutal	30
3.4 Algoritmos de Trayectoria Solar	30
3.5 Teoría de Operación de un Helióstatos	31
CAPÍTULO IV. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	34
4.1 Blanco de Pruebas Térmicas	35
4.2 Estación Solarimétrica	35
4.3 Horno Solar	36
4.4 Blanco Lambertiano	36
4.5 Sistema de Visión Artificial	36
4.6 Campo de Helióstatos	38

4.6.1 Helióstatos UNAM-36-A	40
4.6.1.1 Sistema Controlador en Helióstatos	40
4.6.1.2 Cabezal Articulado	43
4.6.1.3 Estructura Tubular para Encamado de Facetas	44
4.7 Laboratorio de Control	45
4.8 Red de Comunicación en Campo	46
CAPÍTULO V. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL SISTEMA SCADA	48
5.1 Linealización del Ángulo de Elevación	48
5.2 Apuntamiento del Helióstatos UNAM-36-A	50
5.2.1 Resolución de Ecuaciones Vectoriales	51
5.2.2 Método Iterativo	55
5.3 Sistema de Control Supervisorio (SCADA)	58
5.3.1 SCADA Central	59
5.3.2 Programa Remoto en cRIO	62
5.4 Estación Solarimétrica	63
5.4.1 Variables y Configuración de Entradas	65
5.4.2 Desarrollo del Sistema	66
5.5 Sistema de Visión Artificial para Retroalimentación	69
5.5.1 Procesamiento de Imágenes	70
5.5.1.1 Obtención y Calibración de la Imagen Maestra	71
5.5.1.2 Centroide de Imagen Solar Concentrada	73
CAPÍTULO VI. PRUEBAS Y RESULTADOS	76
6.1 Sistema Principal SCADA	76
6.2 Estación Solarimétrica	80
6.3 Visión Artificial	82
6.4 Curvas de Deriva	85
6.5 Corrección de Deriva	87
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES	92
7.1 Mejoras Programadas a la Conclusión de este Trabajo	93
VIII. REFERENCIAS	94

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Figura 1.1 Proyecto Arquitectónico (vista frontal). 3

CAPÍTULO II. LA ENERGÍA SOLAR

Figura 2.1 Radiación absorbida por atmósfera y radiación directa y difusa. 7

Figura 2.2 Radiación anual promedio en el Planeta, Fuente: www.nasa.gov. 8

Figura 2.3 Radiación directa por día en México, Fuente: www.nrel.gov/gis. 9

Figura 2.4 Celda fotovoltaica individual y arreglo. 9

Figura 2.5 Diagrama a bloques de conversión fototérmica. 11

Figura 2.6 Calentadores solares. 11

Figura 2.7 Cilindro Parabólico esquema y planta en operación. 13

Figura 2.8 Fresnel CSP esquema y planta en operación. 13

Figura 2.9 Disco Parabólico esquema y planta en operación. 14

Figura 2.10 Esquema de planta con Receptor Central de Potencia. 15

Figura 2.11 Planta Solar One, Barstow CA, USA. 17

Figura 2.12 Planta PS10 superior y Planta PS20 inferior, Andalucía, España. 18

Figura 2.13 Planta Gemasolar de la empresa Torresol Energy, Fuentes de Andalucía, España. 18

Figura 2.14 Planta Ivanpah Solar, California, EEUU (en construcción). 19

Figura 2.15 Campo de Pruebas de Helióstatos (norte). 20

CAPÍTULO III. MEDICIONES SOL-TIERRA Y HELIÓSTATOS

Figura 3.1 Orbita de la Tierra alrededor del Sol. 21

Figura 3.2 Dimensiones de la Tierra y el Sol. 22

Figura 3.3 Ángulos en diferentes estaciones. 22

Figura 3.4 Variación de la trayectoria del sol con las estaciones del año. 23

Figura 3.5 Declinación solar y trópicos 24

Figura 3.6 Declinación Solar a lo largo del año. 24

Figura 3.7 Husos Horarios. 25

Figura 3.8 Comportamiento del día solar a lo largo de un año. 26

Figura 3.9 Corrección por latitud local y declinación. 27

Figura 3.10 Ángulos solares por Ángulo horario, Declinación y Latitud. 27

Figura 3.11 Ángulos Cenital, Azimutal y Altura Solar. 28

Figura 3.12 Ejes y Vector Unitario Solar. 29

Figura 3.13 Montura Ecuatorial. 29

Figura 3.14 Montura Ecuatorial para telescopio. 29

Figura 3.15 Montura Azimutal. 30

Figura 3.16 Montura Azimutal para telescopio 30

Figura 3.17 Bisectriz de apuntamiento del helióstato. 32

Figura 3.18 Ángulos de control de superficie reflectante. 33

CAPÍTULO IV. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Figura 4.1 Torre Central. 34

Figura 4.2 Cámara de Allied Vision Technologies Pike F-032.	37
Figura 4.3 CVS-1454 de National Instruments.	37
Figura 4.4 Distribución del campo de helióstatos.	38
Figura 4.5 Enumeración de helióstatos.	39
Figura 4.6 Diagrama de bloques de los elementos de control del helióstato.	42
Figura 4.7 Cabezal Helióstato UNAM-36-A.	44
Figura 4.8 Normales de cada faceta en un helióstato canteado.	45
Figura 4.9 Esquema de comunicación en campo.	47

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL SISTEMA SCADA

Figura 5.1 Diagrama de configuración de elevación DS900.	49
Figura 5.2 Valores de p in versus α_h grados.	50
Figura 5.3 Elementos involucrados en el análisis de apuntamiento del helióstato DS-900 UNAM.	51
Figura 5.4 Vectores de rotación R1 y R2 para helióstato DS-900 UNAM.	51
Figura 5.5 Cálculo básico de bisectriz del Helióstato UNAM-36-A.	56
Figura 5.6 Convergencia del método iterativo.	57
Figura 5.7 Arquitectura de comunicación continua.	58
Figura 5.8 Diagrama de flujo SCADA.	60
Figura 5.9 Ejes de coordenadas en campo de helióstatos.	61
Figura 5.10 Diagrama de flujo del programa remoto en cRIO.	64
Figura 5.11 Diagrama de Flujo de servidor en Estación Solarimétrica.	67
Figura 5.12 Periodo de señal de velocidad de viento.	67
Figura 5.13 Diagrama de trazado de rayos solares para la captura de imagen.	69
Figura 5.14 Diagrama de flujo de los procesos del sistema de visión.	71
Figura 5.15 Secuencia para la obtención de la imagen Maestra.	72
Figura 5.16 Diagrama de flujo procesamiento de imagen.	73
Figura 5.17 Secuencia del proceso de análisis de la imagen.	74

CAPÍTULO VI. PRUEBAS Y RESULTADOS

Figura 6.1 Sistema SCADA principal en operación.	77
Figura 6.2 Panel de Control.	77
Figura 6.3 Instrumento virtual "Configuración".	78
Figura 6.4 Selección de Helióstatos.	78
Figura 6.5 Control de helióstato (tiempo real).	79
Figura 6.6 Objetivos Individuales.	80
Figura 6.7 Estación Solarimétrica.	81
Figura 6.8 Archivos de Estación Solarimétrica vía FTP.	81
Figura 6.9 Archivo de texto Estación Solarimétrica.	82
Figura 6.10 Radiación Directa y Global de un día completo.	82
Figura 6.11 Velocidad Máxima y Promedio de viento.	83
Figura 6.12 Valores del centroide (X, Y).	83
Figura 6.13 Desplazamientos del centroide X y Y con respecto al tiempo.	84
Figura 6.14 Desplazamiento del centroide (X, Y) en "Blanco Lambertiano".	84
Figura 6.15 Datos del centroide y evaluación del polinomio.	87

Figura 6.16 Eje X para el centroide de 10 helióstatos.	89
Figura 6.17 Eje Y para el centroide de 10 helióstatos.	89
Figura 6.18 Valores X, Y corrección de deriva.	91

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO IV. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla 4.1 Configuración de helióstatos y tipos de motores.	42
Tabla 4.2 Segmentación del Campo de Helióstatos por cada cRIO.	43
Tabla 4.3 Características del sistema principal de control y del sistema de visión.	45

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL SISTEMA SCADA

Tabla 5.1 Eventos de control del sistema SCADA central.	61
Tabla 5.2 Conexión de los sensores solarimétricos a las tarjetas de entrada.	65

CAPÍTULO VI. PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 6.1 Coeficientes de deriva de los helióstatos.	90
Tabla 6.2 Valores de deriva máximo y mínimo de los helióstatos, todos los valores en cm.	90
Tabla 6.3 Valores del centroide para cada helióstato, todos los valores en cm.	91

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La humanidad ha tenido gran desarrollo debido a diferentes factores como son la alimentación, la generalización de la higiene, la sanidad, la difusión de medicamentos y en general el desarrollo de la tecnología han sido decisivos para el fuerte crecimiento de la población mundial, que ha pasado de los casi 1,000 millones en el año 1800 a más de 6,000 millones en el 2000 y a unos 7,000 millones a finales de 2011.

Para poder abastecer a toda esta población de todos los servicios necesarios para su subsistencia, hemos recurrido a diferentes fuentes de energía, la más utilizada en tiempos recientes es la proveniente de los combustibles fósiles, como lo son el gas natural, el petróleo y el carbón mineral, también conocidos como Hidrocarburos líquidos y sólidos. Debido principalmente a su facilidad de producción y a su alto contenido energético liberado por combustión de la materia prima.

Esta combustión de hidrocarburos libera altos contenidos de contaminantes atmosféricos que reducen drásticamente la calidad de vida de las personas, así como problemas de efecto invernadero para la población mundial.

Otro problema con los hidrocarburos es que no son renovables, tendrían que pasar millones de años para que se pudieran producir de forma natural las cantidades que hasta el día de hoy hemos consumido.

Por lo que se deben desarrollar plantas alternas de generación de electricidad, ya que al haber escasez de combustibles, estos se encarecerán y no será práctico su uso para la generación de energía eléctrica. Existen diferentes fuentes de energía disponibles en la actualidad como lo son la Nuclear, Hidroeléctrica, Solar, Viento y Geotérmica.

Dentro del aprovechamiento de la energía solar en la conversión a energía eléctrica, existen dos procesos básicos: La Fotovoltaica y la Termosolar, con sus ventajas y desventajas, algunas de las ventajas de la conversión Termosolar, es el almacenamiento de la energía para su posterior conversión en energía eléctrica cuando realmente se necesita, aún y cuando no se tiene luz de sol y la eficiencia de conversión ronda sobre el 30%.

Los sistemas Termosolares se clasifican por su nivel de temperatura. La eficiencia de Carnot nos muestra que a mayor temperatura de operación tendremos una mejor eficiencia de

conversión. Tenemos como líder de estas tecnologías en eficiencia la conversión por medio de torre central que necesita un conjunto de helióstatos para la alta concentración solar y en consecuencia la alta temperatura de operación. La eficiencia de los niveles de concentración solar dependen de varios factores, de los principales se pueden comentar: La cantidad de helióstatos en el campo, el canteo, la limpieza de espejos y el buen funcionamiento del seguimiento solar de los helióstatos.

El trabajo descrito en este documento tiene la función de garantizar el correcto funcionamiento del sistema de seguimiento del campo de helióstatos basado en retroalimentación por medio de visión artificial, para obtener la concentración solar dentro de los límites de operación.

1.1 Antecedentes

El Laboratorio Nacional de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS), tuvo su génesis de forma académica por parte de la Universidad Autónoma de México a través del Centro de Investigación en Energía (CIE), la Universidad de Sonora (UNISON) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), dirigidos por el Dr. Claudio A. Estrada (UNAM), Dr. Rafael Cabanillas (UNISON) y el Dr. Sergio Vázquez (INAOE) en sus respectivas instituciones. Teniendo como objetivo la realización de varios subproyectos dentro de LACYQS:

- Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR).
- Planta Fotocatalítica para el Tratamiento de Aguas Residuales (PFTAR).
- Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH).

1.1.1 Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH)

El CPH permitirá iniciar las investigaciones científicas y tecnológicas de los sistemas termosolares de potencia eléctrica basados en la arquitectura de torre central. Los principales objetivos de la creación del CPH son:

- Impulsar la formación de una red nacional de investigadores que trabajen en el

desarrollo de la tecnología de concentración solar.

- Formar recursos humanos de alto nivel en el área de concentración solar y química solar.
- Avanzar en el desarrollo de las tecnologías solares, generando conocimiento científico y tecnológico.

El CPH es el primer proyecto de un Sistema de Concentración Solar de Potencia (CSP) de torre central realizado en toda Latinoamérica, inaugurado el día 28 de octubre de 2011, cuenta con 13 helióstatos concentradores de 36 m², uno de 3 m² y 1 *cluster* de 9 mini-helióstatos, una torre central de 36 metros de altura, cuarto de control y laboratorio electrónico, el proyecto arquitectónico se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1 Proyecto Arquitectónico (vista frontal).

Se generará información para el análisis de costos, mantenimiento, rediseño tanto del campo, de la torre y de los helióstatos para la energía del futuro en base a procesos renovables y sin la contaminación generada por la quema de combustibles. El proyecto se divide en tres etapas:

1. Instalación de infraestructura: Cuarto de control, torre concentradora, tendido eléctrico, sistema de comunicaciones, adecuación de terreno y los primeros 15 helióstatos.
2. Incrementar el campo de helióstatos de 15 a 80 y realizar las pruebas de control de seguimiento solar, con la instalación de instrumentación y un colector solar.
3. Producción de energía eléctrica y su interconexión con las líneas de Comisión Federal

de Electricidad.

Para la primera etapa, el control del campo de helióstatos se realiza con equipo de la marca National Instruments con hardware Compact Rio (cRIO) y la plataforma de desarrollo de software LabVIEW, con un sistema de control supervisorio y adquisición de datos (SCADA) implementado inicialmente para el proyecto del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR).

1.2 Justificación

El proyecto LACYQS, presenta grandes retos tecnológicos, desde la captura de información solarimétrica, hasta la generación de energía eléctrica. Pasando por toda una serie de problemáticas a solucionar, este trabajo tiene como fin la solución de algunos de los problemas presentes tanto para subproyectos de experimentación y captura de datos mediante instrumentación virtual, así como la precisión en el control del posicionamiento heliostático para una eficiencia aceptable de concentración solar, mediante el uso y desarrollo de algoritmos visión artificial, así como metodología para la aplicación de retroalimentación en el sistema de control del campo de helióstatos.

1.3 Objetivo

Automatización de variables solarimétricas y visión artificial, y control offline de Helióstatos.

1.4 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del trabajo de tesis son los siguientes:

- Desarrollo de un sistema adquirente de datos solarimétricos.
- Desarrollo de metodología para conversión trigonométrica de posición angular.
- Formalización de método iterativo de ecuaciones de apuntamiento del Helióstato.

- Desarrollo de metodología de retroalimentación fuera de línea (*offline*) para corrección de deriva.

1.5 Metodología

La metodología de control de un campo de heliostatos típicamente se basa en un sistema de ecuaciones que calculan de forma muy precisa la posición del sol, dependiendo de la fecha-hora y posición geográfica del campo mismo (latitud y longitud).

Una vez obtenida la posición solar se calcula la posición angular (acimut y elevación) dependiendo del objetivo que debe tener cada heliostato en base a la geometría en la instalación del campo de heliostatos. Con el objetivo obtenido se utilizan métodos de control convencionales típicamente Proporcional, Integral y Derivativo (PID), para posicionar el heliostato en las coordenadas objetivo encontradas. Regularmente el control PID realiza un trabajo excelente posicionando el heliostato en las coordenadas antes definidas. Si todo el proceso descrito fuera perfecto, el resultado esperado sería una *imagen solar* en el centro del blanco en la torre, pero prácticamente esto sucede pocas veces, por lo que es necesario realizar una corrección de objetivo agregando un *offset* al mismo y centrar la *imagen solar* en el objetivo seleccionado.

Uno de los inconvenientes de esa corrección es que solo funciona por un corto período de tiempo, dependiendo del grado de “error” en ese heliostato. Este “error” se puede deber a uno o a múltiples factores, como son:

- Instalación de la base del heliostato desnivelada.
- Mala alineación del norte geográfico del heliostato.
- Mala sincronía en el reloj base para el cálculo de la posición solar.
- Estrés estructural de la montura de los espejos del heliostato.
- Ráfagas de viento que mueven la tolerancia mecánica del heliostato.
- Mal canteo de espejos.

Todos estos factores pudieran modelarse y obtener las ecuaciones características de cada uno de los heliostatos y así tener un sistema funcional dentro de nuestros requerimientos, pero

sería un costo demasiado alto debido a que este tipo de plantas cuentan regularmente con cientos o miles de helióstatos. Otra opción es realizar una corrección de *offset* de forma periódica cuando se obtenga *deriva* en la posición objetivo deseada, pero, para realizar una corrección es necesario primeramente conocer cuál es el error de posición que se tiene, por lo que se tiene sacar el helióstato de operación para analizar el “*error*” y *retroalimentarlo* a la posición en forma de *offset* pero inverso. Esto puede ser caracterizado a lo largo del día e irlo aplicando al día siguiente esperando obtener menor *error* y estar dentro de los límites tolerados de *deriva*, garantizando así una eficiencia de concentración solar deseada.

1.6 Presentación de la Tesis

En el capítulo II se presentan sistemas o esquemas relacionados con la utilización de la energía solar para su aprovechamiento en la generación de energía. Los elementos métricos sol-tierra utilizados en el diseño y control de posicionamiento de los helióstatos se presentan en el capítulo III. Los elementos y componentes que forman y acompañan a los helióstatos en la planta del sistema se describen en el capítulo IV. El control supervisorio desarrollado como un sistema SCADA en tiempo real para los helióstatos se desarrolla en el capítulo V. Las pruebas y resultados obtenidos en la implementación del control y otros elementos están descritos en el capítulo VI. Por último, en el capítulo VII se presentan las conclusiones de la tesis.

CAPÍTULO II. LA ENERGÍA SOLAR

El Sol es la fuente de energía que ha sido capaz de desarrollar y mantener vida en nuestro planeta. Se estima que el Sol se creó hace unos 4,570 millones de años y el tiempo de vida para una estrella de su tipo será de otros 5,000 millones de años, por lo que actualmente se encuentra en la mitad de su existencia.

El Sol cuenta con una temperatura efectiva de radiación de 5,777 °K, la temperatura en las regiones centrales se encuentran entre 8,000,000 a 40,000,000 °K y la densidad estimada es cerca de 100 veces la del agua.

El Sol es un reactor de fusión termonuclear continuo transformando átomos de hidrógeno en átomos de helio. Esta reacción libera una gran cantidad de energía en forma de radiación, parte de la cual llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas. Sin embargo esta radiación no es la que se recibe en la superficie terrestre, debido a la atenuación de la atmósfera, principalmente a la capa de ozono que absorbe gran parte de la luz ultravioleta y la ionósfera que absorbe una gran cantidad de rayos gama y rayos x.

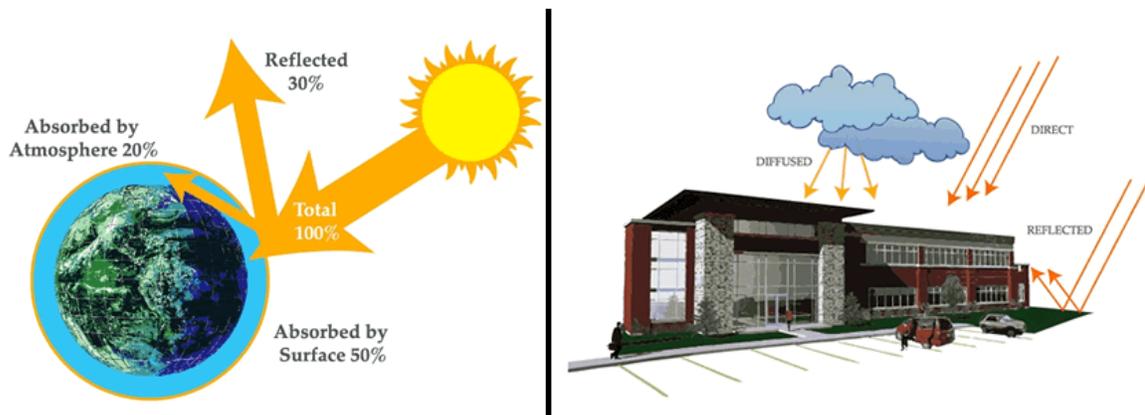


Figura 2.1 Radiación absorbida por atmósfera y radiación directa y difusa.

En la superficie impactan principalmente dos tipos de radiaciones que son la radiación directa, aquella que no alcanza a ser absorbida ni dispersada por los elementos atmosféricos y la radiación difusa (figura 2.1), aquella que sufre de múltiples reflexiones y refracciones en la atmósfera y finalmente es recibida en la capa terrestre, también es la responsable que tengamos una vista multicolor del cielo [1].

Dependiendo de las condiciones atmosféricas y meteorológicas en la superficie terrestre, se registra una intensidad variable de esta radiación solar a lo largo del globo terráqueo, que también es afectada por el ángulo con el que incide, esto es, en la parte cercana a el Ecuador el ángulo de incidencia es casi cero, mientras que cerca de los polos sería de casi 90 grados. Por lo que se tienen zonas que reciben gran cantidad de energía, mientras que otras la reciben en menor cantidad. La figura 2.2, muestra la radiación anual promedio en el mundo.

Esta radiación solar incidente se le conoce como “irradiancia” y su unidad de medición son los W/m^2 [1]. En los Estados Unidos Mexicanos, se concentra la mayor parte de esta irradiación solar en la zona noroeste, específicamente en el desierto de Sonora, Baja California y Chihuahua también mostrados en la figura 2.3. Sus condiciones meteorológicas ayudan a tener una gran cantidad de energía solar directa, situada entre las zonas privilegiadas para la obtención de energía solar a nivel mundial.

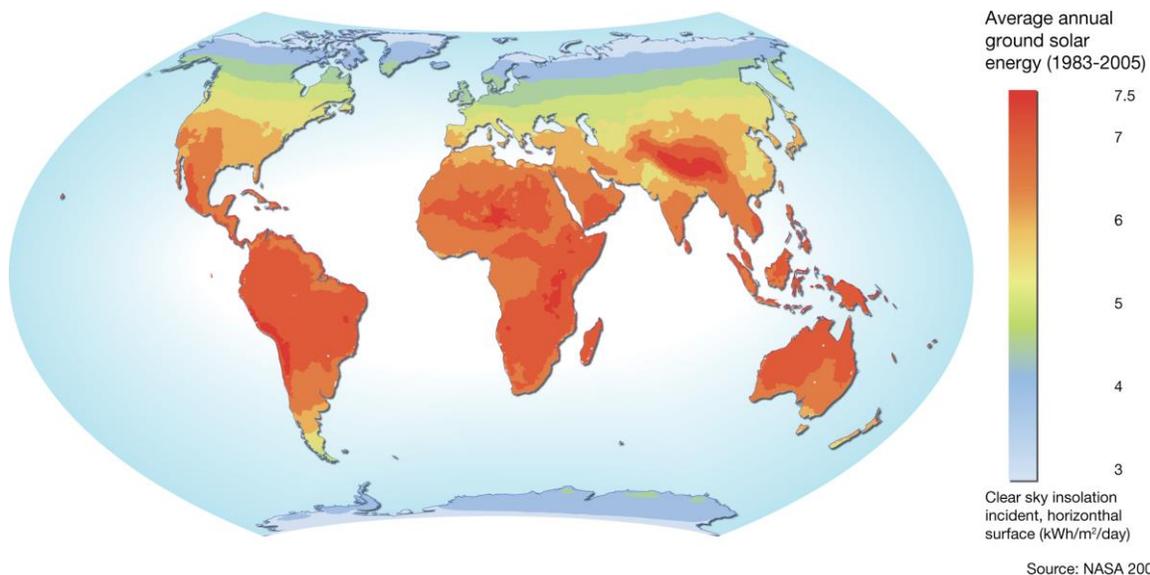


Figura 2.2 Radiación anual promedio en el Planeta, Fuente: www.nasa.gov.

2.1 Tecnologías Solares

En la actualidad se cuenta con el desarrollo de dos formas básicas de aprovechamiento de la energía solar, los sistemas fototérmicos y los sistemas fotovoltaicos. Los primeros aprovechan de forma directa el calor recibido, mientras que los segundos aprovechan la

energía fotónica del espectro solar.

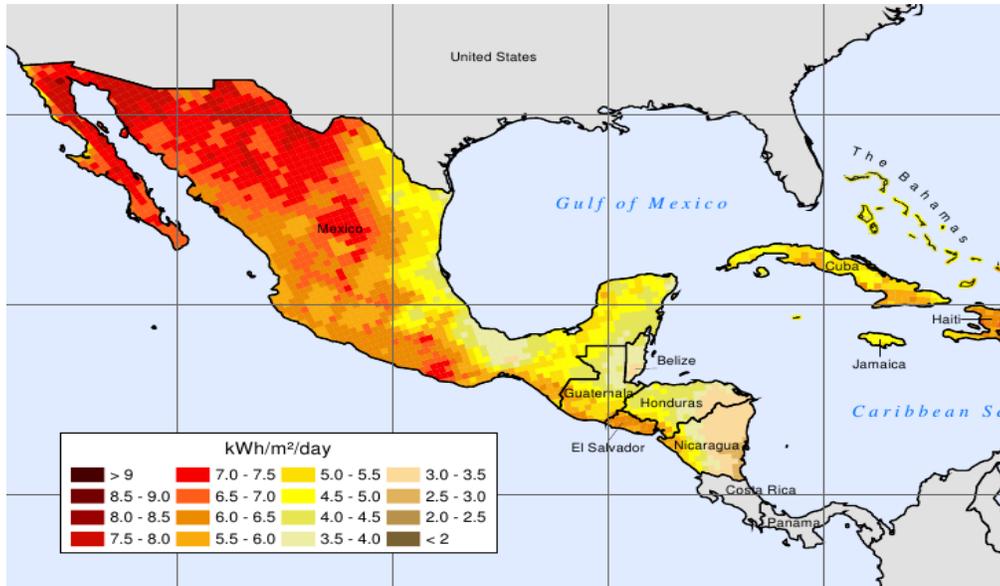


Figura 2.3 Radiación directa por día en México, Fuente: www.nrel.gov/gis.

2.1.1 Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos son fabricados de celdas semiconductoras de silicio, aprovechan un efecto que ocurre en la unión de los materiales semiconductores dopados, donde la luz incidente es capaz de proporcionar energía cinética a los electrones del material, cuando esta energía no puede ser disipada por el material semiconductor, se ve reflejada como una diferencia de potencial en sus terminales, figura 2.4.

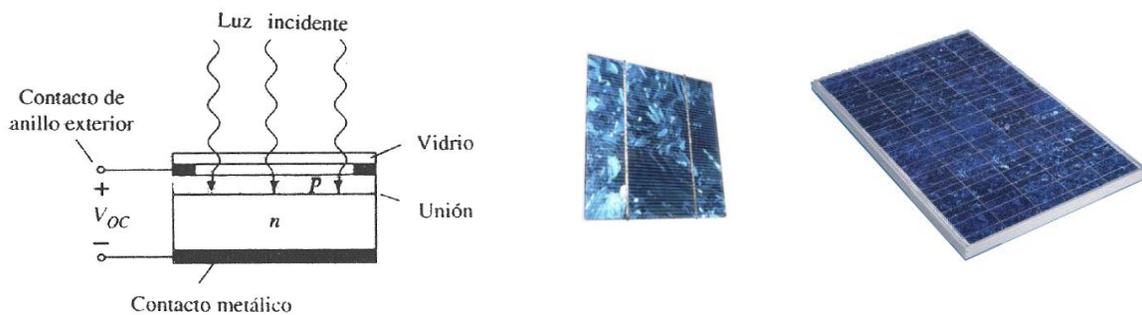


Figura 2.4 Celda fotovoltaica individual y arreglo.

La energía necesaria para poder generar una diferencia de potencial entre terminales se encuentra limitada a la longitud de onda de la radiación recibida, las señales de longitud de onda corta contienen mayor energía que las de longitud de onda larga. Dependiendo del material semiconductor que se encuentre fabricada la unión, estará limitado a cierta longitud de onda específica que cuenta con la energía suficiente para poder excitar el material, por lo que las longitudes de onda más largas no cuentan con la energía suficiente y no puede usarse para esa celda. Por otra parte las longitudes de onda menores cuentan con una energía superior, por lo que esta es disipada en forma de calor [2]. Estos dos fenómenos hacen que la celda fotovoltaica solo pueda aprovechar una parte de la energía irradiada del sol, y esta queda definida por el límite Shockley–Queisser, que nos limita a una eficiencia teórica máxima de la unión semiconductor de alrededor del 30% en aprovechamiento de la energía solar [2]. Se ha logrado mejorar esta eficiencia colocando un arreglo de celdas fotovoltaicas en capas de diferentes materiales alcanzado eficiencias del orden de 40% o más pero solo en laboratorio. Actualmente las celdas fotovoltaicas comerciales alcanza un eficiencia típica del 12% [3].

2.1.2 Fototérmicas

Por otra parte tenemos las tecnologías fototérmicas, aquí el proceso de aprovechamiento de energía se basa en la recolección la radiación solar incidente (irradiación) para convertirla en energía térmica y pueda ser utilizada de forma directa para calentar agua y/o mover un motor “STIRLING” y transmitir la energía a un generador o bien mediante un intercambiador de calor pasarla a un fluido, que finalmente proporciones la fuerza necesaria para mover una turbina acoplada igualmente a un generador para la producción de energía eléctrica, figura 2.5.

El aprovechamiento de la energía no está limitada cierta longitud de onda como el caso de la fotovoltaica, por lo que todo el espectro electromagnético que incide en la superficie terrestre puede ser aprovechado de forma térmica, con las pérdidas acumuladas por cada etapa del proceso de conversión de la energía.

La energía teórica aprovechada por este tipo de tecnologías en las secciones térmicas, queda limitada a la eficiencia de “Carnot”, que con componentes ideales pudiera alcanzar casi el 100% en aprovechamiento energético. Pero en la práctica no es posible obtener esta

eficiencia debido pérdidas en la recolección (concentración) en el colector (convertidor de radiación a calor), intercambiador, turbina y por último en el generador de energía eléctrica.

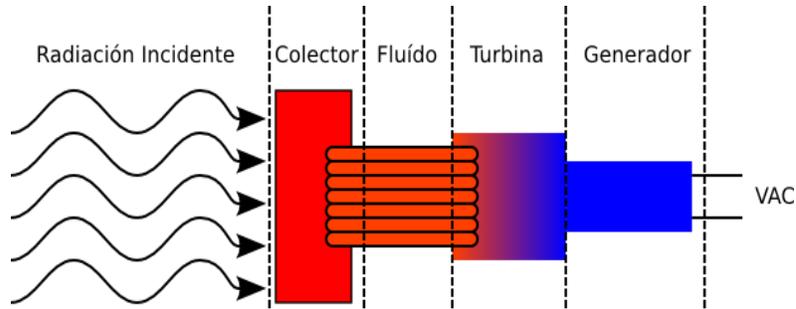


Figura 2.5 Diagrama a bloques de conversión fototérmica.

2.1.3 Calentadores Solares

Los calentadores solares aprovechan de forma directa la radiación solar para calentar agua en uso doméstico e industrial, que requieren de temperatura típicas por debajo de los 100°C. El principio de operación es mediante una serie de tubos evacuados (al vacío), que sirven de colector e intercambiador de calor para calentar el agua, un tanque elevado sirve de almacenamiento y el flujo del agua hacia el colector se realiza por convección térmica, el agua caliente sube y regresa al tanque de almacenamiento y el agua fría sale del tanque hacia los tubos evacuados, figura 2.6.

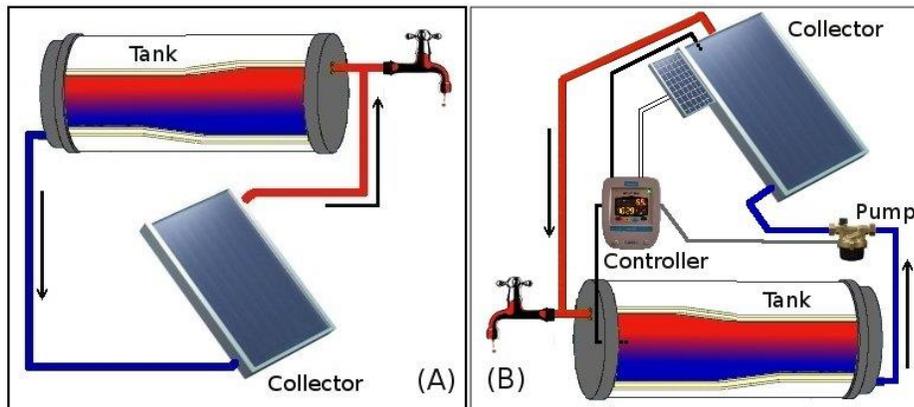


Figura 2.6 Calentadores solares.

También estos sistemas pueden incluir una bomba eléctrica para lograr una mayor

eficiencia en el calentamiento del agua y eliminan la necesidad del tanque elevado.

En México actualmente se tienen programas de vivienda verde en la cual se aprovecha la energía solar para el calentamiento de agua de uso doméstico [4]. A nivel federal tenemos el “Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México (PROCALSOL)”, este programa en conjunto con otros de ámbito estatal, han logrado un incremento sustancial en la instalación de estos sistemas contando para finales del 2010 con 1,665,502 m² de calentadores solares, con un aprovechamiento de 4.8 PetaJoules de energía que traducidos a watts-hora son 1.33 GW-hr [5].

2.2 Sistemas de Concentración Solar y Generadoras de Potencia Eléctrica

Para generar energía eléctrica se necesita mucho mayor potencia que la obtenida por los colectores planos, para que una turbina generadora de electricidad opere de forma eficiente requiere temperaturas de 300° o más, igualmente la mayoría de los ciclos termodinámicos requieren similar temperatura para operar de forma eficiente. Una forma de conseguir esta potencia es en base a la concentración de la energía solar [6].

Los sistemas de concentración solar de potencia (CSP, por sus siglas en inglés) son capaces de producir energía eléctrica para uso doméstico y/o industrial. Los rayos solares son reflejados a un arreglo de espejos concentradores y redirigidos hacia uno o varios colectores, para convertir el calor generado en vapor de agua y así poder mover turbinas para generación de electricidad, actualmente se está trabajando con diferentes tecnologías dependientes de su temperatura de concentración para alcanzar mejoras en las eficiencias termodinámicas. Existen cuatro principales sistemas CSP que son: Canal parabólico, sistemas de Fresnel, disco parabólico y sistemas de torre central o de recepción central.

2.2.1 Canal Parabólico

Los sistemas de canal parabólico consisten de un espejo en canal de forma transversal parabólica que refleja y concentra la radiación solar en unos tubos situados en el foco de la parábola, conteniendo un fluido térmico que se calienta para producir vapor. Esta es una de las tecnologías más maduras de CSP y que las hacen económicamente viables de desarrollo.

Existen muchas plantas con esta tecnología actualmente en operación, figura 2.7.



Figura 2.7 Cilindro Parabólico esquema y planta en operación.

2.2.2 Fresnel

Los sistemas de Fresnel utilizan un arreglo de espejos lineales y planos o un poco curvos para reflejar los rayos solares y concentrarlos en un tubo elevado que contiene un fluido térmico, para calentarlo, producir vapor y generar energía eléctrica, figura 2.8. Este tipo de tecnología es la menos eficiente de las cuatro CSP pero también es la menos costosa.

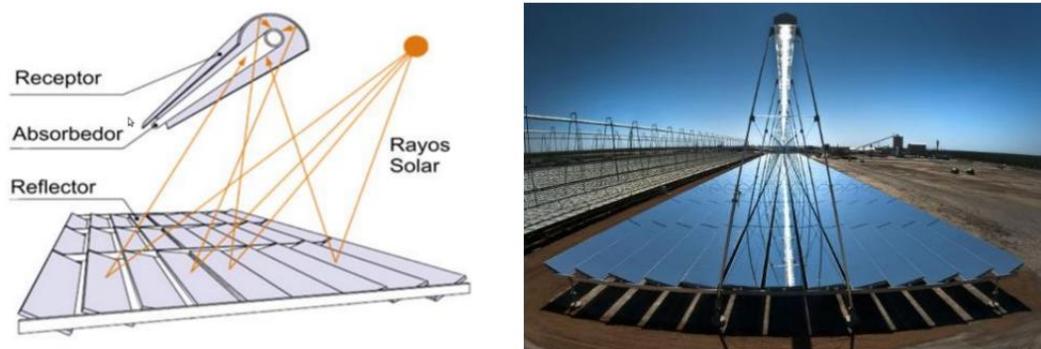


Figura 2.8 Fresnel CSP esquema y planta en operación.

2.2.3 Disco Parabólico

Los sistemas de disco parabólico son relativamente pequeñas unidades que consisten de un disco parabólico que refleja los rayos solares en un receptor montado en el punto focal donde

se calienta un fluido térmico o un motor *stirling* acoplado a un generador, figura 2.9. Esta tecnología tiene la ventaja que puede funcionar como un sistema independiente y puede proporcionar energía eléctrica de forma descentralizada. Existen varios proyectos en Estados Unidos de América (EEUU).

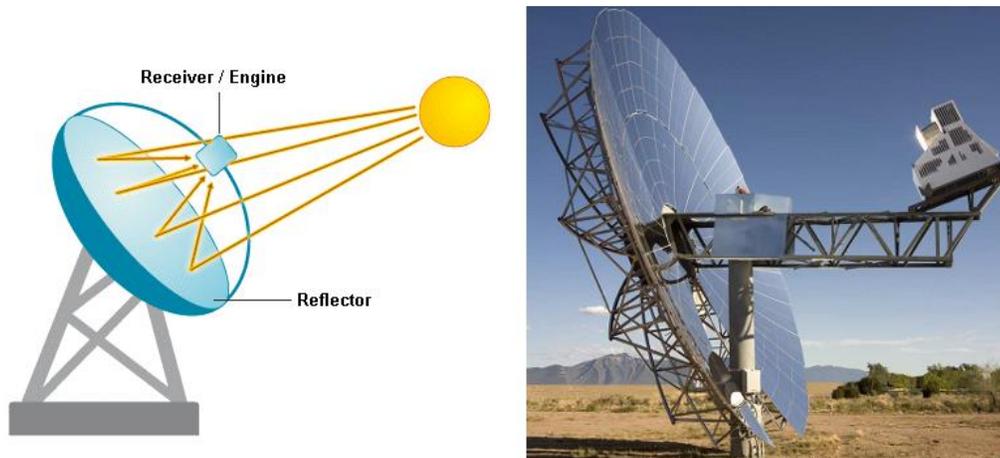


Figura 2.9 Disco Parabólico esquema y planta en operación.

2.2.4 Torre Central

Los sistema de torre central o de receptor central emplean un arreglo de espejos planos con un sistema de seguimiento (helióstato) para concentrar la radiación solar en un receptor central, en lo alto de la torre se produce vapor para la generación de energía eléctrica [7]. Actualmente existen varias plantas en operación con esta tecnología y se tiene proyectada la planta de mayor capacidad en la historia de las tecnologías CSP con este método, en el desierto de Mojave en California nombrada “Ivanpah solar facility”, con una producción de 392 MW con tres torres centrales y su primera etapa está programada para finalizar en el año 2013.

2.2.5 Tecnología de Receptor Central (CRS)

Uno de los principales componentes de este tipo de tecnología es el uso de miles de espejos, cada uno montado en un cabezal que permite realizar seguimiento solar, comúnmente llamados “Helióstatos”, que reflejan la luz incidente en el receptor principal ubicado en una

torre al centro del campo de heliostatos. El receptor principal utiliza sales fundidas como fluido térmico debido a las altas temperaturas alcanzadas y también a la eficiencia alcanzada con sales. La sal-fundida se almacena en tanques “fríos” a 290°C y se bombea al receptor donde el sol la calienta a 565°C y se vuelve a almacenar en otro tanque denominado “Caliente”. Cuando se requiere producción de energía de la planta, la sal caliente es bombeada a un sistema de generación de vapor sobrecalentado para realizar la conversión a través de un ciclo-Rankine en un sistema turbina/generador. Del generador de vapor, se retorna la sal al tanque “frío” y eventualmente vuelve a ser recirculado por el colector, completando el ciclo termodinámico [8]. La figura 2.10, muestra un diagrama esquemático del flujo primario de la sal-fundida en una planta de energía solar. Los tanques de almacenamiento deben ser diseñados con suficiente capacidad para llevar a la turbina de potencia a su máxima salida por un lapso de 13 horas por lo menos.

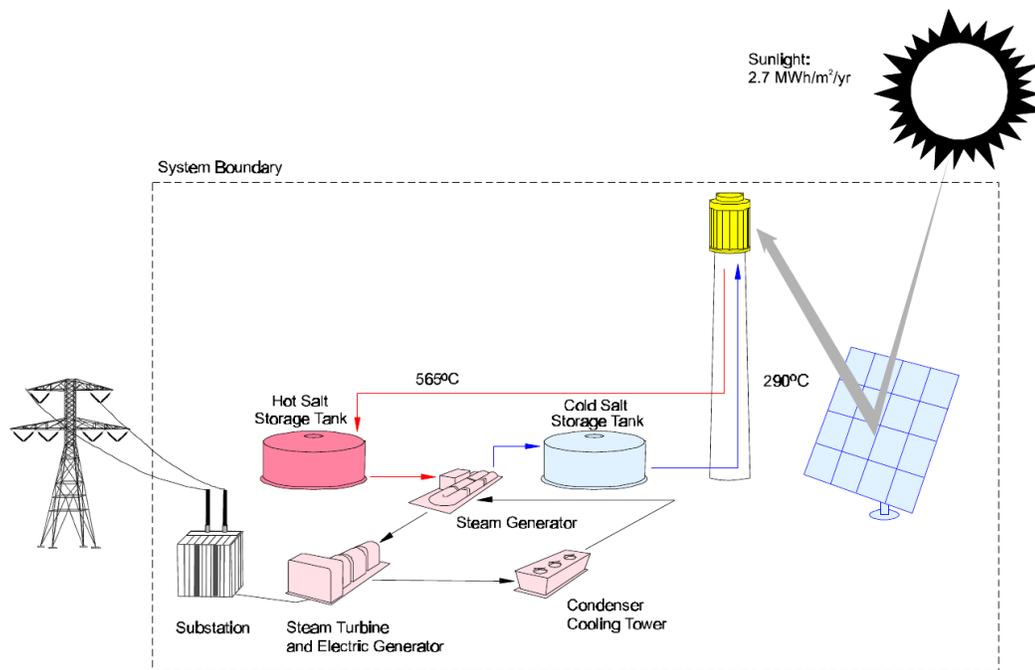


Figura 2.10 Esquema de planta con Receptor Central de Potencia.

Este tipo de tecnologías puede lograr eficiencias altas, pero el corazón de la eficiencia se concentra en el receptor térmico, donde a altas temperaturas la eficiencia disminuye y en bajas temperaturas también disminuye, por lo que necesitan trabajar a una temperatura óptima para que las pérdidas en el receptor sean bajas y obtener máxima eficiencia. Esta característica fue

descrita por Teplyakov [9] y se pueden obtener eficiencias teóricas del 70% [10].

Uno de los principales elementos es el Helióstato, la palabra Helióstato está compuesta de la palabra del griego antiguo “Helios” que significa Sol, y de la palabra del latín “Status” de estacionario. La función de los helióstatos es la de reflejar y concentrar la energía del sol o irradiación en un punto fijo durante todo el día, en esta caso el punto fijo es el colector que se encuentra en la parte superior de la torre. Para que una planta CSP de torre central sea económicamente viable se requiere que tenga una capacidad de 10 a 100 MWatts, con unas concentraciones de 200 a 1,000 veces.

Debido a que el campo de helióstatos comprende el 50% del costo total de una planta de torre central y que una planta de 10 MW eléctricos requerirá aproximadamente 2,000 helióstatos y para una de 100 MW se requerirán 20,000 helióstatos [11], por lo que colocar especial énfasis en su diseño mecánico, eléctrico y electrónico y de control redundará en altos beneficios para el costo total del proyecto.

Una gran ventaja que tienen las plantas CSP (excepto disco parabólico), es que tienen la capacidad de acumular energía térmica a bajo costo (tanques de almacenamiento “caliente”) para poder utilizarla en las horas de mayor demanda. Igualmente, esta acumulación de energía permite producción eléctrica aún en días nublados, por lo que aún con el reciente bajo costo y mejor eficiencia de los sistemas fotovoltaicos los sistemas CSP tendrán una buena penetración en el mercado como plantas de generación de energía eléctrica limpia [12].

2.3 Plantas de Torre Central o de Receptor Central Demostrativas y Comerciales

La planta piloto SOLAR ONE (1982-1988) demostró el concepto de utilidad de las plantas CRS, utilizando vapor sobrecalentado para mover una turbina y el sistema de almacenamiento de “roca-aceite”, que finalmente resultó inadecuado para la operación de la turbina, figura 2.11. Se rediseñó la planta creando SOLAR TWO en 1995, utilizando nitrato de sodio (60%) y nitrato de potasio (40%) como fluido térmico, una producción de 10 MW eléctricos y con un campo de 1,926 helióstatos.

Otra planta muy importante por el tipo de fluido térmico utilizado es la planta PS10, el uso de aire como fluido térmico ha sido probado desde principios de los años 80, esta planta calienta aire en su receptor “volumétrico” a una temperatura de 680°C, con un

almacenamiento de 1 hora, y una temperatura de retorno de 110°C , tiene una producción de 11 MW y un campo de 640 helióstatos de 120 m^2 cada uno. Esta planta finalmente sirvió para hacer modificaciones al diseño original y mejoras en receptor, control y medios de almacenamiento dando lugar a la creación de la planta PS-20, con una producción de 20MW, mostrada en la figura 2.12.



Figura 2.11 Planta Solar One, Barstow CA, USA.

Otra planta con la característica principal de almacenamiento térmico hasta por 15 horas, es la planta Gemasolar, ubicada en Fuentes de Andalucía (Sevilla, España), con almacenamiento en sales fundidas, una producción de 19.9 MW y un campo de 2,650 helióstatos, la hacen la planta comercial más competitiva del mercado pudiendo producir energía las 24 horas del día.

Finalmente la planta proyectada con mayor capacidad será la de Ivanpah Solar, con una capacidad de 392 MW en tres CRS distribuidas, y se espera que esté en operación al 100% a finales del 2014, utilizando cerca de 174,000 helióstatos.



Figura 2.12 Planta PS10 superior y Planta PS20 inferior, Andalucía, España.



Figura 2.13 Planta Gemasolar de la empresa Torresol Energy, Fuentes de Andalucía, España.



Figura 2.14 Planta Ivanpah Solar, California, EEUU (en construcción).

2.4 LACYQS

El Laboratorio Nacional de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS), tuvo su génesis de forma académica por parte de la Universidad Autónoma de México a través del Centro de Investigación en Energía (CIE), la Universidad de Sonora (UNISON) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), dirigidos por el Dr. Claudio A. Estrada (UNAM), Dr. Rafael Cabanillas (UNISON) y el Dr. Sergio Vázquez (INAOE) en sus respectivas instituciones. Teniendo como objetivo la realización de varios subproyectos dentro de LACYQS, uno de ellos el proyecto denominado Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH).

2.4.1 Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH)

Los principales objetivos de la creación del CPH son:

- Impulsar la formación de una red nacional de investigadores que trabajen en el desarrollo de la tecnología de concentración solar.
- Formar recursos humanos de alto nivel en el área de concentración solar y química solar.
- Avanzar en el desarrollo de las tecnologías solares, generando conocimiento científico y tecnológico.

El CPH es el primer proyecto CSP de torre central realizado en toda Latinoamérica, inaugurada el día 28 de octubre de 2011, cuenta con 13 heliostatos concentradores de 36 m²,

uno de 3 m² y 1 *cluster* de 9 minihelióstatos, una torre central de 36 metros de altura, cuarto de control y laboratorio electrónico, mostrados en la figura 2.15.

Se generará información para el análisis de costos, mantenimiento, rediseño tanto del campo, de la torre y de los helióstatos para la energía del futuro en base a procesos renovables y sin la contaminación generada por la quema de combustibles.



Figura 2.15 Campo de Pruebas de Helióstatos (norte).

CAPÍTULO III. MEDICIONES SOL-TIERRA Y HELIÓSTATOS

3.1 Posición Solar

La Tierra gira en una órbita elíptica alrededor del Sol como se ilustra en la figura 3.1. El Sol se ubica en uno de los focos de dicha elipse, cuya excentricidad media es de 0.028, es decir es casi circular. El plano de la trayectoria terrestre se conoce como plano de la eclíptica. La distancia promedio Tierra-Sol es de 1.496×10^{11} m con una variación de más menos 1.7% a lo largo del año. La distancia más larga o afelio ocurre el día 4 de julio y la más corta, o perihelio, ocurre el 4 de enero.

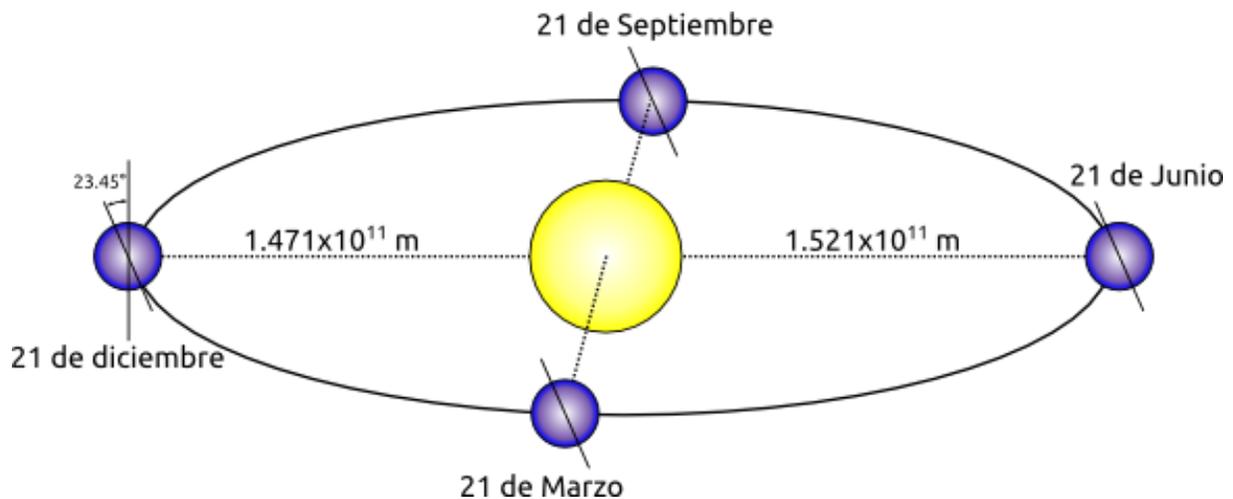


Figura 3.1 Órbita de la Tierra alrededor del Sol.

Así mismo, la tierra tiene un movimiento de rotación sobre su propio eje; llamado eje polar. El eje polar tiene un ángulo de 23.45° con respecto al eje eclíptico (el eje perpendicular al plano) y se mantiene siempre apuntando en la misma dirección a lo largo del año.

Como la distancia de la Tierra al Sol es muy grande comparada con el tamaño de ambos, figura 3.1, en algunos cálculos podemos considerarlos como objetos puntuales. Sin embargo en otros casos no es conveniente hacer dicha consideración. De acuerdo a las dimensiones presentadas en la figura 3.2, se obtiene que el Sol visto desde la tierra muestra un semiángulo aproximado de 4.7 mrad ($\Delta_s = 4.7 \text{ mrad} = 0.25^\circ = 16'$).

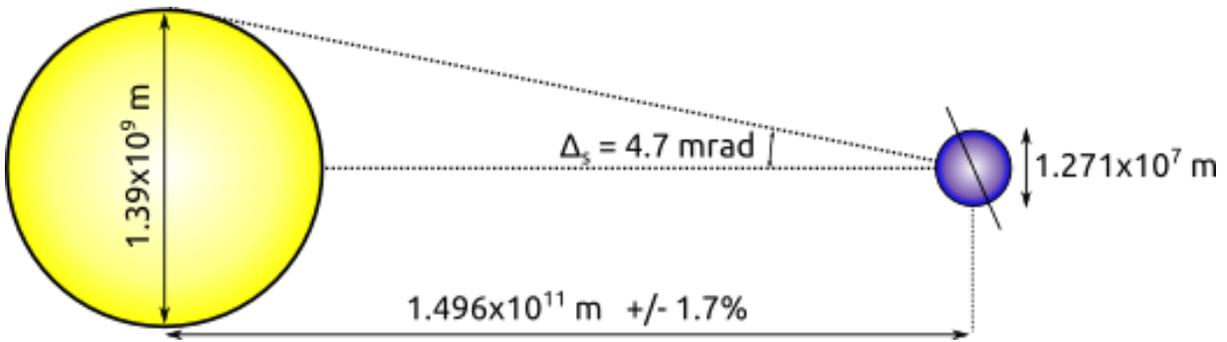


Figura 3.2 Dimensiones de la Tierra y el Sol.

3.1.1 Declinación Solar

El hecho de que el eje polar no coincida con el plano de la eclíptica y a su vez permanezca prácticamente inmóvil durante todo el año, hace que la incidencia de los rayos del Sol no sea en el mismo punto de la tierra durante todo el año.

El plano ecuatorial de la tierra es perpendicular al eje polar y al ángulo formado por el plano ecuatorial y el vector que une los centros de la Tierra y del Sol es llamado de declinación solar. Es positivo cuando se mide hacia el norte y negativo hacia el sur. De acuerdo a como se observa en la figura 3.3, este ángulo toma el valor de 23.45° en el solsticio de verano (21 de junio) y de -23.45° en el de invierno (21 de diciembre). En los equinoccios de primavera y otoño (21 de marzo y 21 de septiembre, respectivamente), su valor es de cero.

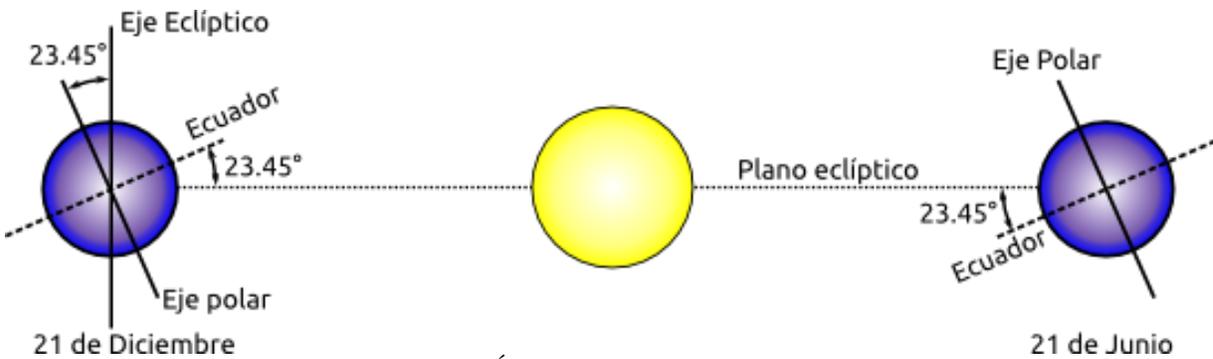


Figura 3.3 Ángulos en diferentes estaciones.

Si observamos esto desde la tierra pareciera como si a lo largo del año el sol se desplazara de manera continua en el cielo cambiando su trayectoria con los días; a veces lo vemos al medio día muy acostado hacia el horizonte y a veces mucho más vertical, figura 3.4. En

particular, si estamos en el Ecuador, lo veremos hacia el sur en invierno y hacia el norte en verano. Específicamente, en el Ecuador el ángulo que hace el sol respecto a la vertical a medio día es igual a la declinación.

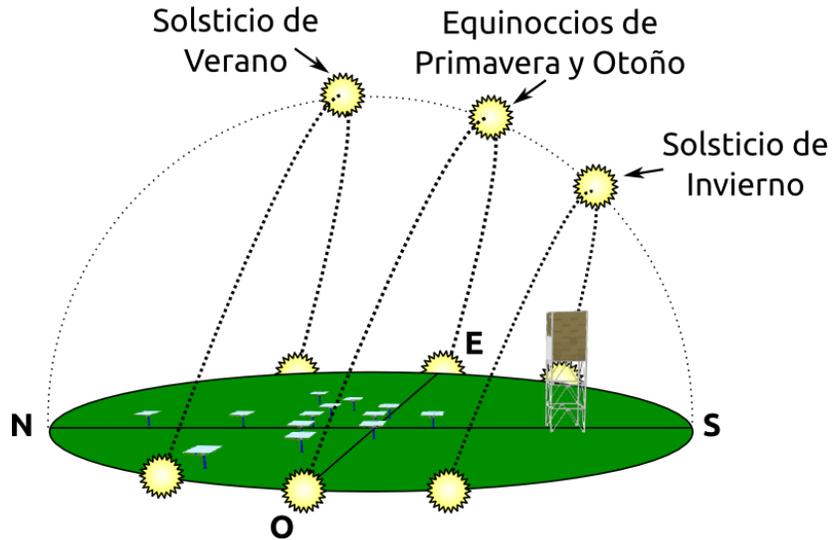


Figura 3.4 Variación de la trayectoria del sol con las estaciones del año.

Si estamos en el centro o sur de México, es decir, por debajo del trópico de cáncer (Latitud igual a 23.45°), veremos al Sol hacia el sur la mayor parte del año y ligeramente hacia el norte o casi vertical en verano. Pero si estamos en los estados del norte, por arriba del trópico, siempre lo veremos hacia el sur a mediodía, figuras 3.4 y 3.5.

Este cambio de trayectoria del sol a lo largo del año se puede ver como una variación continua del ángulo de declinación. Una aproximación se puede observar en la gráfica de la figura 3.6 [14].

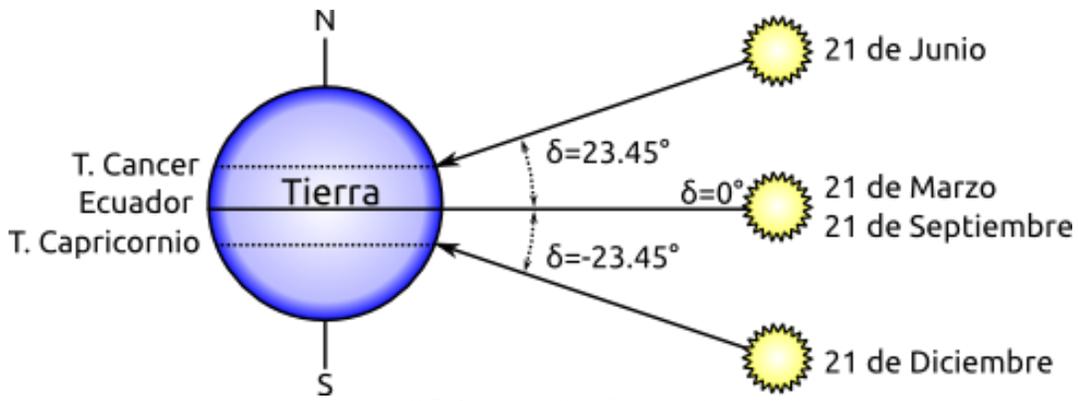


Figura 3.5 Declinación solar y trópicos

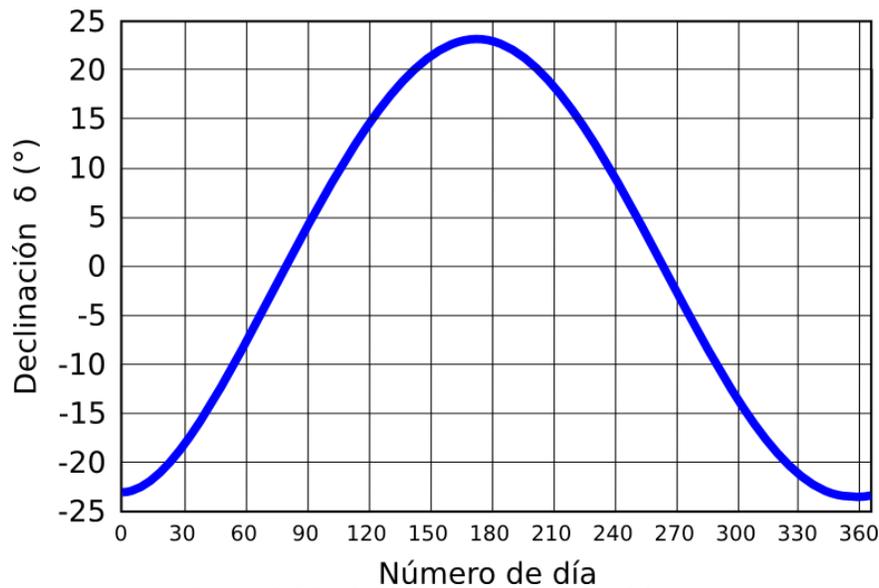


Figura 3.6 Declinación Solar a lo largo del año.

3.1.2 Ecuación de Tiempo

El tiempo solar varía de forma continua de una manera natural, pero como no es práctico para fines sociales se utilizan los usos horarios, por lo que se dividió el globo terraqueo en regiones donde tendrían que sincronizar sus relojes, a estas regiones se les conoce como “husos horarios” y comienzan en la región de Greenwich con el huso 0 y hacia el Oeste (W) son negativos y hacia el Este (E) son positivos, por lo que en cada zona se sincronizan los minutos y segundos y la hora correspondiente la del meridiano de Greenwich el huso horario respectivamente figura 3.7.

Para la zona de Hermosillo (Latitud 29° 05' 56", Longitud 110° 57' 15"), corresponde el huso horario de -7. Delimitado por los meridianos 105° y 120°. Esto quiere decir que cuando en el meridiiano 105° son las 12:00 horas de tiempo solar, serán las mismas doce horas en toda la región.

Como la tierra gira a una velocidad aproximada de 1 revolución (360°) por cada 24 horas tenemos que el avance aparente del Sol es de: $\frac{360^\circ}{24 \text{ hrs}} = 15 \frac{\text{grados}}{\text{hora}}$ o bien de $4 \frac{\text{minutos}}{\text{grado}}$.

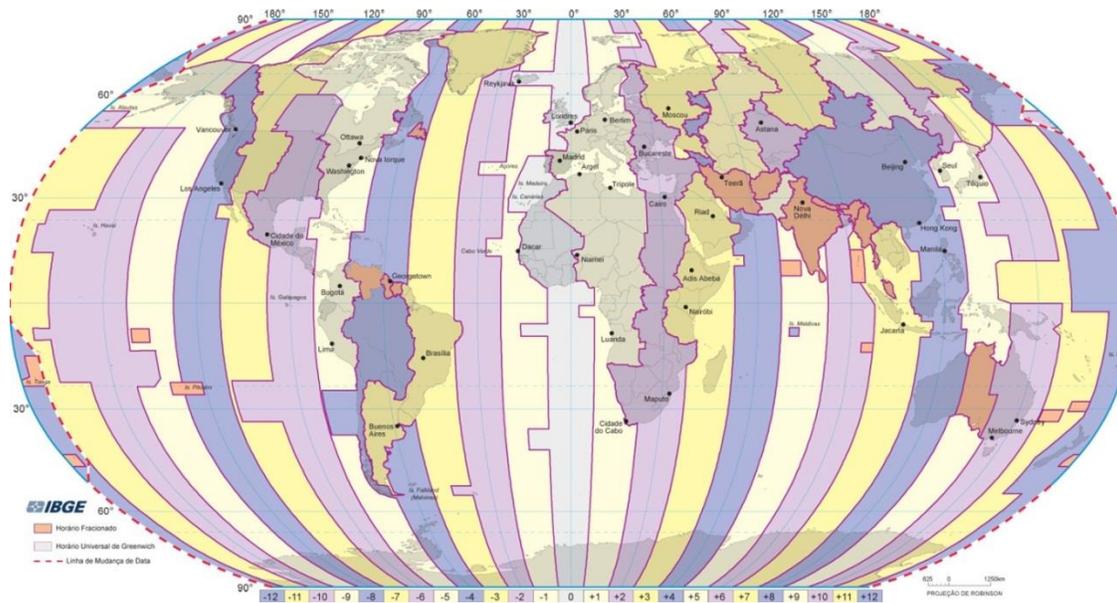


Figura 3.7 Husos Horarios.

Como el movimiento de traslación terrestre es diferente para cada época del año tenemos que los días pueden transcurrir más rápidos o más cortos de 24 hrs dependiendo de la fecha, esta variación es representada por la ecuación de tiempo (E_t) y se repite cada año la forma de onda mostrada en la gráfica de la figura 3.8.

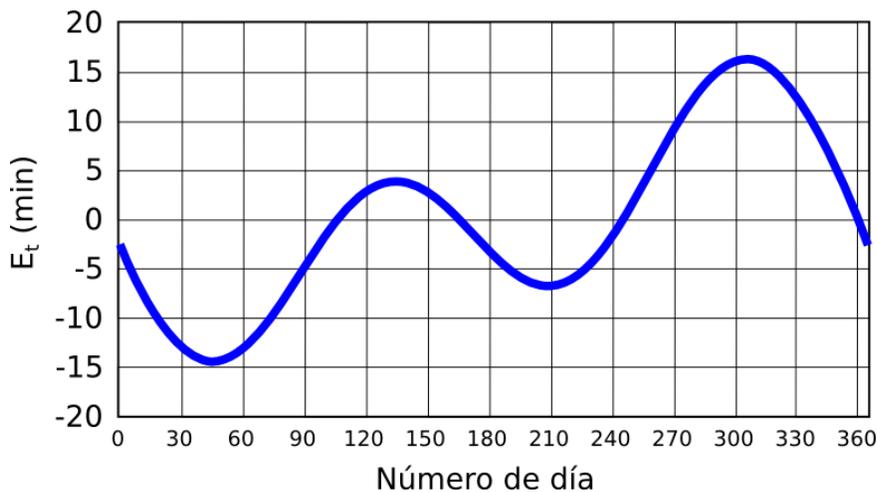


Figura 3.8 Comportamiento del día solar a lo largo de un año.

Para el cálculo de la hora solar verdadera (T_{sol}), o la posición aparente del sol en un punto cualquiera en la superficie terrestre se realiza con la siguiente ecuación:

$$T_{sol} = T_{est} + 4(L_{est} - L_{local}) + V + E_t \quad (3.1)$$

T_{sol} = Tiempo Solar en minutos.

T_{est} = Tiempo estándar correspondiente al huso horario de 0 a 1,440 en minutos.

L_{est} = Meridiano correspondiente al huso horario negativo para W.

L_{local} = Meridiano Local donde se encuentra negativo para W.

E_t = Ecuación de tiempo.

$$V = \begin{cases} -60 \text{ min en horario de verano} \\ 0 \text{ min en horario de invierno} \end{cases}$$

3.2 Ángulos Solares de Posicionamiento

Existen dos formas utilizadas para la descripción de la trayectoria solar aparente, la más básica se le conoce como “Coordenadas Ecuatoriales Horarias” o “Coordenadas Horarias”, que basan su cálculo en la referencia del Ecuador y el movimiento de la tierra sobre su propio eje de 24 Hrs. Hace uso de la declinación solar δ y la latitud local φ para encontrar la corrección por declinación, y el ángulo horario ω , que es el movimiento angular del Sol de 15° cada hora, como se muestra en la figura 3.9 y la figura 3.10 respectivamente.

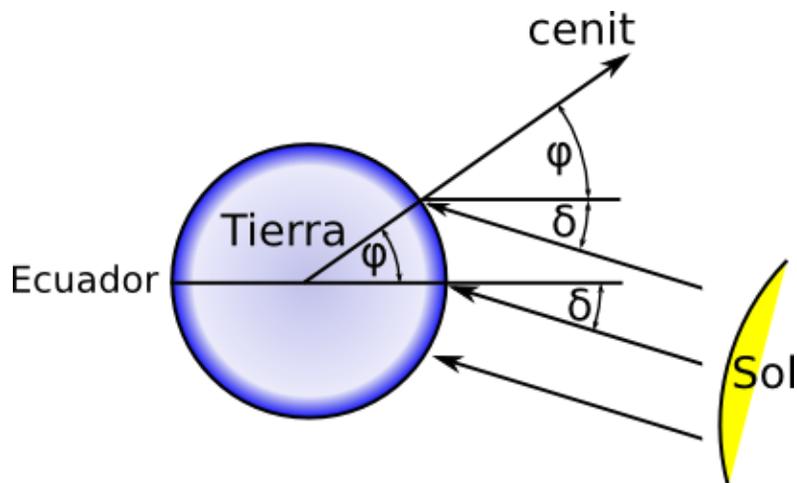


Figura 3.9 Corrección por latitud local y declinación.

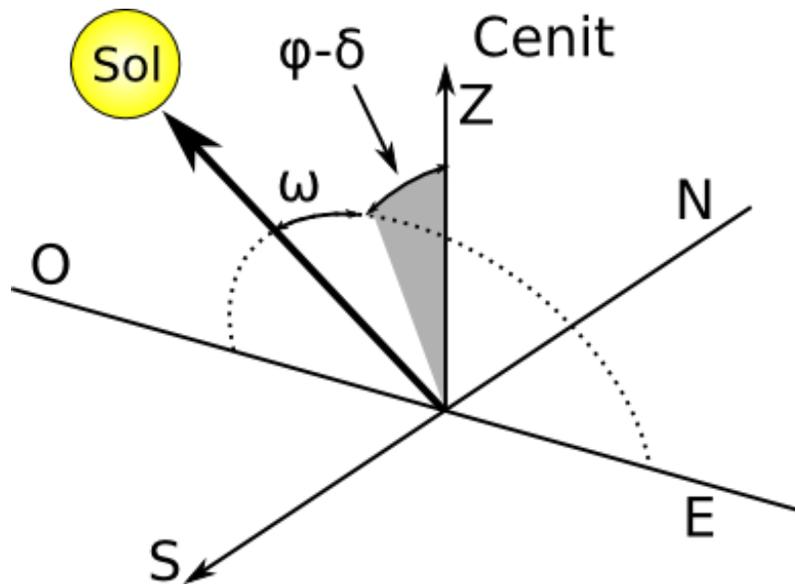


Figura 3.10 Ángulos solares por Ángulo horario, Declinación y Latitud.

Otra forma de describir la trayectoria del sol es a través de dos ángulos, el ángulo cenital θ_z y el ángulo acimutal γ_s , mostrados en la figura 3.11. El ángulo cenital mide qué tan desviado se encuentra el sol respecto al vector cenital o vertical en un momento dado, mientras que el ángulo acimutal mide la desviación respecto al sur. En ocasiones se utiliza otro ángulo llamado altura solar α_s , el cual mide la desviación del sol respecto a la horizontal, es decir, su elevación y es el complemento del ángulo cenital θ_z .

$$\alpha_s = 90^\circ - \theta_z \quad (3.2)$$

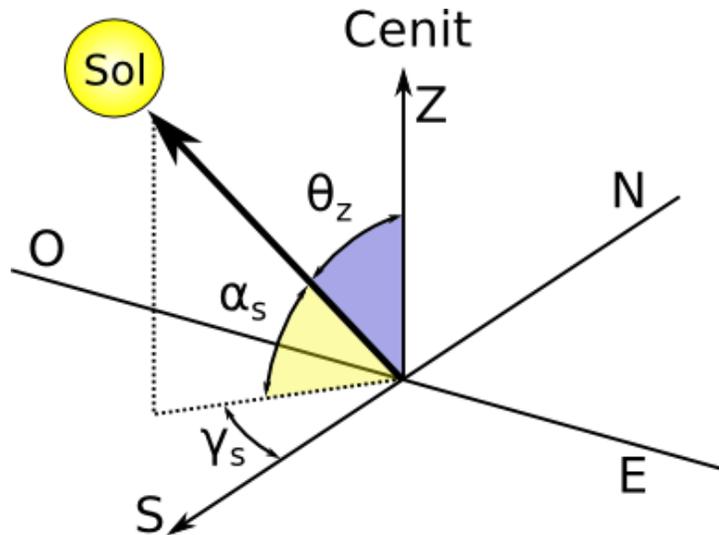


Figura 3.11 Ángulos Cenital, Azimutal y Altura Solar.

3.2.1 Vector Solar

La utilización de la posición solar en notación vectorial nos ayuda a encontrar una respuesta general en el espacio y a simplificar la notación de las ecuaciones en forma vectorial.

El vector solar unitario es:

$$\hat{s} = \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|} = s_x + s_y + s_z \quad (3.3)$$

Definiendo $|\vec{S}| = 1$, tenemos que los componentes para \hat{s} son:

$$\begin{aligned} s_x &= \cos(\alpha_s) \operatorname{sen}(\gamma_s) \\ s_y &= \cos(\alpha_s) \cos(\gamma_s) \\ s_z &= \operatorname{sen}(\alpha_s) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Y la representación del eje de coordenadas se muestra en la figura 3.12.

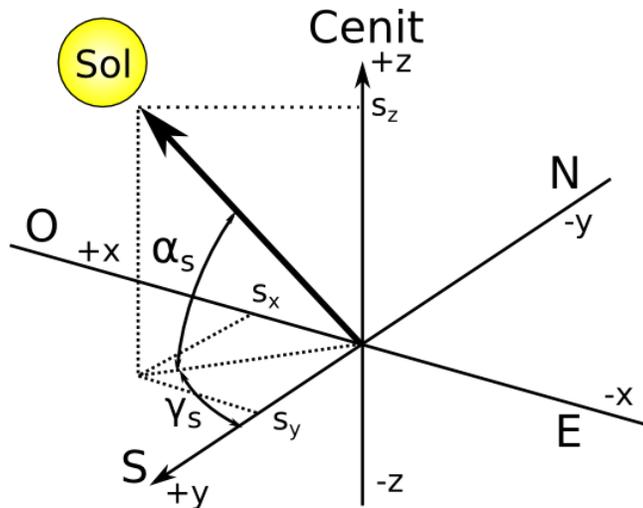


Figura 3.12 Ejes y Vector Unitario Solar.

3.3 Seguimiento Solar (*Solar Tracking*)

Los equipos de seguimiento solar se dividen básicamente en dos: Sistema de montura Ecuatorial y Sistema de montura azimutal.

3.3.1 Montura Ecuatorial

Se basa en montura de dos ejes, una para realizar el ajuste por declinación (δ) y el segundo para el ajuste de ángulo horario (ω), figuras 3.13 y 3.14. Utiliza los parámetros de “Coordenadas Ecuatoriales Horarias” para el posicionamiento solar.

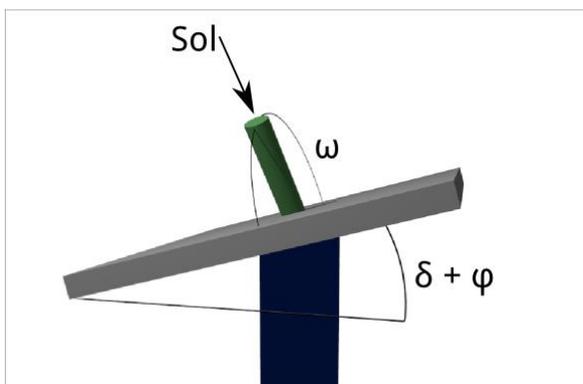


Figura 3.13 Montura Ecuatorial.



Figura 3.14 Montura Ecuatorial para telescopio.

3.3.2 Montura Acimutal

Utiliza dos ejes para el seguimiento solar, el eje acimutal (γ) y la elevación (α), figuras 3.15 y 3.16. Realmente las dos imágenes representan los mismos dos movimientos, uno para acimut y el otro de elevación, la primera indica los movimientos teóricos y la segunda los movimientos prácticos.

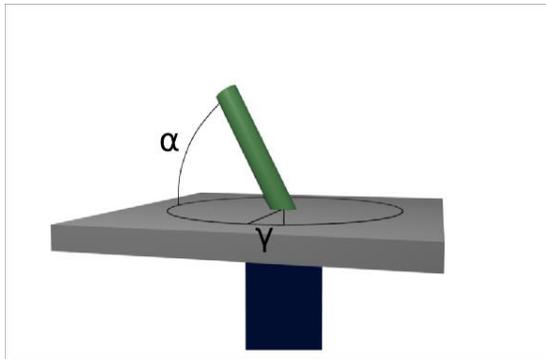


Figura 3.15 Montura Acimutal.



Figura 3.16 Montura Acimutal para telescopio

3.4 Algoritmos de Trayectoria Solar

La precisión del algoritmo de posición solar juega un papel fundamental en las aplicaciones de energía solar, especialmente en los sistemas de concentración. La precisión requerida varía en un rango muy amplio, dependiendo de la aplicación: Los sistemas planos sin concentración toleran errores de unos pocos de grados sin pérdidas significativas, mientras que los sistemas de alta concentración requieren una precisión del orden de 0.01° . Aplicaciones más específicas, como la calibración de piranómetros requieren mayor precisión.

A pesar de la aparente facilidad, la precisión del cálculo computacional de la posición solar es una tarea difícil. Además, el movimiento aparente del sol es el resultado de un alto número de perturbaciones, como lo son: Precesión y Nutación del eje de rotación terrestre, perturbaciones causadas por la luna, la reducción en la velocidad de rotación de la tierra, y los efectos de los demás planetas del sistema solar. Todos estos factores afectan el resultado de diferentes maneras.

Muchos algoritmos para el cálculo de la posición solar con diferentes niveles de precisión y complejidad pueden encontrarse en textos de ingeniería solar [13]. Fórmulas

simples que encuentran la declinación (δ) o la ecuación de tiempo (E_t) usualmente con errores del orden de décimos de grado. Algoritmos más complejos fueron propuestos por Pitman and Vant-Hull [17], con un error máximo de 0.02° ; algunos años después en 1978 Walraven publica otro algoritmo con un error máximo de 0.013° [18]. Otro algoritmo fue propuesto por Michalsky 10 años después [19] basado en el Almanaque Astronómico (1985) y reduce el error máximo a 0.01° . Otros dos algoritmos con menor error y menor rango de validez temporal, fueron propuestos en los siguientes años por Blanco-Muriel et al en 2001 [14] y Roberto Grena en 2008 [20], el primero desarrollado en la Plataforma Solar de Almería (PSA) y el segundo en La Agencia Nacional Italiana para las Nuevas Tecnologías (ENEA). Estos algoritmos cuentan con operaciones de fácil implementación y bajo consumo computacional. Algoritmos más precisos se encuentran en base a cálculos astronómicos, pero también mucho más complejos que los mencionados anteriormente [15]. Reda y Andreas atrajeron la atención de la comunidad de ingeniería solar con el trabajo conocido como Algoritmo de Posición Solar (SPA) en 2004 [16]. Este algoritmo tiene un error máximo de 0.0003° en el período de 2,000 A.C. Hasta 6,000 D.C.

El algoritmo para el cálculo de la posición solar utilizado en presente trabajo, es el presentado por Roberto Grena en 2008 [20], debido principalmente a su precisión con un error máximo de 0.0027° , la rapidez de cálculo menor a 13 ms y a su sencilla implementación [21].

Los parámetros de entrada de este método son:

- El UT (Tiempo Universal) en fracción, medido desde la media noche de Greenwich, los minutos y los segundos deben convertirse a fracción.
- Fecha (Día D, Mes M, Año Y).
- Diferencia entre UT y TT (Tiempo Terrestre) la escala de tiempo de las efemérides, independiente de la rotación terrestre.
- Longitud y Latitud local.
- Presión atmosférica y Temperatura (correcciones por refracción atmosférica).

3.5 Teoría de Operación de un Helióstato

Un Helióstato es una superficie plana que tiene la función de reflejar los rayos solares o el vector solar hacia un punto específico, por lo que su funcionamiento no es la de seguidor solar,

si no el seguimiento de la bisectriz formada entre los vectores del sol (\vec{S}) y el vector objetivo (\vec{T}) o punto específico como se muestra en la figura 3.17. Cada uno de los heliostatos en el campo debe calcular su bisectriz en cada instante de tiempo, para mover la normal (\vec{n}) de su plano y alinearla con la bisectriz calculada.

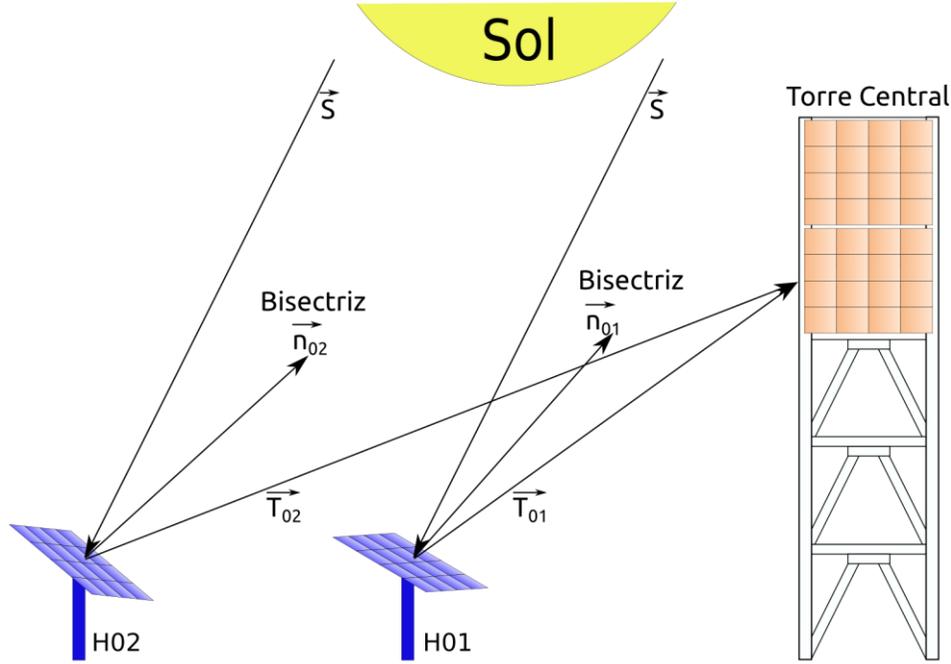


Figura 3.17 Bisectriz de apuntamiento del heliostato.

Esta bisectriz se puede encontrar vectorialmente por suma de vectores, es decir encontrando el vector del punto común al punto de suma de los dos vectores, pero el sentido de ambos debe ser hacia la bisectriz que se desea encontrar. Para el caso de la bisectriz \vec{n}_{02} en la figura 3.17, podemos encontrarla con los vectores unitarios \hat{s} y \hat{t} , cambiando el sentido de \hat{s} para aplicar la regla del rombo, quedando como:

$$\hat{s} = \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|} \quad \hat{t} = \frac{\vec{T}}{|\vec{T}|} \quad (3.5)$$

$$\hat{n}_{02} = \frac{-\hat{s} + \hat{t}}{|-\hat{s} + \hat{t}|} \quad (3.6)$$

Para tener control sobre la superficie reflectante es necesario como mínimo un brazo

articulado con dos grados de libertad, que se explicará a detalle en la sección 4.6.1.

La figura 3.18 muestra los ángulos de control de una superficie reflectante:

- θ_h , Ángulo cenital del helióstato
- α_h , Altura del helióstato
- γ_h , Ángulo acimutal del helióstato

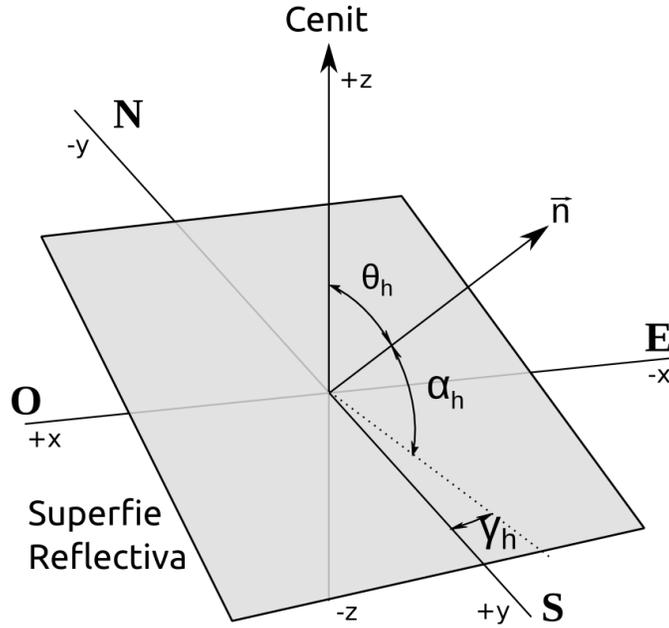


Figura 3.18 Ángulos de control de superficie reflectante.

Básicamente la altura del helióstato es el complemento del ángulo cenital del helióstato, por lo que en realidad para el control solo se utilizan dos movimientos (altura α_h y acimut γ_h). Mediante estos dos ángulos se tiene control de la dirección de la normal del plano del helióstato, las precisiones requeridas para estos ángulos rondan del orden de 5 mRad.

Para la conversión del vector normal (\vec{n}) a los ángulos de altura (α_h) y acimut (γ_h) del helióstato se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\vec{n} = n_x + n_y + n_z \rightarrow (-n_x, -n_y, -n_z) \quad (3.7)$$

$$\alpha_h = \arctan\left(\frac{n_z}{\sqrt{n_y^2 + n_x^2}}\right) \quad (3.8)$$

$$\gamma_h = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) \quad (3.9)$$

CAPÍTULO IV. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para capturar los rayos del Sol concentrados, es necesario una torre central debido a que reflejar los rayos del sol a ras de piso no sería eficiente; para el caso del Campo de Pruebas de Helióstatos, que es una instalación experimental con un objetivo específico de producción de energía eléctrica, la torre central tiene varias aplicaciones separadas en secciones que son:

- Blanco de Pruebas Térmicas.
- Estación Solarimétrica.
- Horno Solar.
- Blanco Lambertiano.

Cada una de las aplicaciones tiene un objetivo específico que se describe en las secciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 respectivamente.

Las dimensiones de la torre son 8x8 metros de base y 32 metros de altura. La imagen de la figura 4.1 muestra las secciones de infraestructura instalada en la torre central.



Figura 4.1 Torre Central.

4.1 Blanco de Pruebas Térmicas

En lo alto de la torre se encuentra un blanco de pruebas térmicas, que tiene varias funciones:

- Tener un lugar seguro donde hacer pruebas térmicas de concentración de los helióstatos. Sin riesgo para empleados o visitantes.
- Analizar la distribución de temperaturas de los reflejos solares “Spot Solar”.
- Medición indirecta de concentración solar en base a temperaturas.
- Analizar de forma individual y en *clusters* temperaturas máximas alcanzadas por los helióstatos.

Cuenta con tres sensores térmicos de termopar tipo “K”, conectados una tarjeta analógica tipo termopar del NI cRIO-9074 (explicado a detalle en la sección 5.4) que funciona como “Estación Solarimétrica”. El termopar puede alcanzar temperaturas de -200° hasta $1,350^{\circ}$ C.

4.2 Estación Solarimétrica

La estación Solarimétrica se instaló en la parte alta de la torre con la función de obtener registros de las variables solares y climatológicas necesarias para el correcto funcionamiento del campo de Helióstatos. Estas variables influyen en el desempeño de la eficiencia total de la planta, desde la radiación directa incidente en el campo hasta el viento y su dirección, que influyen en las pérdidas de temperatura. Por ésta razón se requiere que los valores obtenidos de la estación sean procesados en tiempo real dentro del software de control del campo. Los instrumentos instalados a esta estación son:

- Sensor de radiación global: Piranómetro.
- Sensor de radiación directa: Pirheliómetro.
- Sensor de alto flujo radiativo: Gardon.
- Termopares de blanco térmico de pruebas.

- Temperatura ambiental.
- Velocidad y Dirección de viento.

Todos estos instrumentos se encuentran conectados a un NI cRIO-9074.

4.3 Horno Solar

El horno solar es un cuarto de 6m x 7m x 6m en la parte superior de la torre y es el lugar donde se colocará el receptor térmico para la conversión de energía de radiación a térmica. Cuenta con una persiana metálica para guarnecer el receptor térmico cuando no esté en operación. El diseño del receptor térmico corre a cargo de personal de UNISON, encabezados por el Dr. Fernando Hinojosa, con un grupo de investigadores.

4.4 Blanco Lambertiano

El blanco Lambertiano es una superficie de reflexión difusa que se encuentra en la parte frontal de la torre, por debajo del “Horno Solar”. A la superficie se le aplicó un polímero capaz de soportar altas temperaturas y a la vez refleja los rayos directos del sol, lo más parecido a una superficie Lambertiana, esto con la finalidad de poderse apreciar desde cualquier ángulo dentro de campo de helióstatos y que permita la captura de imágenes, y sobre todo que no se dañe por los rayos solares concentrados que inciden en ella. Las dimensiones de este blanco son 670 cm de alto y 790 cm de largo, una de sus aplicaciones es observar la deriva de los helióstatos y obtener su correcta caracterización.

4.5 Sistema de Visión Artificial

Para la adquisición de imágenes se utilizó una cámara de ALLIED Vision Technologies modelo Pike F-032, se trata de una cámara VGA muy rápida con una excelente calidad de imagen y una interfaz FireWire 1394 de alta velocidad. Está equipada con un sensor Kodak KAI-0340 CCD, figura 4.2. Puede operar a una velocidad de 208 cuadros por segundo a su

resolución máxima de 640x480 pixeles, que la hacen una excelente aliada para los sistemas de análisis de movimientos. Cuenta con control de obturador, balance de blancos, *hue*, saturación entre otras variables configurables por software.



Figura 4.2 Cámara de Allied Vision Technologies Pike F-032.

La instalación de las cámaras se ubica en el campo de helióstatos y la obtención de imágenes se realiza con un adquisidor de imágenes conectado a la cámara por medio del puerto FireWire, el adquisidor es un CVS-1454 (*Compact Vision System*) de National Instruments. Este es un sistema de visión artificial compacto y robusto que resiste los entornos agresivos comunes para aplicaciones de robótica guiada por visión, inspección industrial y aplicaciones OEM (*Original Equipment Manufacturer*) de visión.



Figura 4.3 CVS-1454 de National Instruments.

Los sistemas NI CVS permiten una conectividad en red para aplicaciones distribuidas de visión. Al tratarse de un dispositivo de National Instruments se pueden programar con

LabVIEW y el módulo de desarrollo de visión NI LabVIEW Real-Time. El sistema NI CVS tiene un procesador de 400MHz y memoria suficiente para ser programado y operar de manera autónoma en la adquisición de imágenes.

4.6 Campo de Helióstatos

El campo de heliostatos está diseñado para albergar 82 heliostatos de 36 m² o de 6x6 m, en un área de 3.8 hectáreas, incluida la torre de recepción. La Figura 4.4, muestra la distribución del campo, las etiquetas en el recuadro muestran los diferentes modelos instalados y los círculos en blanco muestran la posición futura de cada heliostato. Para identificar cada uno de los heliostatos se enumeraron empezando con los que se encuentran en la base de la torre hasta la última hilera. En la figura 4.5 se muestra la enumeración para los que ya están instalados.

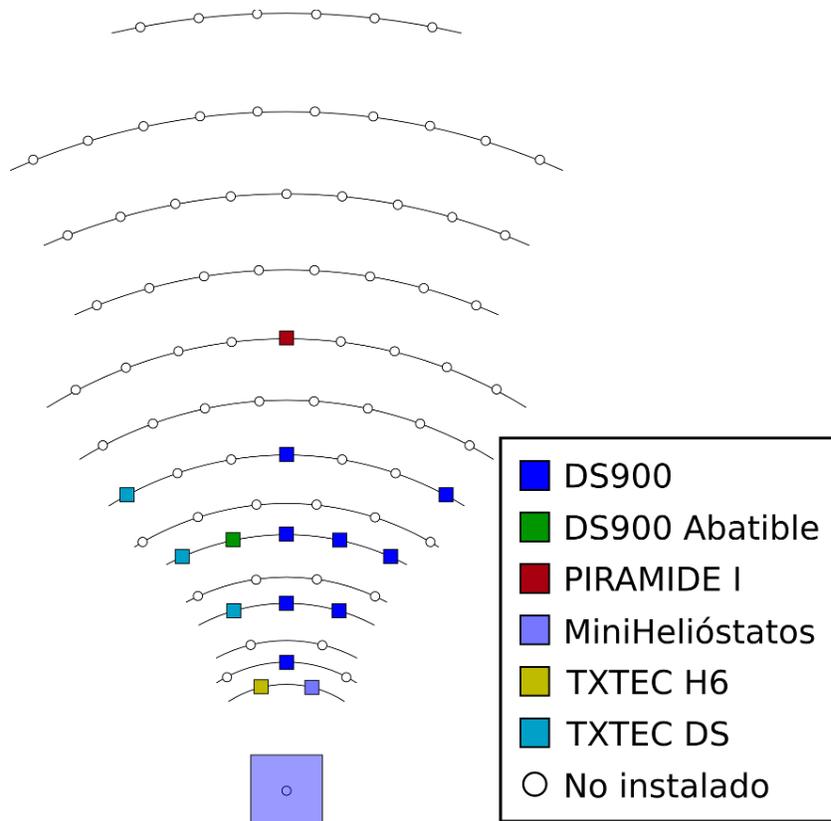


Figura 4.4 Distribución del campo de heliostatos.

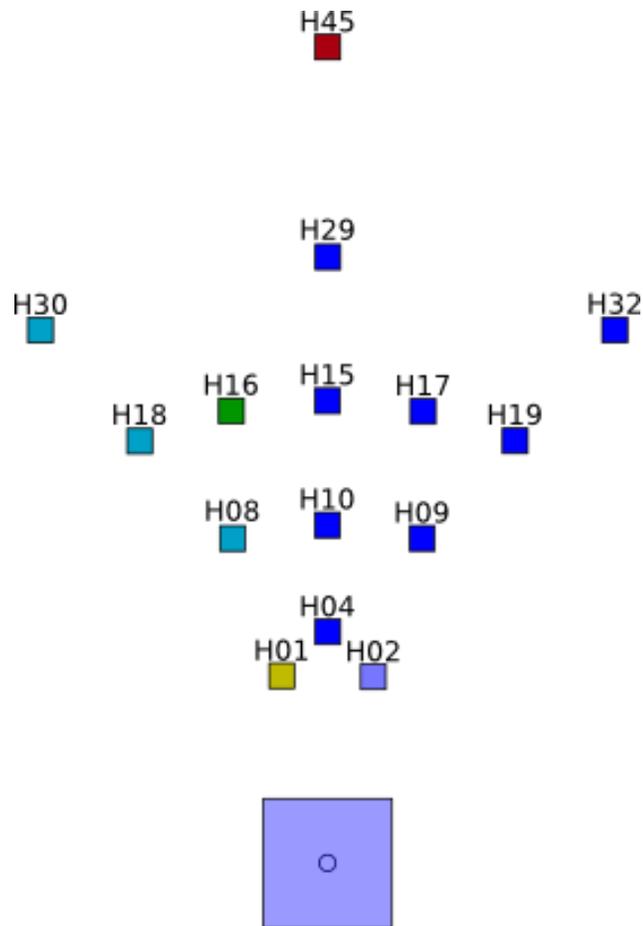


Figura 4.5 Enumeración de heliostatos.

En total el número de Helióstatos instalados fue de 15, divididos en 6 modelos diferentes:

- UNISON-TX-H6

Fue el primer helióstato instalado en el campo, es de 6 m^2 de área y cuenta con comunicación inalámbrica (WiFi) para su control y también un sistema de abastecimiento energético en base a fotoceldas.

- UNISON-MC-H1.5

Cluster de 9 heliostatos con una área total de 13.5 m^2 , diseño de fácil fabricación para producción en masa y sin necesidad de maquinaria pesada.

- UNISON-TX-H36

Mejora del Helióstato UNISON-TX-H6 rediseñado para 36 m^2 , igualmente cuenta con sistema fotovoltaico y comunicación inalámbrica (Zigbee).

- UNAM-36-A
Mejora sustancial del modelo TXTEC DS, reforzado para soportar estructuras pesadas de sujeción de espejo. Cuenta con un sistema de control por medio de un módulo NI cRIO, una comunicación alámbrica (Ethernet) y una alimentación por medio de tendido eléctrico.
- UNAM-36-B
Rediseño del modelo UNAM-36-A, para que sus espejos descansen con la cara viendo al piso y no al cielo, con fines experimentales de mantenimiento.
- UNAM-36-C
Primer helióstato de 36 m² totalmente Mexicano, con un cabezal diseñado y construido por la empresa PIRAMIDE. Instalado para su evaluación en el CPH.

4.6.1 Helióstatos UNAM-36-A

La mayor parte de helióstatos instalados son el modelo UNAM-36-A, debido principalmente a las mejoras realizadas y a su buena estabilidad en funcionamiento. Las pruebas de deriva fueron realizadas sobre este conjunto de helióstatos por lo que se explica a detalle su teoría de operación y construcción.

4.6.1.1 Sistema Controlador en Helióstato

El hardware de control se basa en un controlador de campo de la marca National Instruments, el controlador es un NI cRIO-9074 con las siguientes especificaciones:

- Sistema robusto y embebido de monitoreo y control.
- Procesador industrial en tiempo real de 400 MHz para control, registro de datos y análisis.
- Chasis FPGA con compuertas de 2 M y 8 ranuras para tarjetas periféricas, temporización, control y procesamiento de E/S personalizados.
- Dos puertos Ethernet 10/100BASE-T; puerto serial RS232 para conexión a periféricos.
- Rango de temperatura de operación de -20 a 55 °C; una sola entrada de suministro de potencia de 19 a 30 VDC.

Controla los motores de Acimut y Elevación a través de tarjetas NI-9505, que es esencialmente un *drive* de puente H para control de motores de corriente continua, con conexión de retroalimentación por medio de *encoder*, sus características principales son:

- Corriente continua hasta 5 A @ 40 °C (o 1 A @ 70 °C) a 30 V.
- *Drive* de servo motor con puente H completo con una interfaz de codificador y sensor de corriente integrados.
- Control de velocidad y torque por medio de PWM (*Pulse Width Modulation*).
- Conectividad directa a actuadores - motores servo de DC de potencia fraccional, relés, lámparas.

La retroalimentación en posición se lleva a cabo a través de un sensor óptico tipo *encoder* de la marca OMRON modelo E6B2-CWZ1X, con una resolución de 2,000 pulsos por revolución y conectado directamente a la flecha del motor. La figura 4.6, muestra el diagrama de bloques del sistema de control en el helióstato.

El motor es de la marca BODINE para los movimientos de acimut y elevación, se alimenta de 24 Vdc y cuentan con una potencia de 1/17 de HP unos 44 Watts. Se utilizaron diferentes modelos con fines de evaluación, la configuración actual se presenta en la tabla 4.1.

También requiere de un sensor de posición inicial (cero) de referencia, para calibración del origen angular de partida, para el ángulo de Elevación (α_h) y de Acimut (δ_h), el modelo seleccionado fue E2A-M12KN08-WP, de la marca OMRON, que proporcionará un error máximo de +/- 0.05 grados de arco en elevación y +/- 0.07 grados de arco en acimut. Además cuenta con interruptores límite para accionar en caso de falla del sistema y deshabilitar la energía del mismo.

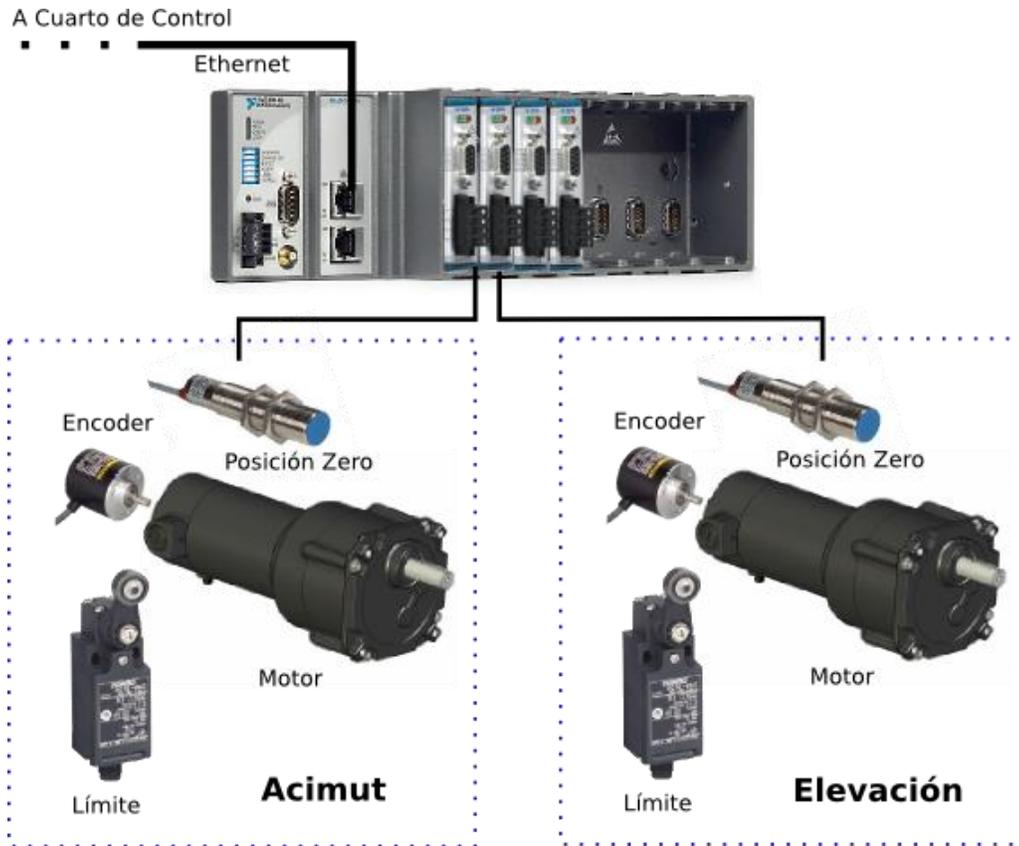


Figura 4.6 Diagrama de bloques de los elementos de control del heliostato.

Tabla 4.1 Configuración de heliostatos y tipos de motores.

Heliostato	Movimiento	N4957 (6:1)	N4958 (12:1)	N4959 (18:1)	N4960 (30:1)
H04	Acimut	X			
	Elevación			X	
H09	Acimut	X			
	Elevación		X		
H10	Acimut	X			
	Elevación		X		
H15	Acimut	X			
	Elevación				X
H16	Acimut	X			
	Elevación				X
H17	Acimut	X			
	Elevación			X	
H19	Acimut	X			
	Elevación		X		

H29	Acimut	X			
	Elevación				X
H32	Acimut	X			
	Elevación		X		
H45	Acimut		X		
	Elevación		X		

Cada cRIO tiene la capacidad de controlar 3 heliostatos, debido principalmente a sus ranuras de expansión y a la capacidad de procesamiento en los módulos FPGA así como en las rutinas de tiempo real. Entonces, el Campo de Heliostatos se encuentra segmentado de acuerdo a lo mostrado en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Segmentación del Campo de Heliostatos por cada cRIO.

CPH1	cRIO que controla los Heliostatos H04, H09 y H10
CPH2	cRIO que controla los Heliostatos H17, H19 y H32
CPH3	cRIO que controla los Heliostatos H15, H16 y H29
CPH4	cRIO que el Heliostato H45

4.6.1.2 Cabezal Articulado

El cabezal es la pieza mecánica principal de un heliostato, debido a que en ella recae el peso total de la estructura donde se encuentra el encamado de facetas y debe soportar ráfagas de vientos por lo menos de 120 km/hr. Además de tener la capacidad de articular toda esta estructura en dos dirección que son acimut y elevación, el movimiento de acimut debe ser de +/- 180 ° y el de elevación de 0-85°. Esta pieza fue diseñada y fabricada por la empresa Winsmith, la figura 4.7 muestra un dibujo tridimensional del cabezal.

Para el movimiento de acimut, se usa una transmisión de la compañía Perfection Gear, formada por tres etapas de tornillos sin fin y una corona.

El actuador lineal fue desarrollado por la empresa Joyce-Dayton. En sus especificaciones

tenemos que la relación de transferencia de distancia por vueltas de motor, medido en Vuelta por Pulgada o TPI (*Turn Per Inch*) es: $TPI = 264$.

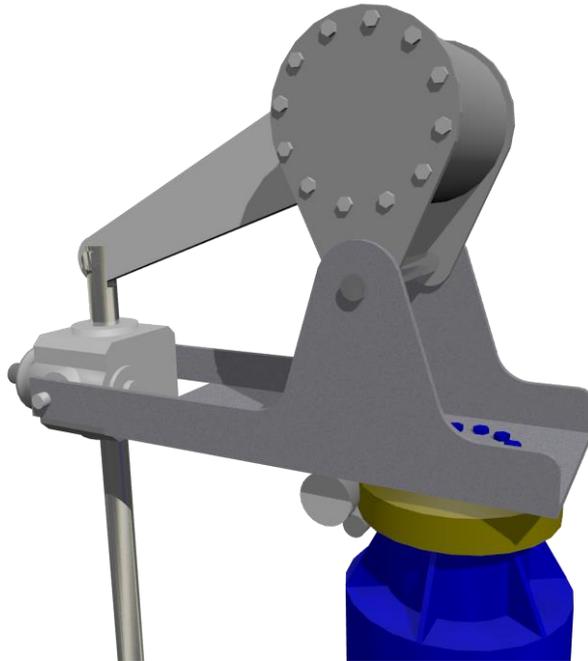


Figura 4.7 Cabezal Helióstato UNAM-36-A.

4.6.1.3 Estructura Tubular para Encamado de Facetas

La estructura está diseñada para albergar 25 facetas de 1.2 x 1.2 m, cubriendo una área total de 36 m², y un peso máximo aproximado de 1,500 Kg. El hecho de implementar el sistema en base a facetas es debido principalmente a la concentración de los rayos solares, es decir, cada una de las facetas se alinea de forma independiente para converger en un punto focal localizado en el cuarto de calentamiento en lo alto de la torre central. Al proceso de inclinar cada una de las facetas se le conoce como “**Canteo**”.

El canteo se realiza de forma manual en cada una de las facetas. Es un procedimiento que requiere bastante esfuerzo físico y actualmente se realiza expuesto al sol con el helióstato en modo seguimiento. El canteo de un helióstato es fundamental para una buena concentración de la radiación directa, en lo alto de la torre.

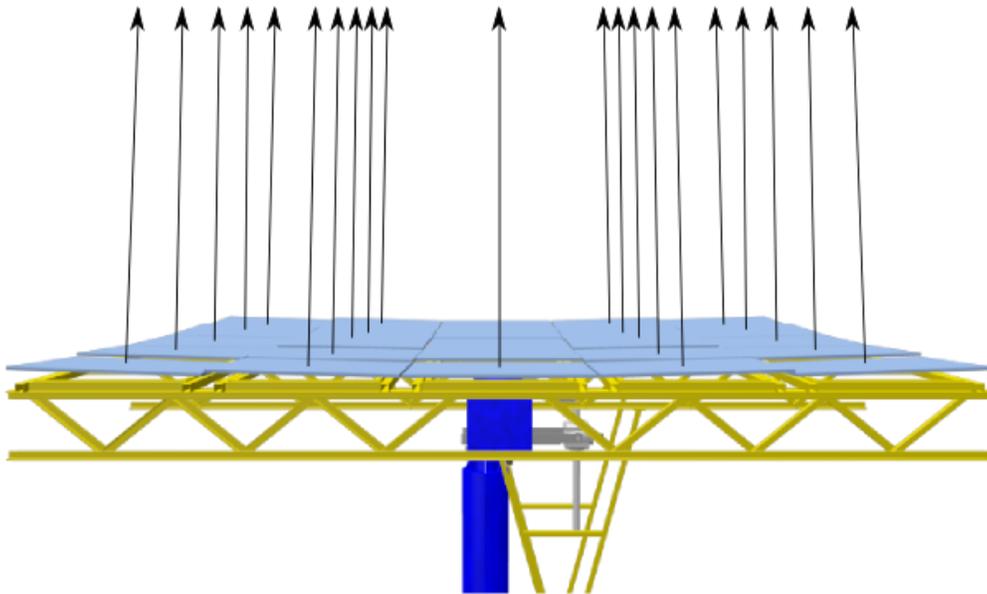


Figura 4.8 Normales de cada faceta en un heliostato cantado.

4.7 Laboratorio de Control

En el laboratorio de control se encuentran dos equipos de cómputo principales con funciones distintas, uno se encarga del control del campo de heliostatos (sistema de control principal) y el otro se encarga de la captura y procesamiento de imágenes (sistema de visión) con las características mostradas en la tabla 4.3.

Cada uno de estos sistemas cuenta con doble pantalla de visualización y escritorio extendido.

Tabla 4.3 Características del sistema principal de control y del sistema de visión.

Sistema de Control Principal (pc1)	Sistema de Visión (pc2)
Procesador Intel Core 2, 4 núcleos, 2.34 GHz.	Procesador Intel Core i3, 2 núcleos, 3.02 GHz.
3 Gigabytes de Memoria RAM	4 Gigabyte de Memoria RAM
Windows Vista, 32 bits	Windows 7, 32 bits
LabVIEW 2009	LabVIEW 2009
	Vision Assistant 2009

4.8 Red de Comunicación en Campo

El sistema red instalado en el campo es el protocolo IEEE-802.3, implementado en Fast-Ethernet, con conmutadores (*switches*) de la marca “Extreme Network” modelo 15205, con capacidad de alimentación por red (POE, *Power Over Ethernet*) y una conexión *backbone* a través de fibra óptica, la figura 4.9 muestra el esquema de comunicaciones.

Los controladores CPH1, CPH2, CPH3, CPH4 se conectan a la red Ethernet a través del conmutador instalado en campo, cada uno de ellos cuenta con un controlador cRIO descrito en la sección 4.6.1.1. Mientras que H02 también se conecta por Ethernet y cuenta con un sistema de control basado en PC; H08, H18 y H30 se comunican a través del protocolo de comunicación IEEE 802.15.4 mejor conocido como Zigbee, que establece comunicación al cuarto de control mediante una antena principal. Por último tenemos al H02 cuyos motores se conectan directamente al ruteador Wifi del cuarto de control. Dentro del cuarto de control las computadoras de control (pc1) y de visión artificial (pc2) se conectan a través de Ethernet.

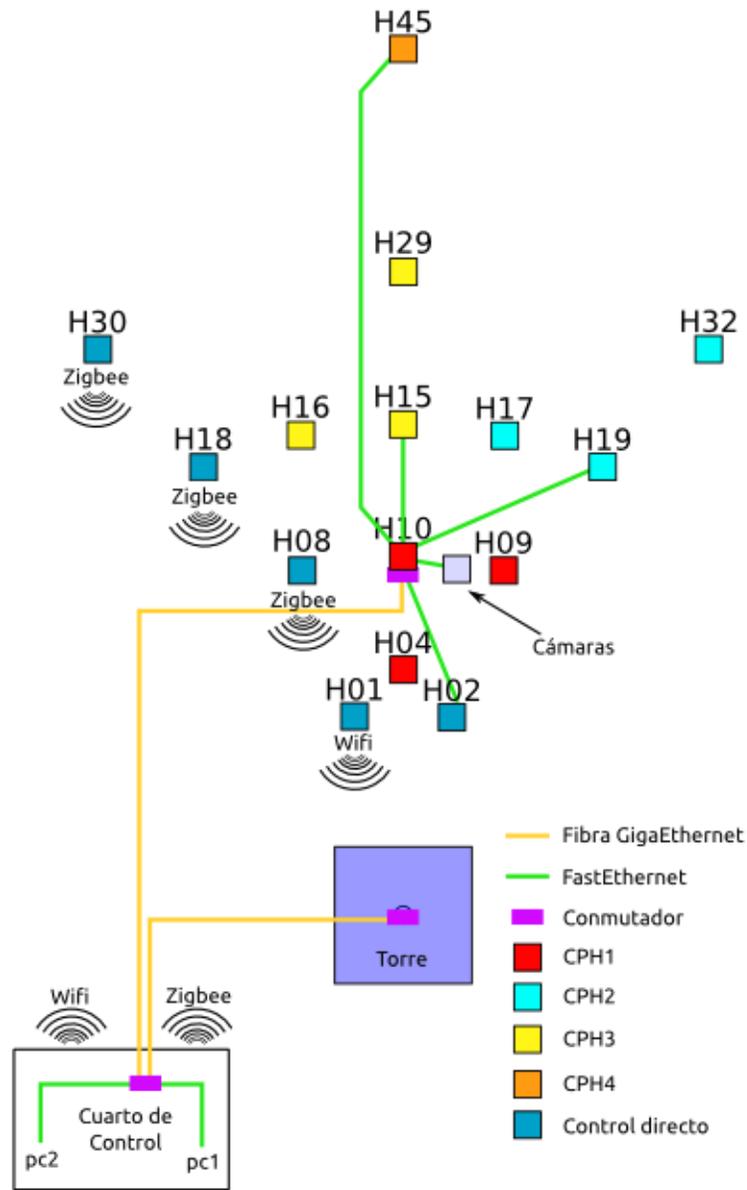


Figura 4.9 Esquema de comunicación en campo.

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL SISTEMA SCADA

Para tener un control y poder supervisar los valores en tiempo real de cada uno de los helióstatos se desarrolló un sistema SCADA, el cual cuenta con un control central, con sistemas remotos instalados en cada helióstato y la estación solarimétrica con las variables de concentración solar. Con todo este conjunto de módulos se tiene control en tiempo real de cada helióstato y monitoreo de variables de entrada como son: Cálculo de posición solar, Radiación directa actual, Radiación global, Velocidad de viento, Concentración solar (Gardon), variables de control del helióstato y estado de motores, así como el registro diario de información experimental.

Fue necesario el uso extensivo de los controladores cRIO en modo FPGA para los sistemas que requieren alta velocidad y determinismo, así como para el control de posición en los motores de acimut y elevación, el manejo de datos para su almacenado, visualización y transporte por la red mediante las rutinas de software internas de LabVIEW. El uso de paquetes matemáticos como Octave [22] fueron de gran utilidad para validar el desarrollo de las ecuaciones vectoriales y el análisis de datos obtenidos, a continuación se explica el trabajo realizado para la automatización del campo de helióstatos.

5.1 Linealización del Ángulo de Elevación

Para el ajuste del ángulo de elevación (α_h) del helióstato se utilizó trigonometría básica, los elementos requeridos fueron los puntos de apoyo del actuador lineal Joyce/Dayton y el eje de rotación como se muestra en la figura 5.1. Los elementos que definen la configuración de la elevación en la figura 5.1 son los siguientes:

- b , Distancia del brazo al eje de rotación,
- f , Distancia del punto de apoyo del actuador lineal al eje de rotación,
- p , Longitud del actuador lineal Joyce/Dayton,
- α_h , Altura del helióstato,
- ρ_h , Apertura angular del actuador lineal,
- ρ_{h0} , Apertura inicial del actuador cuando $\alpha_h = 90^\circ$.

Entonces, el ángulo de elevación del helióstato α_h estará definido por:

$$\alpha_h = 90^\circ - (\rho_h - \rho_{h0}) \quad (5.1)$$

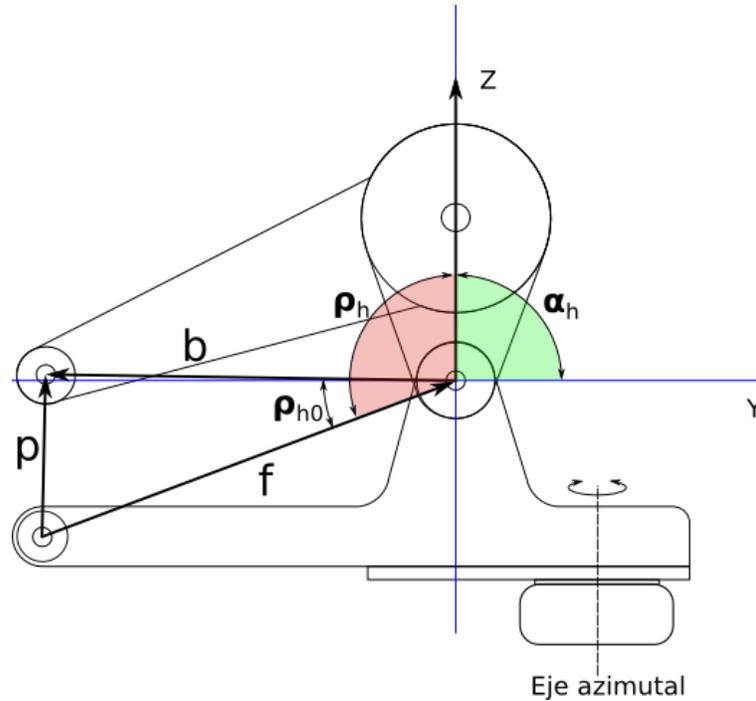


Figura 5.1 Diagrama de configuración de elevación DS900.

Evaluando con identidades trigonométricas tenemos que:

$$\rho_h = \arccos \left(\frac{p^2 - b^2 - f^2}{-2bf} \right) \quad (5.2)$$

El valor de ρ_{h0} se obtiene en el momento de la calibración del heliostato en elevación con una p inicial que puede variar para cada heliostato, dependiendo de la instalación de la faceta central. Para el caso del heliostato H10: $p_{inicial} = 10.75 \text{ in}$ y $\rho_{h0} = 20.792^\circ$.

Sustituyendo (5.2) en (5.1) y agregando los valores iniciales de H10 tenemos:

$$\alpha_h = 110.792^\circ - \arccos \left(\frac{p^2 - b^2 - f^2}{-2bf} \right) \quad (5.3)$$

La ecuación inversa que define p a partir de (5.3) es,

$$p = \sqrt{f^2 b^2 f b \cdot \cos(\alpha_h - 110.792^\circ)} \quad (5.4)$$

La gráfica de p en función de α_h para el heliostato H10 se presenta en la figura 5.2.

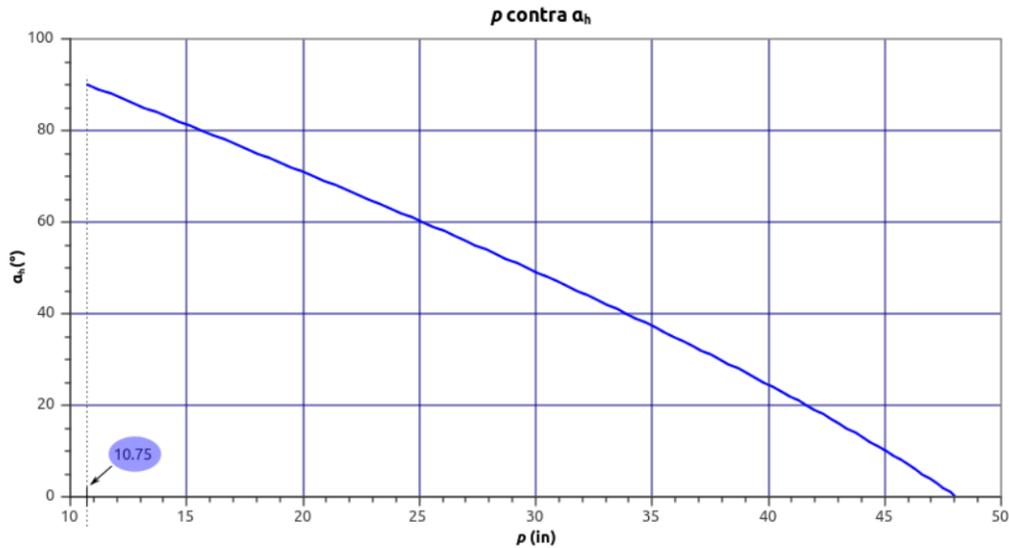


Figura 5.2 Valores de p (in) versus α_h grados.

5.2 Apuntamiento del Heliostato UNAM-36-A

El apuntamiento de una superficie reflectiva para trasladar los rayos del sol hacia un punto específico en el espacio queda acotado por la ley de reflexión de Snell y que vectorialmente se soluciona con la ecuación (3.6) debido a que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. Esa ecuación funcionaría muy bien si los ejes de rotación de los heliostatos se encontraran en el vértice de reflexión, lo cual no sucede para el caso de los heliostatos UNAM-36-A. A continuación se muestra el análisis desarrollado para el cálculo de la reflexión.

5.2.1 Resolución de Ecuaciones Vectoriales

La figura 5.3, muestra un diagrama de los elementos involucrados en el cálculo de reflexión. La ley de reflexión de Snell está definida por las ecuaciones (5.5) y (5.6).

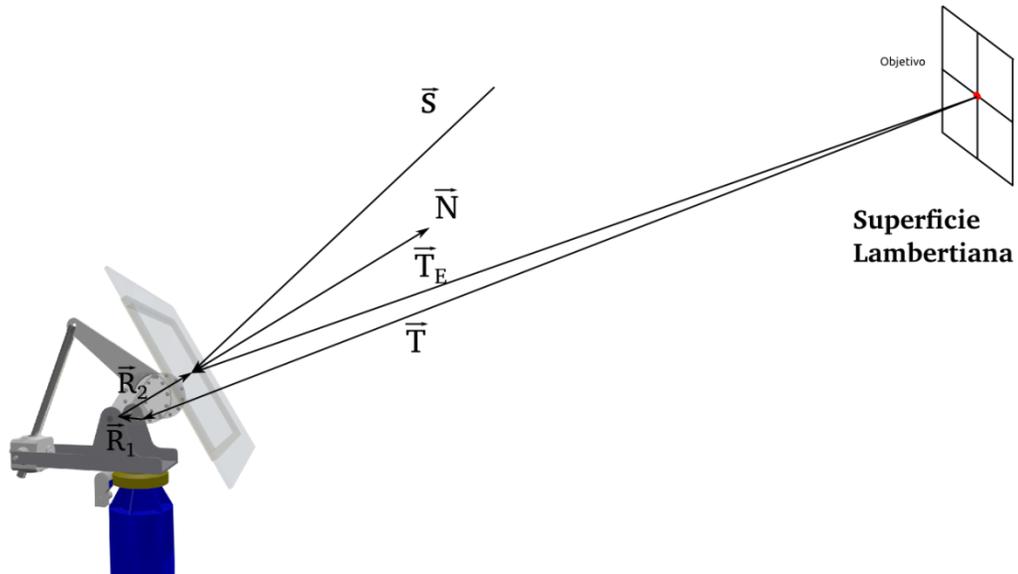


Figura 5.3 Elementos involucrados en el análisis de apuntamiento del heliostato DS-900 UNAM.

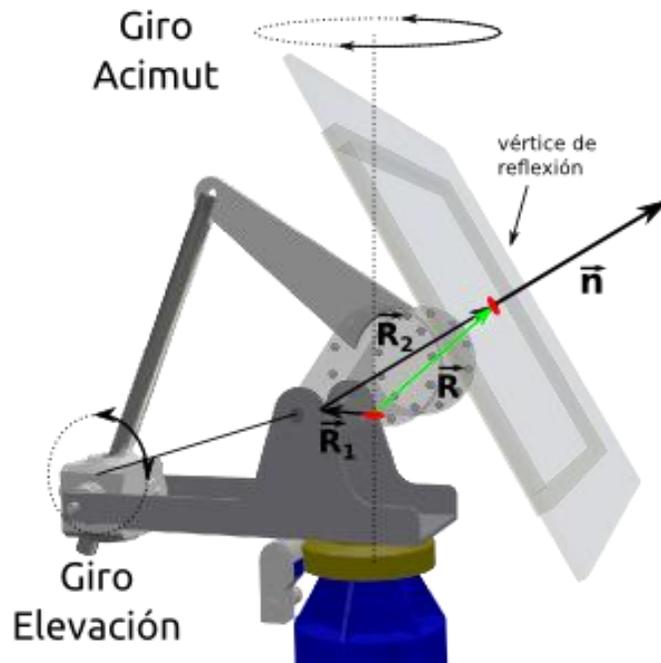


Figura 5.4 Vectores de rotación R_1 y R_2 para heliostato DS-900 UNAM.

$$\frac{\vec{S} \cdot \vec{N}}{|\vec{S}||\vec{N}|} = \frac{\vec{T}_E \cdot \vec{N}}{|\vec{T}_E||\vec{N}|} \quad (5.5)$$

$$(\vec{S} \times \vec{N}) \cdot \vec{T}_E = 0 \quad (5.6)$$

La ecuación (5.5) relaciona el ángulo de incidencia formado por los vectores \vec{S} y \vec{N} el cuál es igual al ángulo de reflexión formado por \vec{N} y \vec{T}_E . La ecuación (5.6) delimita al vector de reflexión \vec{T}_E a coplanaridad con el vector de incidencia formado por \vec{S} y \vec{N} .

Los vectores \vec{R}_2 y \vec{N} tienen la misma dirección y sentido, entonces:

$$\frac{\vec{R}_2}{|\vec{R}_2|} = \frac{\vec{N}}{|\vec{N}|} \quad (5.7)$$

Realizando la sustitución de (5.7) en (5.5) y (5.6), tenemos:

$$\frac{\vec{S} \cdot \vec{R}_2}{|\vec{S}||\vec{R}_2|} = \frac{\vec{T}_E \cdot \vec{R}_2}{|\vec{T}_E||\vec{R}_2|} \quad (5.8)$$

$$(\vec{S} \times \vec{R}_2) \cdot \vec{T}_E = 0 \quad (5.9)$$

La suma de los vectores \vec{R}_1 y \vec{R}_2 forma \vec{R} que es la diferencia existente entre el centro de giro y vértice de reflexión del heliostato figura 5.4.

$$\vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 \quad (5.10)$$

Otra condición a tomar en cuenta es la restricción del diseño mecánico entre \vec{R}_1 y \vec{R}_2 , debido a que ambos vectores siempre generan un plano coplanar con el vector Z, por lo que:

$$(\vec{R}_1 \times \vec{R}_2) \cdot (0,0,1) = 0 \quad (5.11)$$

De la figura 5.4 podemos observar que

$$\vec{T}_E = \vec{T} + \vec{R} \quad (5.12)$$

o bien, substituyendo (5.10) en (5.12),

$$\vec{T}_E = \vec{T} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2. \quad (5.13)$$

Substituyendo (5.13) en (5.8) y (5.9) se obtienen las ecuaciones:

$$\frac{\vec{S} \cdot \vec{R}_2}{|\vec{S}||\vec{R}_2|} = \frac{(\vec{T} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2) \cdot \vec{R}_2}{|\vec{T} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2||\vec{R}_2|} \quad (5.14)$$

$$(\vec{S} \times \vec{R}_2) \cdot (\vec{T} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2) = 0 \quad (5.15)$$

Los vectores \vec{R}_1 y \vec{R}_2 representan piezas mecánicas de magnitud constante por lo tanto:

$$\begin{aligned} |\vec{R}_1| &= \text{constante} \\ |\vec{R}_2| &= \text{constante} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Por restricción mecánica R_1 rota solo en el plano XY, por lo que no tiene componente en el eje Z, tenemos:

$$r_{1,z} = 0. \quad (5.17)$$

Considerando \vec{S} de valor unitario y de (3.3), (5.14) se simplifica a,

$$\hat{s} \cdot \vec{R}_2 - \frac{(\vec{T} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2) \cdot \vec{R}_2}{|\vec{T} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2|} = 0 \quad (5.18)$$

Substituyendo los vectores en (5.18) en sus componentes básicas para realizar las operaciones vectoriales tenemos:

$$s_x r_{2x} + s_y r_{2y} + s_z r_{2z} - \left(\frac{r_{2x}(r_{1x} + r_{2x} + t_x) + r_{2y}(r_{1y} + r_{2y} + t_y) + r_{2z}(r_{2z} + t_z)}{\sqrt{(r_{1x} + r_{2x} + t_x)^2 + (r_{1y} + r_{2y} + t_y)^2 + (r_{2z} + t_z)^2}} \right) = 0 \quad (5.19)$$

Desarrollando también las ecuaciones (5.15) y (5.11) en sus componentes básicas, tenemos:

$$s_x(t_z r_{2y} - t_y r_{2z} - r_{1y} r_{2z}) + s_y(t_x r_{2z} - t_z r_{2x} - r_{1x} r_{2z}) + s_z(t_y r_{2x} - t_x r_{2y} + r_{1y} r_{2z} - r_{1x} r_{2y}) = 0 \quad (5.20)$$

$$r_{1y} r_{2x} - r_{1x} r_{2y} = 0 \quad (5.21)$$

Finalmente con las ecuaciones (5.16) tenemos las últimas dos ecuaciones:

$$|\vec{R}_1|^2 - r_{1x}^2 - r_{1y}^2 = 0 \quad (5.22)$$

$$|\vec{R}_2|^2 - r_{2x}^2 - r_{2y}^2 - r_{2z}^2 = 0 \quad (5.23)$$

Con las ecuaciones (5.19), (5.20), (5.21), (5.22) y (5.23) construimos un sistema no lineal de 5 ecuaciones y 5 variables:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{1x}, r_{1y} \\ r_{2x}, r_{2y}, r_{2z} \end{array} \right\}$$

Y las constantes del sistema de ecuaciones son:

$$|\vec{R}_1| = 25 \text{ cm}, |\vec{R}_2| = 50.5 \text{ cm}$$

$$\text{El vector solar: } \hat{s} = s_x + s_y + s_z$$

$$\text{Las coordenadas base del heliostato: } \hat{t} = t_x + t_y + t_z$$

5.2.2 Método Iterativo

El método descrito en la sección anterior encuentra una solución matemática exacta al problema del apuntamiento del heliostato, pero lleva consigo una carga de procesamiento matemático para la solución del sistema de cinco ecuaciones no lineales que al final debe resolverse por métodos numéricos de aproximaciones sucesivas. Se requiere un punto inicial de partida y posiblemente no se encuentre convergencia aún y cuando el resultado realmente exista.

Realizando un análisis al planteamiento del problema podemos encontrar un método iterativo para la solución del sistema utilizando las ecuaciones iniciales (3.5) y (3.6), que encuentran la normal a apuntar cuando el heliostato tiene los ejes de giro y vértice de reflexión en una misma posición espacial, que en la práctica es un reto para el diseño mecánico y el costo del sistema.

Primeramente contamos con el dato inicial de las coordenadas del heliostato (x, y, z) o \vec{T} con el que podemos calcular una \vec{n} con la ecuación (3.5) y (3.6).

Una vez conocida \vec{n} podemos encontrar el vector \vec{R} , básicamente nos da como resultado la posición del vértice de reflexión a partir del vértice de giro del heliostato, pudiendo encontrar \vec{R} en base a las ecuaciones (5.7) y (5.10). Para el término de \vec{R}_1 tenemos que tiene el sentido negativo de \vec{n} pero sin la componente n_z ; la eliminación de la componente n_z se representa con una resta del producto punto de \hat{n} con el eje Z en la dirección de mismo eje \hat{z} ,

$$\vec{R} = \hat{n}|\vec{R}_2| - \frac{\hat{n} - (\hat{n} \cdot \hat{z})\hat{z}}{|\hat{n} - (\hat{n} \cdot \hat{z})\hat{z}|} |\vec{R}_1| \quad (5.24)$$

Con este valor de \vec{R} se pueden obtener los ángulos que el heliostato debe tener, pero tendríamos un error en el apuntamiento de la magnitud de la proyección de \vec{R} en el plano de la superficie lambertiana, que dependerá de las magnitudes de \vec{R}_1 y \vec{R}_2 , la figura 5.5, muestra el error que se obtendría (ε).

El vértice de reflexión real que debe tener el heliostato se ilustra con el punto de color azul,

por último tenemos un nuevo término denominado \vec{T}_s :

$$\vec{T}_s = \vec{T} + \vec{R} \quad (5.25)$$

\vec{T}_s se encuentra mucho más cercano al vértice de reflexión por lo que si se calcula nuevamente la bisectriz, pero ahora con el nuevo valor de \vec{T}_s , obtendremos un error (ϵ) menor cada vez que obtengamos una nueva \vec{T}_s .

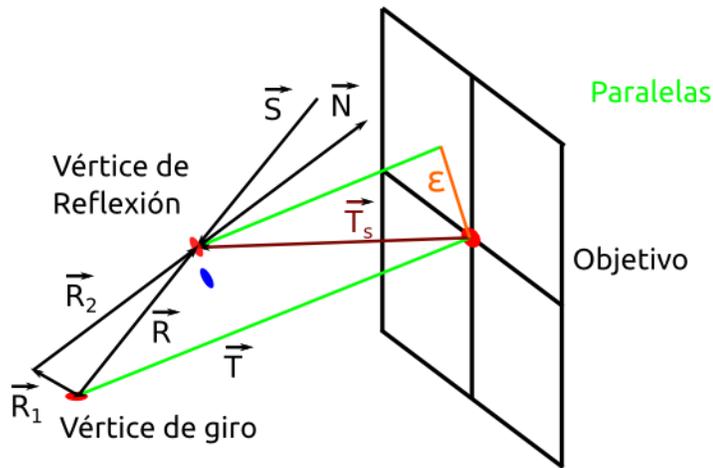


Figura 5.5 Cálculo básico de bisectriz del Heliostato UNAM-36-A.

Reescribiendo las ecuaciones (3.5), (3.6), (5.7), (5.10), (5.24) y (5.25), para uso iterativo tenemos: Con condición inicial: $\vec{T}_{(0)} = \vec{T}$ Coordenadas base del heliostato y para $n > 0$:

$$\begin{aligned} \hat{t}_{(n-1)} &= \frac{\vec{T}_{(n-1)}}{|\vec{T}_{(n-1)}|} \\ \vec{n}_{(n-1)} &= \frac{-\hat{t}_{(n-1)} - \vec{S}}{|-\hat{t}_{(n-1)} - \vec{S}|} \\ \vec{R}_{(n-1)} &= \vec{n}_{(n-1)} |\vec{R}_2| - \frac{\vec{n}_{(n-1)} - (\vec{n}_{(n-1)} \cdot \hat{z}) \hat{z}}{|\vec{n}_{(n-1)} - (\vec{n}_{(n-1)} \cdot \hat{z}) \hat{z}|} |\vec{R}_1| \\ \vec{T}_{(n)} &= \vec{T}_{(0)} + \vec{R}_{(n-1)} \end{aligned} \quad (5.26)$$

En la figura 5.6 se puede apreciar de forma gráfica la rápida convergencia de este método.

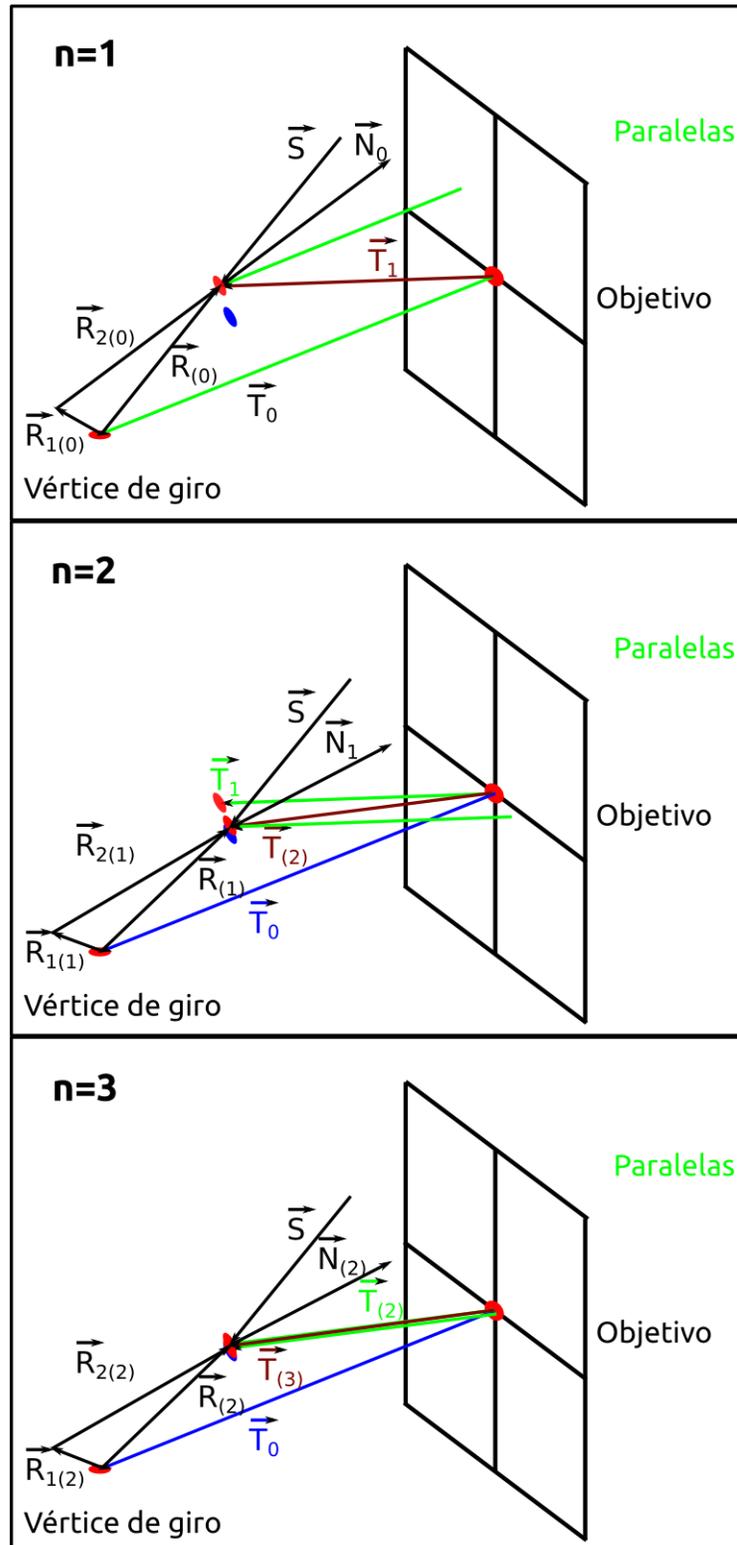


Figura 5.6 Convergencia del método iterativo.

5.3 Sistema de Control Supervisorio (SCADA)

Para el desarrollo del sistema SCADA se utilizó en la computadora central el software LabVIEW y en hardware los sistemas remotos utilizados fueron los cRIO NI-9074.

Una ventaja de utilizar este sistema SCADA es la versatilidad de operación, diseño y modificación del mismo, gracias a la programación remota ya que una vez instalado en campo un cRIO, en caso de modificaciones no hay necesidad ir a programarlo “in situ”, se pueden realizar modificaciones desde el cuarto de control en la computadora central.

El cRIO cuenta con un sistema operativo en tiempo real (RTOS) vxWorks® y es capaz de ejecutar un programa desarrollado y compilado en LabVIEW de forma independiente, compartiendo variables en tiempo real con la computadora central. De esta forma, el cRIO se encarga de ejecutar rutinas de control y adquisición de datos de forma determinística, mientras que la computadora central realiza la entrada y el despliegue de información de configuración, control y sensado, así como del almacenado en archivos para su posterior análisis. La figura 5.7 muestra el esquema de operación conocido como “arquitectura de comunicación continua” en LabVIEW®.

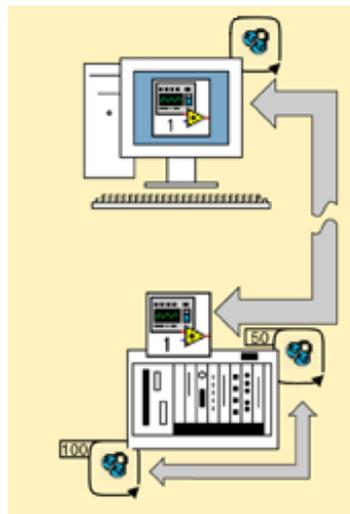


Figura 5.7 Arquitectura de comunicación continua.

El sistema queda dividido en dos partes principales:

- El programa SCADA central instalado en la computadora central.
- Los programas remotos instalados en los cRIO (denominados CPH1, CPH2, CPH3, CPH4 y Estación solarimétrica).

5.3.1 SCADA Central

El programa SCADA desarrollado cuenta con las siguientes funciones:

- Control de usuarios.
- Configuración de variables del proceso (coordenadas de helióstatos y coeficientes).
- Monitoreo de variables de control (posición angular de helióstatos, corrientes consumidas en motores de acimut y elevación).
- Monitores de variables climáticas y solarimétricas.
- Monitoreo y almacenamiento de variables experimentales (temperaturas, concentración solar).

La figura 5.8 muestra el diagrama de flujo general del programa del sistema SCADA, se explica paso a paso a continuación:

Primeramente es necesario ingresar la información de configuración del campo: las coordenadas de los helióstatos (x,y,z) con respecto al centro del blanco lambertiano $(0,0,0)$, fecha y hora (preferentemente sincronizadas con un sistema servidor primario, en CPH lo sincronizamos con CENAM). La referencia de las coordenadas de los helióstatos se muestra en la figura 5.9.

Una vez inicializado el sistema lo que hace es monitorear la velocidad del viento para saber si es permisible la operación de los helióstatos.

Se procede a seleccionar los helióstatos para el experimento de ese día.

Se inicia la corrida y se configuran los helióstatos seleccionados a modo automático.

Se inicializan las variables de velocidad de motores al 100% y las coordenadas objetivo del blanco lambertiano $(0,0,0)$.

Cuando los sistemas remotos detectan que las variables de modo de operación de los

helióstatos están en automático inician la siguiente secuencia:

- Con la fecha y hora del sistema se calcula el vector solar en base al método de Grena descrito en la sección 3.4.
- Con las coordenadas objetivo y el vector solar se calcula la posición angular objetivo del helióstato(n) de forma iterativa descrito en sección 5.2.2.
- Con la posición angular objetivo y la posición actual se calcula la velocidad y el sentido de giro de los motores de acimut y elevación.
- Cuando la diferencia de *posición actual* y *posición objetivo* es menor a 0.001 grados de arco, la velocidad se reduce a cero.
- Las variables de *Posición actual*, *Posición Objetivo*, *Corrientes de acimut* y *elevación* se graban en variables compartidas en el sistema central SCADA.

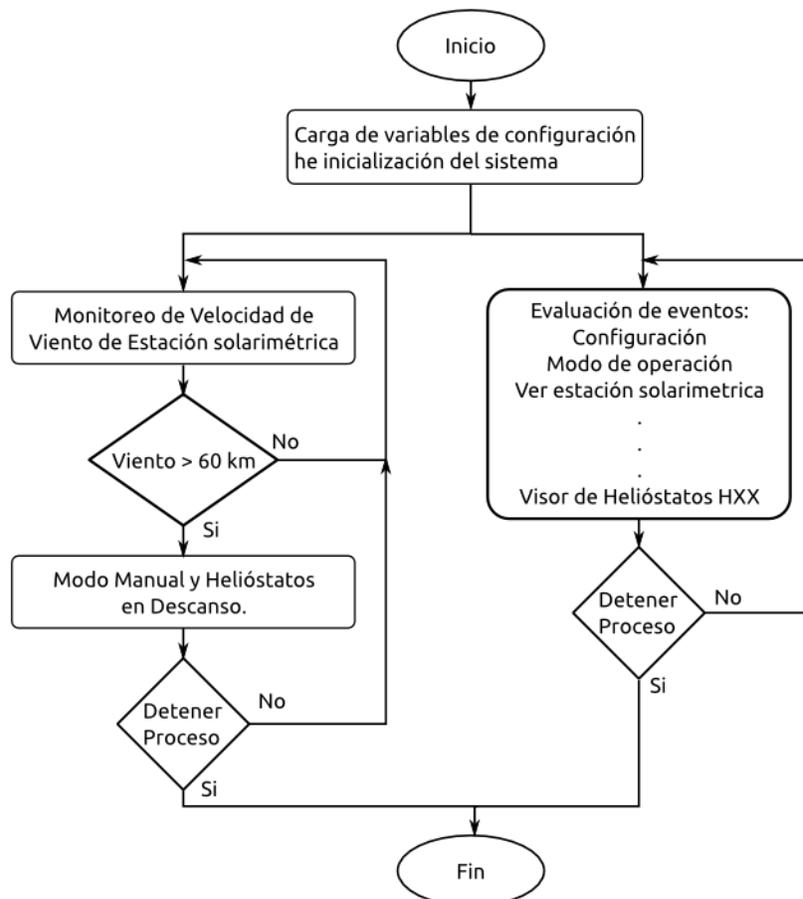


Figura 5.8 Diagrama de flujo SCADA.

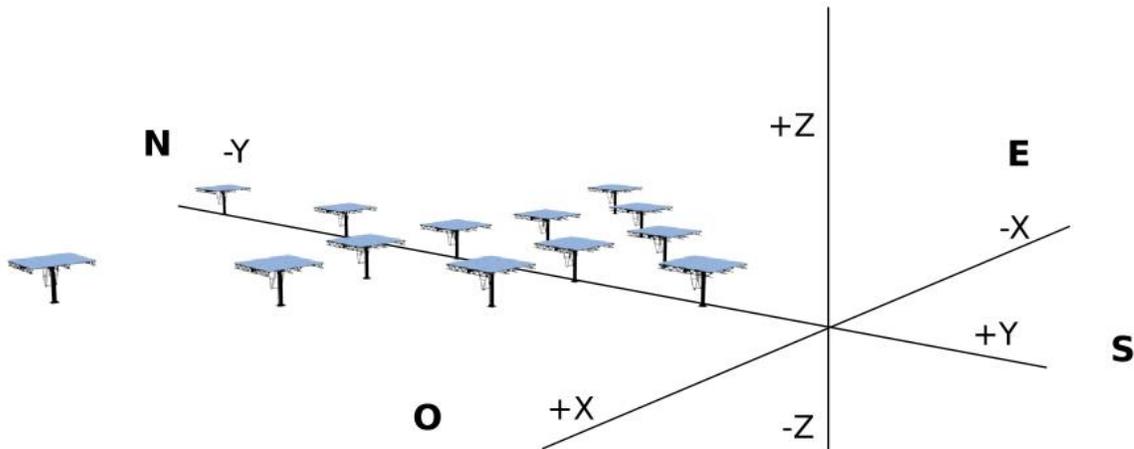


Figura 5.9 Ejes de coordenadas en campo de heliostatos.

En la tabla 5.1, se describen los eventos que controlan las acciones del sistema SCADA central.

Tabla 5.1 Eventos de control del sistema SCADA central.

Evento	Descripción
Configuración	Configuración de la corrida actual (hora de inicio y fin, archivos y selección de heliostatos a trabajar).
Modo seguro	Comando para colocar todos los heliostatos en modo seguro (Descanso).
Paro	Paro de emergencia, detiene la corrida actual de forma abrupta.
Estación Met	Abre la pantalla de Estación Solarimétrica.
Iniciar	Inicia la corrida.
Terminar	Detiene corrida actual.
Cambiar objetivo	Selecciona de un objetivo general para todos los heliostatos.
Panel de control	Pantalla de ingreso y visualización de datos de configuración.
Cerrar	Cierra el sistema por completo.
Helióstato 01... Helióstato 45	Abre la ventana para monitorear las variables de cada helióstato.

El sistema SCADA tiene la capacidad de monitoreo en tiempo real de cada uno de los heliostatos, para esto es necesario abrir la ventana del helióstato especificado, donde se puede ver la *posición actual* y *objetivo* del helióstato, la corrección del *offset* instantánea, las

corrientes de los motores de *acimut* y *elevación*, los controles de modo manual y modo automático (*default*).

Otro proceso que se ejecuta de forma paralela al programa principal es una rutina denominada “objetivos” que tiene la capacidad de apuntar de forma independiente cada helióstato a un objetivo específico, también cuenta con las rutinas para muestreo de Imagen Solar, con el fin de evaluar la deriva y otros procesos; por último cuenta con la rutina de ajuste polinomial de deriva que se explica a detalle en las secciones 6.4 y 6.5.

Con lo que respecta los programas remotos instalados en los cRIO, que denominamos como CPH1, CPH2, CPH3 y CPH4, tienen las funciones de cálculo del vector solar, cálculo de apuntamiento de helióstato (descrito en sección 0), control de motores con retroalimentación de *encoder*, sensores de posición *zero* y de *límite*.

La figura 5.10 muestra el diagrama de flujo del programa remoto. Lo primero que el cRIO realiza es la conexión al sistema central para leer las variables compartidas de *modo de operación*, *velocidad de acimut* y *elevación* y las *coordenadas objetivo* del helióstato. El proceso de compartición de variables entre el cRIO y el sistema central es en base al protocolo de suscripción y publicación de National Instruments (NI-PSP, por sus siglas en inglés, [23]), que en base a *buffers* de entrada y salida aseguran una actualización en tiempo real para la mayoría de los procesos industriales.

Si ese helióstato se encuentra en modo de operación manual, solo se cargan los datos del ángulo fijo de *acimut* y *elevación* y se ejecutan las rutinas de control de posición angular de cada eje.

Si el modo de operación es automático, aquí se procede a calcular el vector solar por medio del algoritmo de Grena (sección 3.4) que nos entrega los ángulos solares *acimut* (γ_s) y *elevación* (α_s) solar, que junto con las *coordenadas objetivo* (T_0), calcula los ángulos del helióstato en *acimut* (γ_h) y en *elevación* (α_h) con el algoritmo de apuntamiento de helióstato (sección 5.2.2).

Con los ángulos del helióstato se procede a controlar la velocidad y sentido de los motores para la obtención del ángulo deseado. Para el ángulo de *acimut* solo es necesaria una conversión proporcional ya que su comportamiento angular es lineal, pero el ángulo de

elevación debe pasar por un proceso de linealización (sección 5.1) para poder utilizarlo en el desplazamiento de los *encoders*.

La función de control es simple, solo encuentra la diferencia que existe entre el ángulo objetivo y el ángulo actual del helióstato, si es mayor a un grado, aplica una velocidad del 100% en los motores, si es menor a un grado aplica el 40% de la velocidad total y cuando el error de posición angular es menor a 0.001 grado, entonces los motores se detienen con una velocidad de 0%.

Por último se actualizan las variables compartidas de posición actual y corriente de motores. Esto se replica para cada uno de los helióstatos que controla cada cRIO, como el caso del cRIO CPH1 que controla los helióstatos H04, H09 y H10.

5.4 Estación Solarimétrica

La finalidad de la estación solarimétrica es contar con información en tiempo real de las variables solarimétricas y ambientales que afecten la concentración solar, así como el almacenamiento de las variables para su posterior análisis.

Es sistema está diseñado en dos etapas, una de adquisición y guardado de datos y otra de despliegue de información en sistema central de control.

El sistema remoto de adquisición y guardado de datos está instalado en un controlado cRIO 9074 con el módulo de servidor FTP habilitado para el acceso a la información histórica del sistema. En la sección 4.2 se describieron las variables solarimétricas y climatológicas del sistema.

El sistema cRIO tiene la capacidad de operar las tarjetas de adquisición en modo FPGA o utilizando las bibliotecas de la SERIE C. Cada modo de operación tiene sus ventajas, si se requiere alta velocidad (menor a milisegundos) en la adquisición de forma determinística, es necesario utilizar el modo FPGA para asegurar que no perderemos ningún dato. El problema que conlleva esto es que los datos entregados por el FPGA son valores de voltaje crudos de información y es necesario aplicarle un factor de conversión por software.

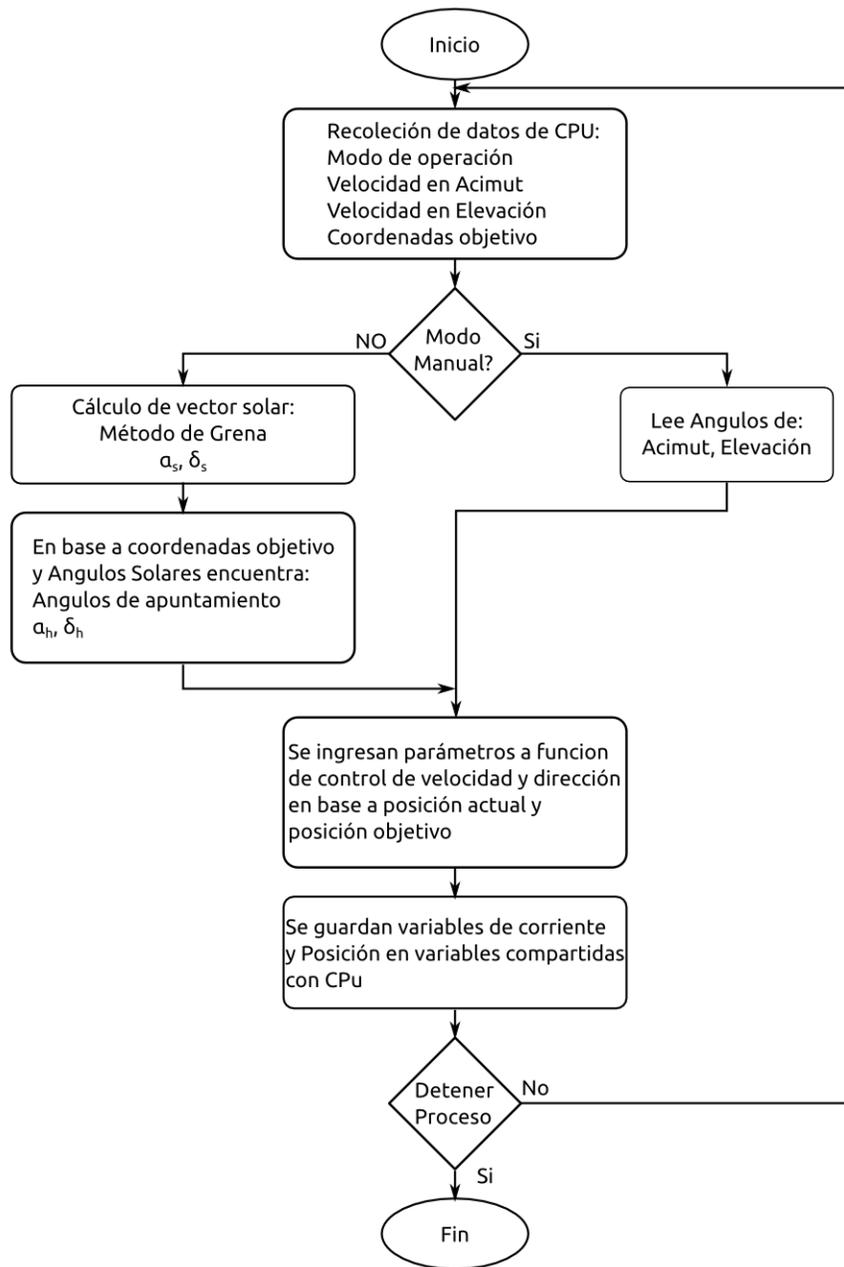


Figura 5.10 Diagrama de flujo del programa remoto en cRIO.

La diferencia de aplicar el uso de SERIE C, es que la configuración de tarjetas se realiza por software y el dato entregado ya cuenta con la linealización correspondiente para el dispositivo conectado (termopar, termistor, rtd pt100) utilizando las rutinas incluidas en LabVIEW de forma automática. La desventaja del uso de SERIE C es que si se requiere alta velocidad de muestreo, el sistema queda limitado a toda la carga que tiene el CPU de cRIO y

en ocasiones pudiera perder información de muestreo.

La estación solarimétrica está configurada en modo híbrido de FPGA y uso de la SERIE C, esto es para aprovechar la alta velocidad del FPGA para el monitoreo de las ráfagas de viento y las rutinas de calibración de la SERIE C para la calibración de sensores como los termopar J, instalados en el receptor térmico de pruebas y los filtros rechazabanda a 60Hz incluidos en esta serie.

5.4.1 Variables y Configuración de Entradas

Para la conexión de los instrumentos se utilizaron las siguientes diferentes tarjetas de entrada:

- NI-9201, Entrada analógica, 8 canales, +/- 10V, 12 bits.
- NI-9211, Entrada de Termopares, 4 canales, +/- 80mV, 24 bits.
- NI-9219, Entrada Analógica Universal, 4 canales, +/- 125mV, 24 bits.

En la tabla 5.2, se muestra como están conectados los sensores solarimétricos a cada una de las tarjetas de entrada antes descritas.

Tabla 5.2 Conexión de los sensores solarimétricos a las tarjetas de entrada.

Variable a sensar	Tipo y niveles de salida	Entrada cRIO
Velocidad de viento (m/s)	Pulsos de 0 y 5 Vdc.	NI-9201
Dirección de viento (°)	Voltaje variable de 0 a 5 Vdc.	NI-9201
Temperatura ambiental (°C)	Termopar J, sensibilidad de 52μV/°C	NI-9211
Temperaturas de RTP(1,2,3) (°C)	Termopar J, sensibilidad de 52μV/°C	NI-9211
Radiación Global (W/m ²)	Piranómetro, variable de 0 a 4000 W/m ²	NI-9219
Radiación Directa (W/m ²)	Pirheliómetro, variable de 0 a 1,400 W/m ²	NI-9219
Radiación Concentrada (W/m ²)	Gardon, hasta 1,700,000 W/m ²	NI-9219

La estación solarimétrica al igual que el sistema SCADA se divide en dos etapas, la de despliegue y configuración que se realiza en el sistema SCADA central y la remota que se

realiza en el cRIO, que básicamente es el núcleo de la estación.

5.4.2 Desarrollo del Sistema

La figura 5.11 muestra el diagrama de flujo de los procesos en la Estación Solarimétrica. Primeramente se activa el módulo del servidor FTP, se lee el archivo de las variables de configuración (periodo de muestreo) y después se ejecutan dos procesos de forma separada, uno para monitorear las variables de entrada de forma determinística y otro para el manejo de archivos.

Como ya se comentó anteriormente, el cRIO está configurado de forma híbrida, para aprovechar la velocidad de procesamiento de los módulos FPGA, esto con la finalidad de medir la variable de velocidad de viento. Esta se calcula midiendo el periodo de los pulsos de entrada, con lo que se obtiene el valor instantáneo de la velocidad de viento.

En la figura 5.12, los tiempos t1, t2, t3 y t4 son los periodos de cada uno de los pulsos del sensor de velocidad de viento, que para convertirlos a velocidad en Km/Hr, se utilizó la ecuación siguiente:

$$Velocidad\ Viento = 7255 \frac{1}{t(ms)} \left(\frac{Km}{Hr} \right) \quad (5.27)$$

La resolución con que se midieron los periodos es de 1 ms y el sistema FPGA cuenta con un reloj de 40 MHz el cual se toma como base para el conteo del período. Con lo que respecta a la entrada de dirección de viento se utilizó el factor de multiplicación mostrado en la ecuación siguiente:

$$^{\circ}arc = \left(1 - \frac{V_{ent}}{5.842} \right) \times 360^{\circ} \quad (5.28)$$

Para entradas de temperatura ambiental y de sensores del blanco de pruebas térmicas se utilizó la herramienta de configuración de LabVIEW de la Serie C, seleccionando el tipo de

termopar utilizado y el resultado entregado por la entrada era la temperatura en °C.

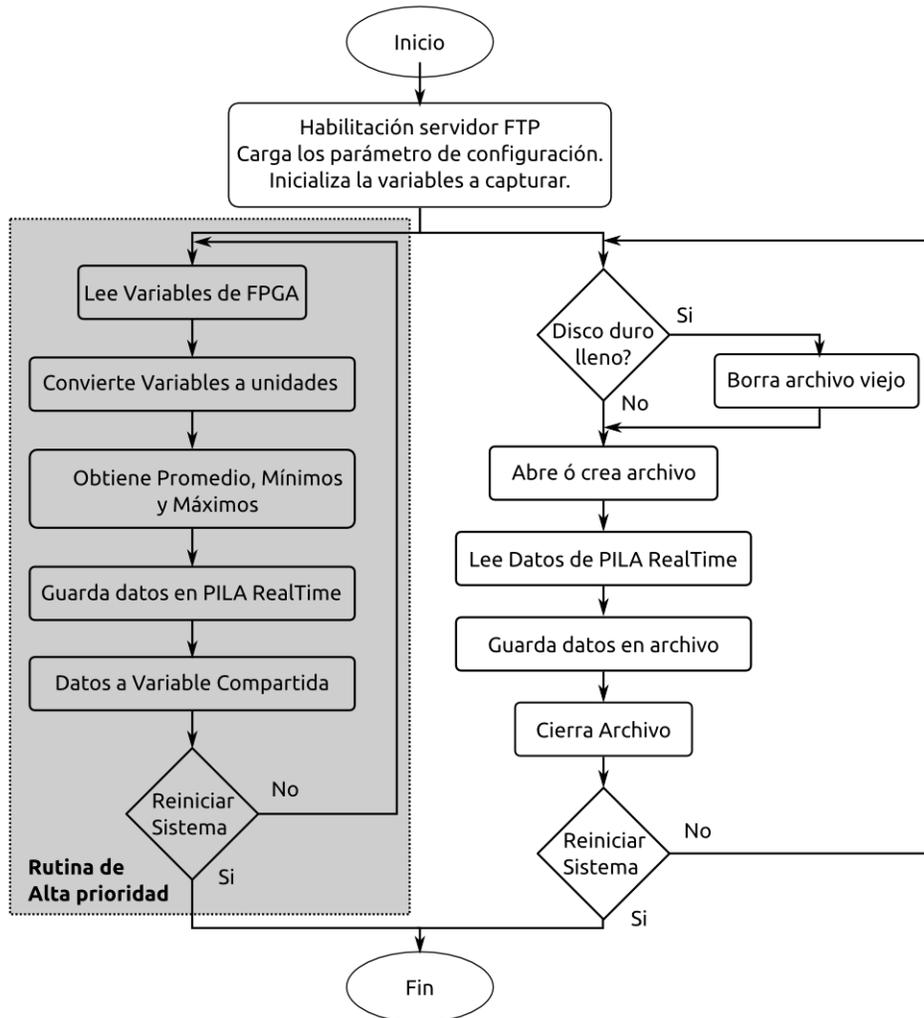


Figura 5.11 Diagrama de Flujo de servidor en Estación Solarimétrica.

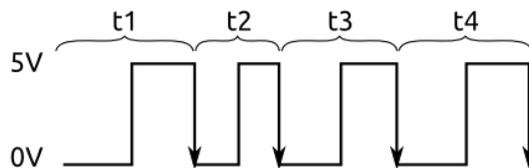


Figura 5.12 Periodo de señal de velocidad de viento.

Para entradas de temperatura ambiental y de sensores del blanco de pruebas térmicas se utilizó la herramienta de configuración de LabVIEW de la Serie C, seleccionando el tipo de termopar utilizado y el resultado entregado por la entrada era la temperatura en °C.

La variable de radiación global se obtuvo de un piranómetro de la marca KPP&ZONEN modelo CM11, con una sensibilidad lineal de: 8.4×10^{-6} (V/Wm⁻²) y un rango de 0 a 4,000 W/m² de radiación solar. Para la medición de la radiación directa se utilizó un pirheliómetro de la marca EPPLEY modelo PSP con una sensibilidad lineal de: 7.87×10^{-6} (V/Wm⁻²) y un rango de 0 a 1,400 W/m² de radiación solar. Para la medición de radiación solar concentrada se utiliza un sensor Gardón de la marca Vatel model TG1000-27 con una sensibilidad de: 89×10^{-6} (V/Wm⁻²) y una linealidad calibrada por lo menos hasta 1,700,000 W/m² de radiación solar concentrada. Que requiere de un sistema de enfriamiento para la extracción del calor.

Continuando con el diagrama de flujo, una vez convertidas las variables a sus unidades correspondientes, se procede a almacenar en un arreglo de 60 datos para completar 1 minuto y de este arreglo se obtienen los promedios máximo y mínimos de cada variable. Esta información se almacena en un PILART en tiempo real (1 s) para su posterior almacenamiento en archivo por el ciclo de manejo de archivos.

El manejo de archivos se encarga de revisar si la memoria no volátil del cRIO está llena, si está llena borra el archivo con la secuencia inferior y continua extrayendo información de la PILART y la almacena en el archivo, si el archivo alcanzó los 2 Megabytes de información, se crea un nuevo archivo con el siguiente número de secuencia.

A la estación solarimétrica se le compiló y cargó el programa, también se configuró para que se ejecutara de forma automática al encenderse el equipo, esto con la finalidad de restablecer el sistema en caso de falla por energía eléctrica.

La visualización de las variables en tiempo real se realiza desde el sistema SCADA central, mientras que el almacenamiento de los archivos se realiza en el mismo cRIO y se resguarda esa

información en una PC a través del servidor FTP instalado en el cRIO. Actualmente el cRIO tiene una capacidad de almacenado de unos tres meses de información con el número de variables que cuenta.

5.5 Sistema de Visión Artificial para Retroalimentación

El sistema de visión artificial cuenta con los siguientes elementos para su operación: Cámara de captura de imágenes, sistema de almacenamiento y procesamiento de imágenes, pantalla reflectora de imagen solar concentrada y control sobre posicionamiento de heliostatos en la pantalla reflectora.

Primeramente los rayos del sol son reflejados por la superficie del heliostato a analizar, a través del canteo realizado por los rayos del sol concentrados por cada una de las facetas en un punto focal, reflejándose nuevamente, pero esta vez en una superficie Lambertiana en lo alto de la torre central, para poder ser apreciada desde cualquier ángulo en el área del campo de heliostatos. La figura 5.13 muestra un esquema del trazado de rayos para la captura de imágenes.

El reflejo en la superficie Lambertiana es capturado por la cámara digital de alta resolución instalada en el campo y transmitido en tiempo real a la computadora de almacenamiento para su posterior procesamiento y análisis.

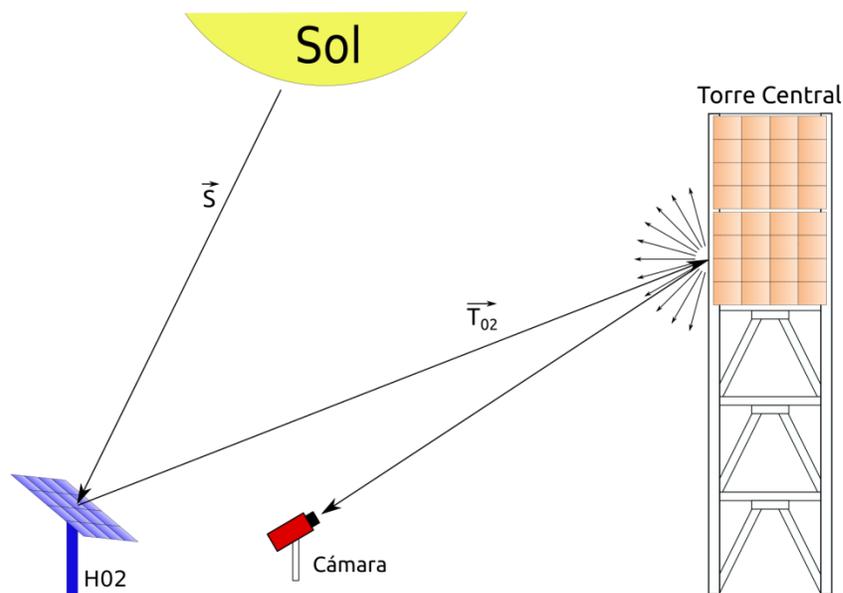


Figura 5.13 Diagrama de trazado de rayos solares para la captura de imagen.

La captura de imágenes en tiempo real (muestreo de un segundo) se realiza en el CVS. Primeramente se configuran los parámetros de captura de imagen, se abre un puerto TCP/IP para empezar a escribir la imagen en él, esto quiere decir que el sistema CVS queda en modo servidor en espera que se conecte algún cliente y empiece a leer en ese puerto. Por otra parte, la computadora de visión se configura como cliente y empieza con la recolección de imágenes del CVS a través del puerto TCP/IP para su despliegue y almacenado en archivo, con la finalidad de realizar un procesamiento posterior (realizado fuera de línea). La figura 5.14 muestra el diagrama de flujo de los procesos en el sistema de visión.

La captura de imágenes se realiza cada segundo esto podría parecer excesivo si lo que se quiere analizar es la deriva del heliostato, pero esta información sirve para otros tipos de análisis como:

- Análisis de deriva.
- Análisis de *backlash*.
- Análisis de *stress* estructural.
- Análisis de concentración solar por visión artificial.
- Análisis de canteo.
- Análisis por perturbación de vientos.

De los anteriores solo el análisis por deriva es contemplado en este documento.

5.5.1 Procesamiento de Imágenes

Para el procesamiento de imágenes se utilizó un paquete computacional NI-Vision Assistant® Ver. 2009 [24], con este paquete se pueden realizar *scripts* de programación en LabVIEW, agregarle una secuencia de imágenes y analizarlas en el mismo software, pero en nuestro caso se realizó de la siguiente manera:

Primeramente se diseñó un *script* para calibrar una imagen maestra, el software NI-Vision tiene la capacidad de guardar información de calibración en los mismo archivos de imagen,

con restricción al formato PNG. Estos datos de calibración son aplicados a las imágenes a analizar, al resultado se le aplica una segmentación por umbral de brillo y a la máscara resultante se le aplica un algoritmo de centro de energía proporcionado por LabVIEW, con lo que finalmente se obtienen las coordenadas (X, Y) del centro de la imagen solar.

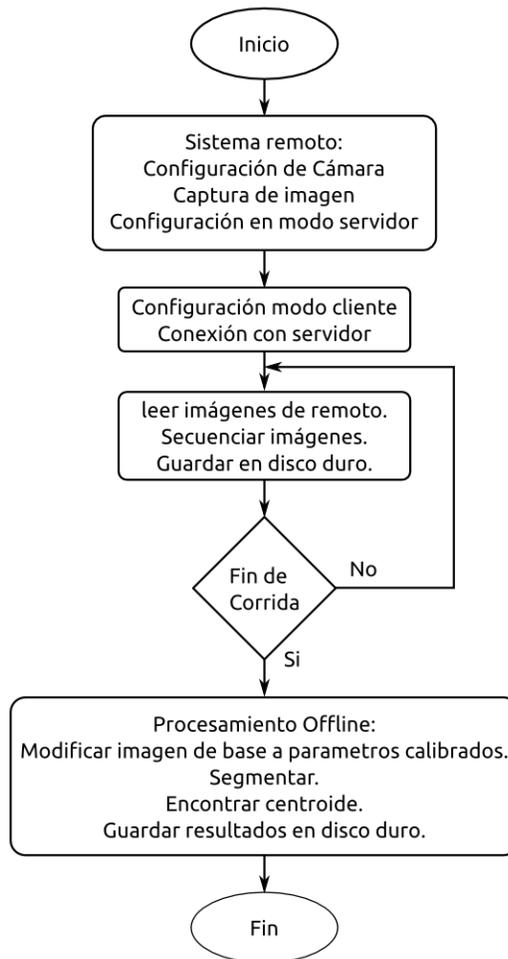


Figura 5.14 Diagrama de flujo de los procesos del sistema de visión.

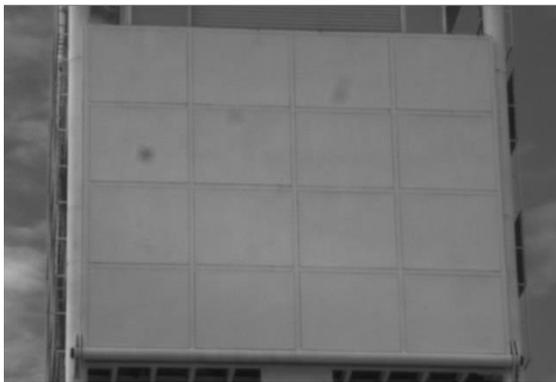
5.5.1.1 Obtención y Calibración de la Imagen Maestra

Se calibra una imagen Maestra a través del NI Vision System®, se le aplica una máscara de segmentación (figura 5.15b) la cual realiza un recorte para procesar solo la información de interés, después se realiza una **corrección por perspectiva** y una asignación o cambio de unidades donde se le asigna al centro del blanco lambertiano como el punto origen (0,0) y a

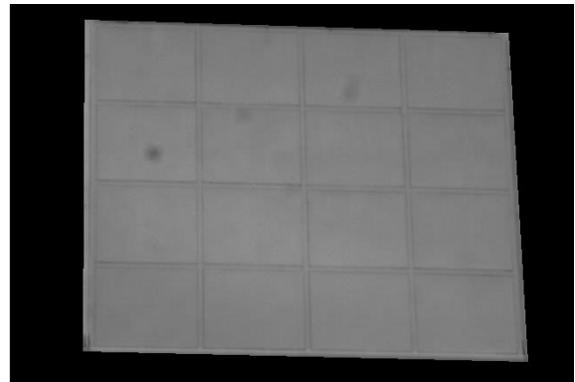
cada una de las esquinas con la siguiente información:

- Centro: 0,0
- Superior Izquierda: -395,345
- Superior Derecha: 395,345
- Inferior Izquierda: -395,-345
- Inferior Derecha: 395, 345

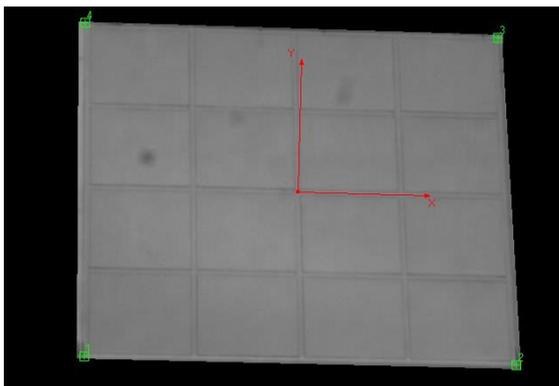
En esta misma calibración se indica una línea recta por donde corre el eje X necesario para la correcta transformación de la imagen (figura 5.15c). La figura 5.15d es la imagen Maestra obtenida después de la transformación, con dimensiones de 470x408 pixeles, que nos proporciona una Resolución de 1.69 cm/pixel.



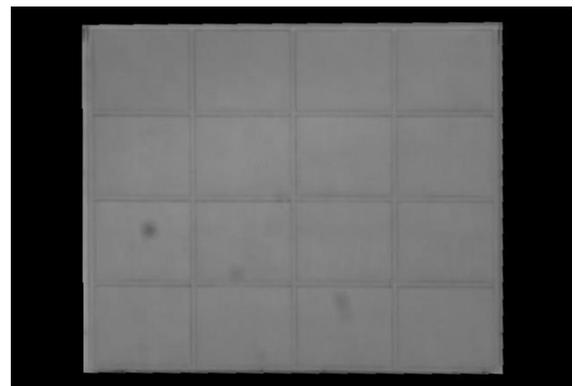
(a) Imagen original.



(b) Aplicación de máscara.



(c) Calibración de coordenadas.



(d) Transformación de imagen.

Figura 5.15 Secuencia para la obtención de la imagen Maestra.

Una vez obtenida la imagen Maestra, se guarda y se utiliza en el procesamiento de cada una de las imágenes capturadas a lo largo de la corrida y con esto se finaliza el *script* desarrollado en NI-Vision Assistance®. El procesamiento de imágenes capturadas se realiza en LabVIEW.

5.5.1.2 Centroide de Imagen Solar Concentrada

La figura 5.16 muestra el diagrama de flujo del procesamiento de imágenes para la obtención de las coordenadas del centro o centroide de la imagen solar concentrada.

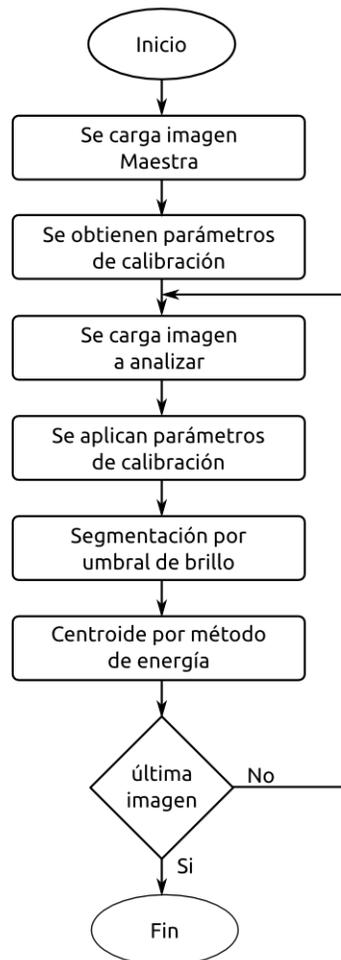


Figura 5.16 Diagrama de flujo procesamiento de imagen.

Primeramente se carga la imagen Maestra y se obtienen los parámetros de calibración. Después se carga la imagen a analizar y se le aplican los parámetros de calibración para su transformación, acto seguido se realiza una segmentación por umbral de luminosidad y a la máscara resultante se le aplica la función de encontrar centroide de NI-LabVIEW®, que es un

cálculo de energía de primer orden como el mostrado en las ecuaciones siguientes:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^m i * X_i}{\sum_{i=1}^m X_i} \quad (5.29)$$

$$Y_c = \frac{\sum_{j=1}^n j * Y_j}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad (5.30)$$

donde, para (5.29):

X_c es el índice en la columna que mayor energía contiene a su alrededor.

m es el número de columnas de la imagen.

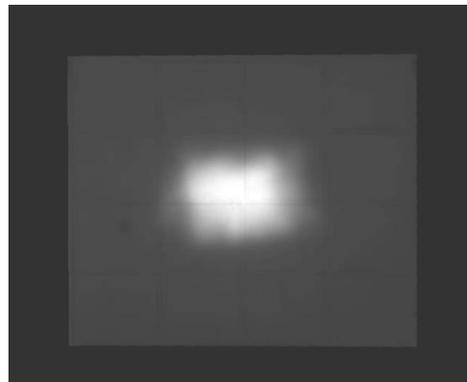
X_i es la intensidad del pixel en el subíndice i .

i es el valor del índice.

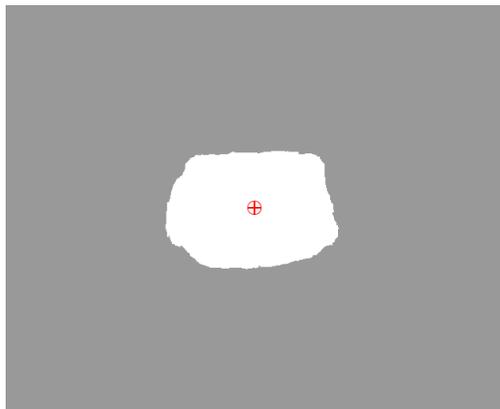
Para (5.30) son los mismos valores solo que n es el número de filas de la imagen y Y_j es el valor de la intensidad del pixel en dicha fila.



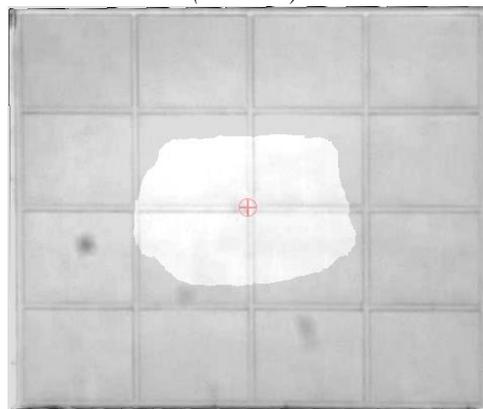
(a) Imagen capturada.



(b) Aplicando los parámetros de transformación (Maestra).



(c) Máscara de umbral de luminosidad.



(d) Montado de máscara centroide y Maestra.

Figura 5.17 Secuencia del proceso de análisis de la imagen.

Los resultados entregados por esta función son expresados en las nuevas unidades, esto es, en centímetros. La figura 5.17 muestra el recorrido todo el proceso de análisis hasta entregar la coordenada central del centroide. Este proceso se realiza para cada imagen y los resultados se guardan en un archivo tipo CSV para su posterior análisis en Octave.

CAPÍTULO VI. PRUEBAS Y RESULTADOS

Básicamente los resultados del presente trabajo se enfocan a la presentación del sistema SCADA, su configuración, operación y funcionamiento, así como a los resultados del hecho de poder realizar experimentos del día completo con todas las variables necesarias para la correcta evaluación del desempeño de los helióstatos, tanto en su conjunto como de forma individual. Con el desarrollo de esta automatización se logró avanzar un pequeño paso hacia la corrección de la deriva de la imagen solar, explicada en las secciones 6.4 y 6.5.

El desarrollo del método de linealización del ángulo de elevación del helióstato UNAM-DS-36A descrito en la sección 5.1, además de servir como conversor angular y distancia lineal del actuador, nos proporciona las bases para una correcta caracterización del helióstato, pudiendo detectar posibles coeficientes de elasticidad en la estructura de las facetas y también nos proporciona conocimiento para el diseño y fabricación de un instrumento de calibración de apuntamiento.

6.1 Sistema Principal SCADA

El sistema principal cuenta con pantalla lateral izquierda con las opciones principales del sistema. En la figura 6.1 se muestra el diseño final de esta pantalla en modo operación, lado derecho y parte del centro tenemos la pantalla de monitoreo del campo completo, donde se muestra en tiempo real el modo operación de cada helióstato así como su estatus, estado habilitado y en alarma si ha sido activado los interruptores de límite o paro de emergencia.

La configuración del sistema corre a cargo del instrumento virtual “Panel de Control” mostrado en la figura 6.2, el cual se encarga de tener los controles de entrada de datos y el almacenamiento de información en un archivo denominado “helios.dat”.

Para llevar a cabo un experimento es necesario llenar el formulario del instrumento virtual “Configuración” mostrado en la figura 6.3, con esta información se identifican los datos almacenados en el sistema para el experimento. Otra característica importante de esta pantalla

es la de selección de heliostatos para su operación en el experimento, la selección se realiza de forma gráfica como se muestra en la figura 6.4.

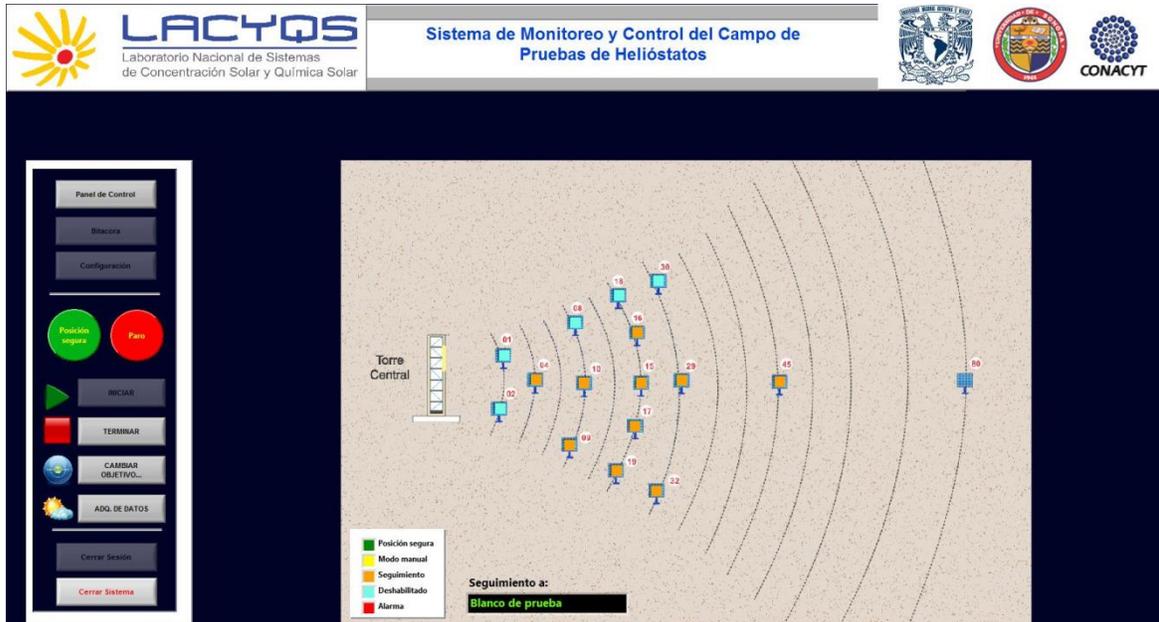


Figura 6.1 Sistema SCADA principal en operación.



Figura 6.2 Panel de Control.



Figura 6.3 Instrumento virtual "Configuración".

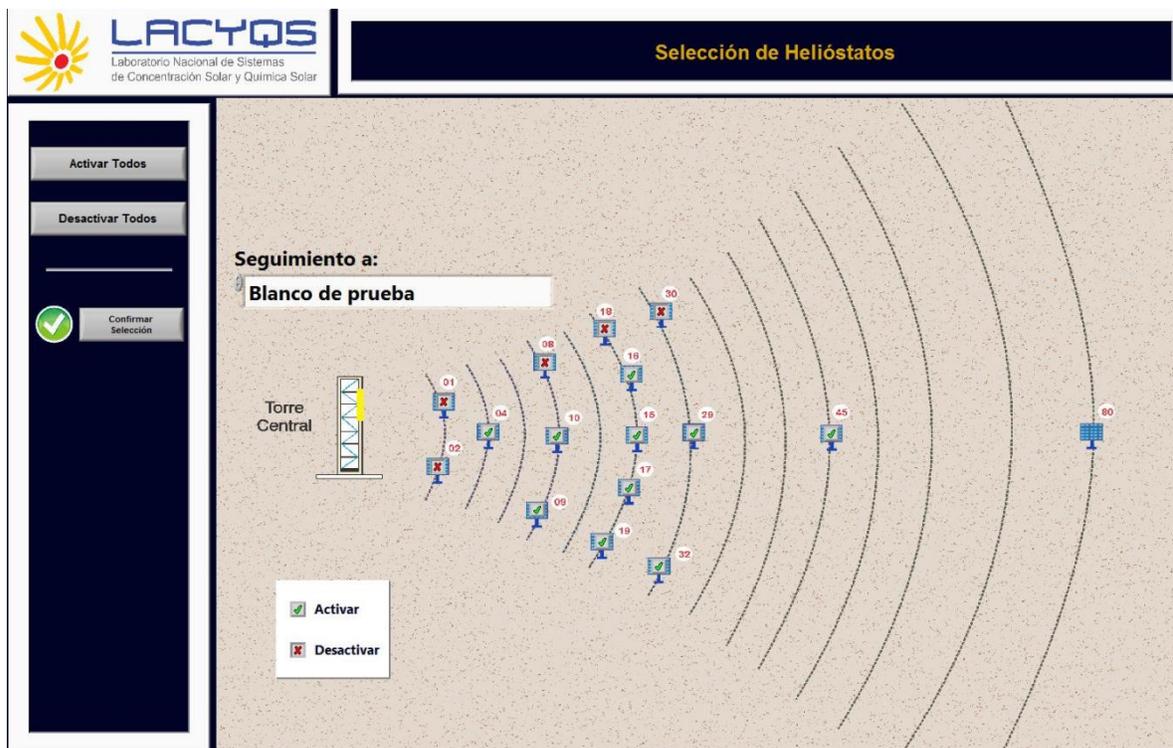


Figura 6.4 Selección de Helióstatos.

de operación para la rápida incorporación de heliostatos a las pruebas experimentales en los blancos anteriormente descritos (Lambertiano, horno, pruebas térmicas).

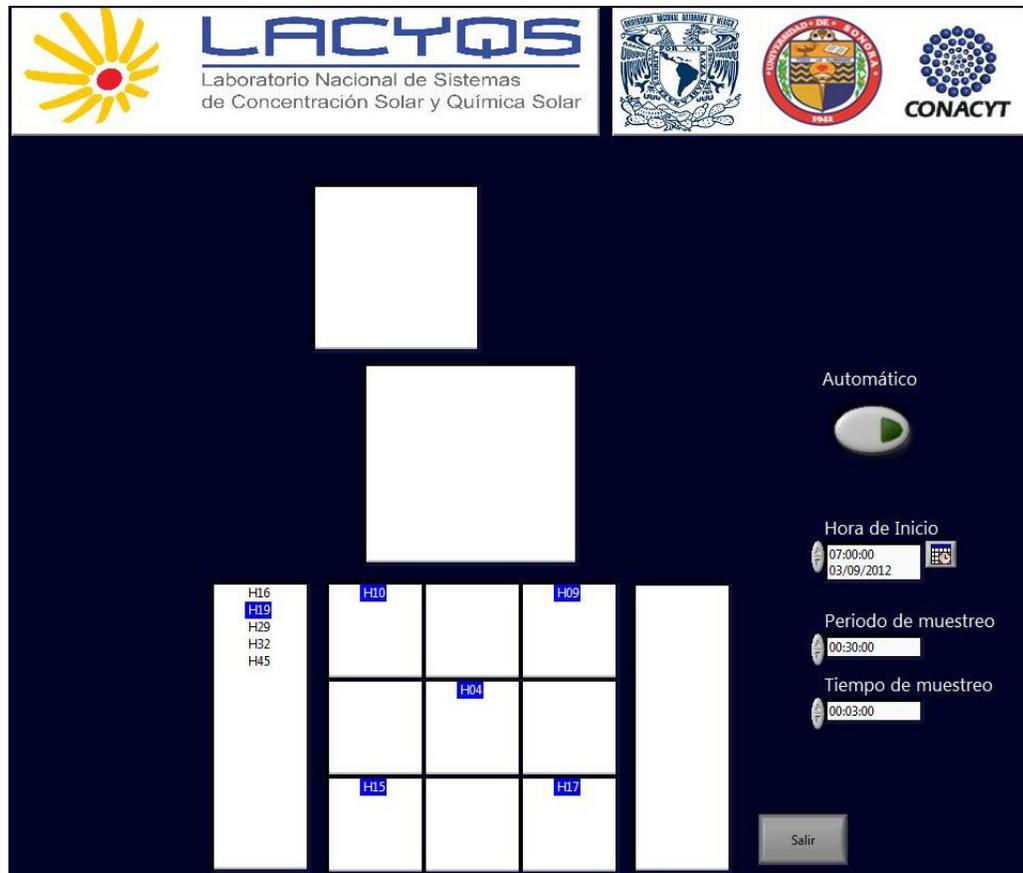


Figura 6.6 Objetivos Individuales.

Una característica que garantiza la operación intuitiva de este instrumento es su forma sencilla de cambio de objetivo de forma gráfica, esto se realiza arrastrando la etiqueta del heliostato al objetivo deseado para que el heliostato cambie su objetivo. Este instrumento también cuenta con rutinas automáticas de muestreo de heliostatos para análisis y calibración de los mismos explicadas en la sección 6.5.

6.2 Estación Solarimétrica

Este instrumento virtual opera de forma automática en el cRIO y desde el sistema SCADA se puede habilitar el visor de datos en tiempo real (1 s), que muestra las variables de

Concentración Solar, Radicación directa, Sensor Gardon, Radiación Global, Temperatura ambiente, Velocidad y Dirección de viento, así como las temperaturas del Blanco de pruebas térmicas, mostradas en la figura 6.7. Otro de los resultados entregados por la estación solarimétrica son los archivos accesibles vía FTP, figura 6.8.

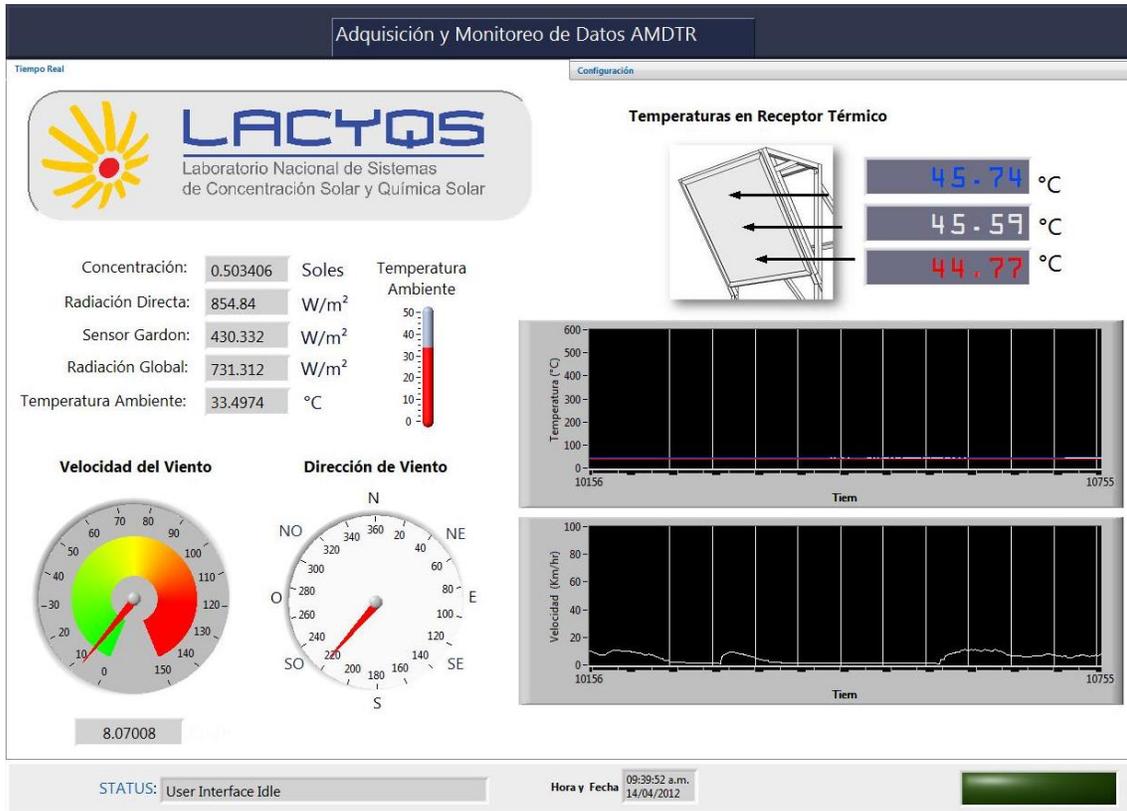


Figura 6.7 Estación Solarimétrica.

Nombre de archivo	Tamaño de	Tipo de arc	Última modificación	Permisos	Propietario/G
..					
data0000.csv	2,1 MB	csv-archi...	11/09/12 10:34:00	-rw-r--r--	owner group
data0001.csv	2,1 MB	csv-archi...	19/09/12 09:43:00	-rw-r--r--	owner group
data0002.csv	2,1 MB	csv-archi...	27/09/12 08:33:00	-rw-r--r--	owner group
data0003.csv	500,8 KB	csv-archi...	29/09/12 07:24:00	-rw-r--r--	owner group
data0004.csv	2,1 MB	csv-archi...	07/10/12 06:14:00	-rw-r--r--	owner group
data0005.csv	2,1 MB	csv-archi...	15/10/12 05:05:00	-rw-r--r--	owner group
data0006.csv	2,1 MB	csv-archi...	23/10/12 04:20:00	-rw-r--r--	owner group
data0007.csv	2,1 MB	csv-archi...	31/10/12 03:09:00	-rw-r--r--	owner group
data0008.csv	2,0 MB	csv-archi...	07/11/12 12:53:00	-rw-r--r--	owner group

Figura 6.8 Archivos de Estación Solarimétrica vía FTP.

Y el resultado es un archivo en formato CVS (Valores Separados por Coma), la figura 6.9 muestra el formato de la cabecera y los datos, cuando el archivo es abierto en una hoja de

cálculo (*LibreOffice Calc* [25]).

Time Stamp (GMT)	V. Viento(max) (NI9201)	V. Viento(prom) (NI 9201)	Dir. Viento (NI 9201)	RTP1 Superior (NI 9211)	RTP1 Intermedio (NI 9211)
10/31/2012 03:10:30.63	12.42	9.92	141.57	22.93	22.92
10/31/2012 03:11:30.63	14.01	11.90	141.62	22.92	22.92
10/31/2012 03:12:30.63	14.51	13.34	141.77	22.94	22.94
10/31/2012 03:13:30.63	15.70	14.00	141.87	22.96	22.96
10/31/2012 03:14:30.63	16.95	15.06	141.97	22.98	22.99
10/31/2012 03:15:30.63	15.50	13.67	141.72	23.02	23.01
10/31/2012 03:16:30.63	15.77	14.58	141.59	23.03	23.02

Figura 6.9 Archivo de texto Estación Solarimétrica.

Otro resultado esperado es la generación de información solarimétrica para la zona del noroeste. Actualmente no se cuenta con información confiable de esta zona, ya que todos los resultados de tablas vistas en Internet son estimaciones de radiación directa en base a la radiación global y/o imágenes satelitales. La figura 6.10 muestra la radiación directa y global de un día completo en las instalaciones del Campo de Pruebas de Helióstatos. Por último la figura 6.11 muestra la velocidad máxima y promedio también para un día completo en el CPH.

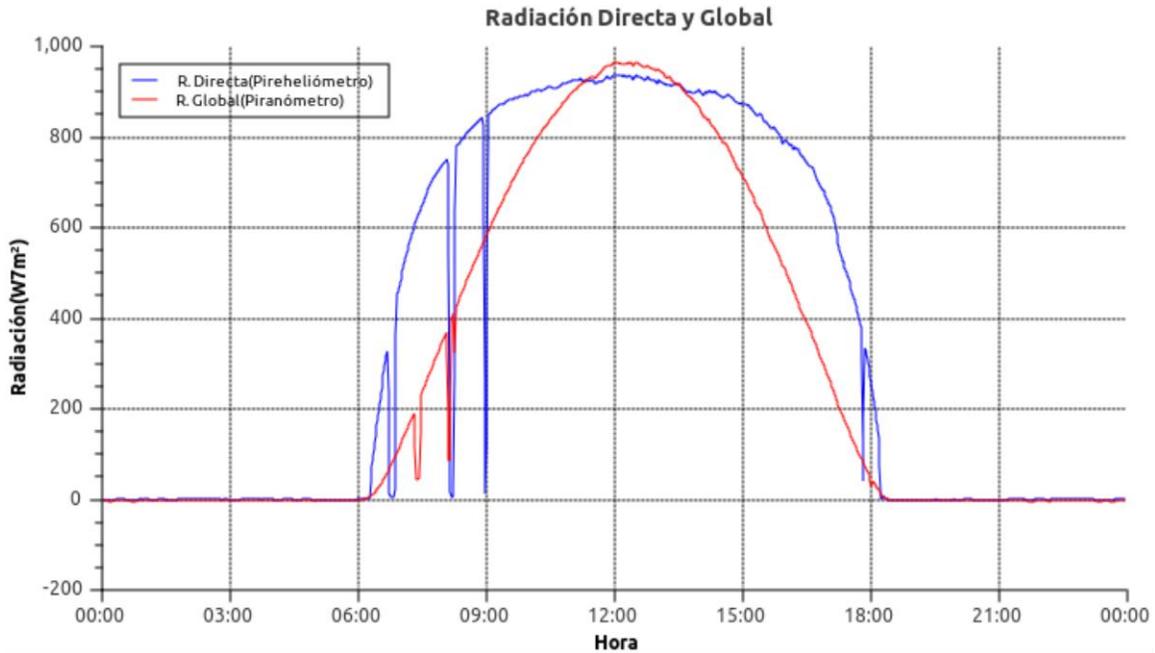


Figura 6.10 Radiación Directa y Global de un día completo.

6.3 Visión Artificial

El sistema de visión artificial actualmente opera fuera de línea (*offline*), las imágenes se capturan a lo largo de todo el experimento y al final del mismo se inicia el procesamiento de

las imágenes, para conocer la deriva observada del o los helióstatos en la corrida experimental. Los resultados del centroide de la imagen solar proyectada en el “Blanco Lambertiano” se guardan en un archivo en formato CSV, la figura 6.12, muestra el encabezado y los primeros valores de este archivo.

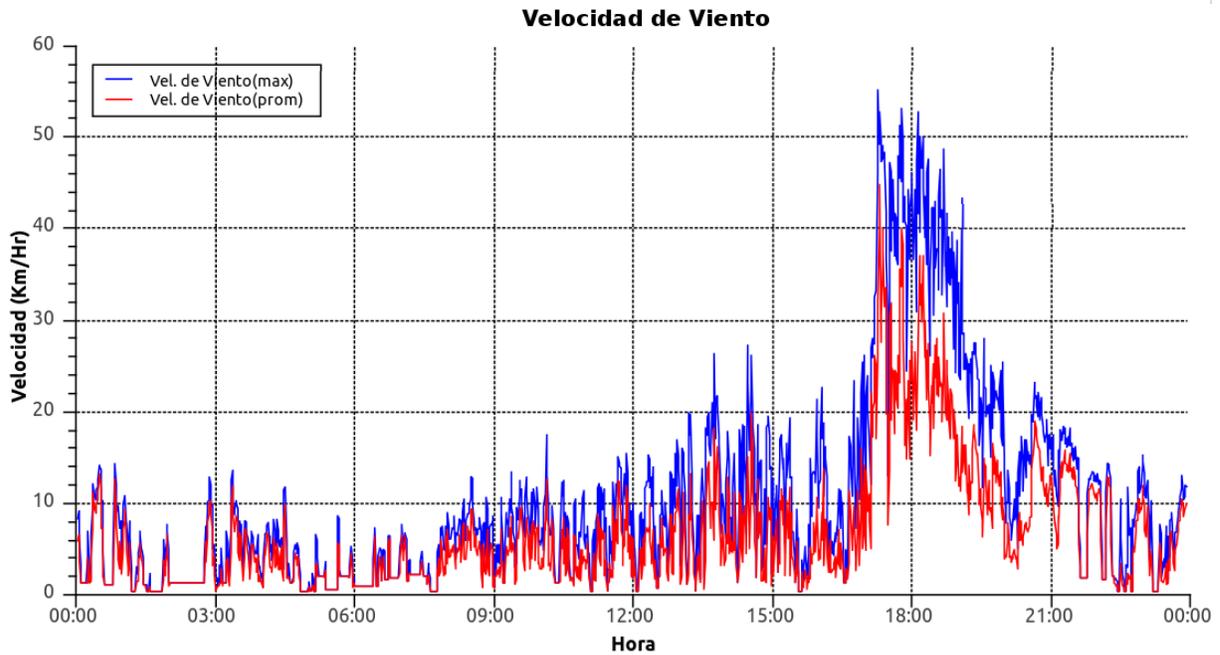


Figura 6.11 Velocidad Máxima y Promedio de viento.

Fecha	Hora	X	Y
06/03/12	08:04:33.00	-407.444946289	-420.373748779
06/03/12	08:04:34.00	-407.444946289	-420.373748779
06/03/12	08:04:35.00	-407.444946289	-420.373748779
06/03/12	08:04:36.00	-407.444946289	-420.373748779

Figura 6.12 Valores del centroide (X, Y).

Los valores se encuentran en centímetros, la unidad establecida para todas las coordenadas del campo de helióstatos. El hecho de que el sistema de visión pueda guardar las imágenes en una computadora en lugar de un sistema CVS (limitado en memoria), hace que la captura de imágenes no se encuentre limitada en espacio por lo que se pueden realizar corridas experimentales de varias horas, incluso varios días si fuera necesario. La figura 6.13 muestra el desplazamiento del centroide con respecto a los ejes X y Y(Z del campo) del “Blanco Lambertiano” en función del tiempo, esta fue una de las primeras corridas experimentales de

largo período, las anteriores solo podían correr por un lapso de casi dos horas como máximo ya que se saturaba la memoria del CVS. La figura 6.14 muestra el movimiento del centroide con respecto al origen (0,0) del “Blanco Lambertiano”, esta corrida experimental se llevó a cabo el día 6 de Marzo de 2012.

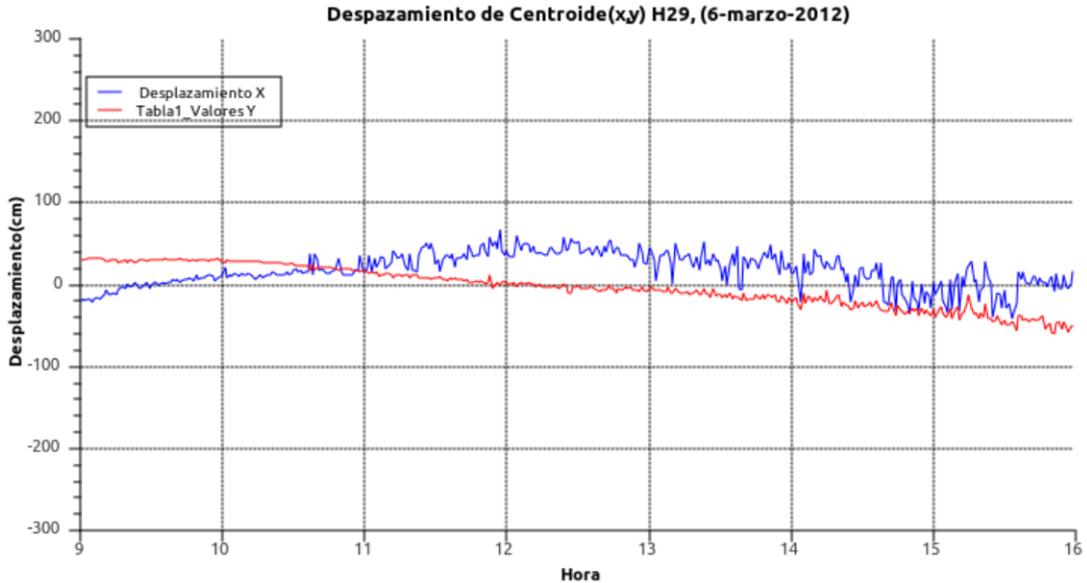


Figura 6.13 Desplazamientos del centroide X y Y con respecto al tiempo.

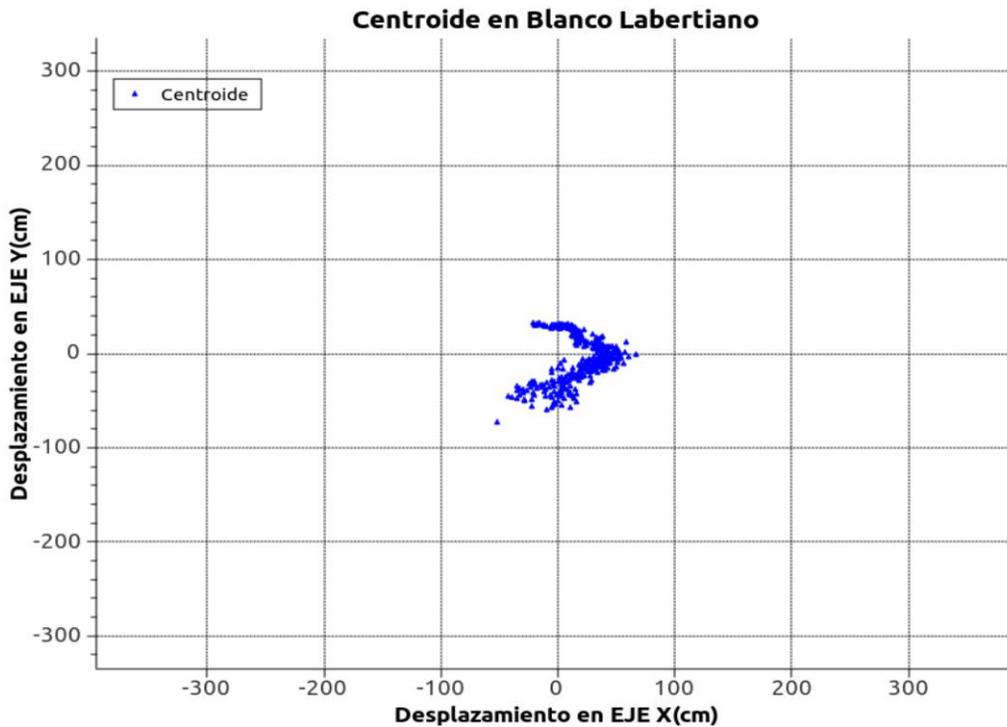


Figura 6.14 Desplazamiento del centroide (X, Y) en "Blanco Lambertiano".

6.4 Curvas de Deriva

Se explica cómo encontrar la deriva de un heliostato. A la desviación de la posición del centroide de imagen concentrada solar (*spot*) con respecto al objetivo deseado se le conoce como deriva. Para el análisis de deriva se utilizó el paquete computacional Octave en su versión 3.2.4, este es un paquete que forma parte de los sistemas de *Open Source* y cuenta con licencia GPL de libre uso y modificación, su funcionalidad es similar a la del software Matlab [26], incluso muchos de los *scripts* desarrollados en Matlab funcionan en Octave y viceversa sin necesidad de modificación alguna.

El procedimiento para encontrar la deriva es el siguiente:

Se fija como objetivo el origen del Blanco Lambertiano (0,0) y se realiza una corrida experimental completa.

Una vez que se obtienen los datos crudos de los centroides en las imágenes (archivo CSV), se analizan por separado cada uno de los ejes (X, Y). En la gráfica de la figura 6.13 podemos observar que en el periodo de las 13:00 a las 16:00 Hrs, se observa una especie de perturbación con mayor acentuación en el eje X que en el eje Y. Esta perturbación se debe principalmente a las corrientes de viento que regularmente son por las tardes, como se muestra en la gráfica de la figura 6.11; otra perturbación puede ser por problemas de *Backlash* y pudiera darse el caso de problemas de correcciones del sistema de control.

Por esta razón, debemos filtrar los datos y discernir los movimientos de perturbaciones instantáneas (minutos) de las perturbaciones por deriva de largo plazo (horas). Para lograr lo anterior, se ajustan los valores de los ejes a un polinomio de tercer orden con respecto al tiempo, el cual nos muestra la deriva real a largo plazo y una vez que está bien ajustado nos podrá mostrar una “tendencia de deriva” que se explica en la sección 6.5.

Utilizando las herramientas de Octave, con la función “`polyfit`” encontramos:

```
coef_h29_X=polyfit(h29(:,1),h29(:,2),3)
coef_h29_X =
```

```
0.85087 -35.326 477.61 -2079.7
```

```
coef_h29_Y=polyfit(h29(:,1),h29(:,3),3)
coef_h29_Y =
```

```
-0.089399 1.5792 -8.2651 34.598
```

Como se puede observar, el ingreso de datos a las funciones en Octave son similares a las de Matlab, teniendo un arreglo de n datos por 3 columnas, en este caso “h29”, donde la primera columna es el tiempo, la segunda los valores para el eje X y la tercera los valores para el eje Y. El resultado son los cuatro coeficientes para un polinomio de tercer orden, separados por un espacio cada uno, quedando los polinomios siguientes:

$$X_{(t)} = 20.85087t^3 - 35.326t^2 + 477.61t - 2079.7 \quad (6.1)$$

$$Y_{(t)} = -0.089399t^3 + 1.5792t^2 - 8.2651t - 34.598 \quad (6.2)$$

La figura 6.15, muestra la gráfica de los datos del centroide ajustados al polinomio de tercer orden. Analizando la curva polinomial obtenemos los valores máximo y mínimo de la deriva de este helióstato quedando de la siguiente manera:

Eje	Desviación		Desviación máxima (cm)
	Desde (cm)	Hasta (cm)	
X	-23.32	35.31	35.31
Y	-59.54	22.95	59.54

Y encontrando la magnitud de la Deriva o Desviación Radial ($\Delta_{r(t)}$) al punto (0,0) con la siguiente ecuación:

$$\Delta_{r(t)} = \sqrt{X_{(t)}^2 + Y_{(t)}^2} \quad (6.3)$$

Tenemos: $\Delta_{r(t)}$ mínima = 21.82 cm y $\Delta_{r(t)}$ máxima = 59.66 cm. Con esta información

conocemos cual es la deriva mínima y máxima de nuestro heliostato.

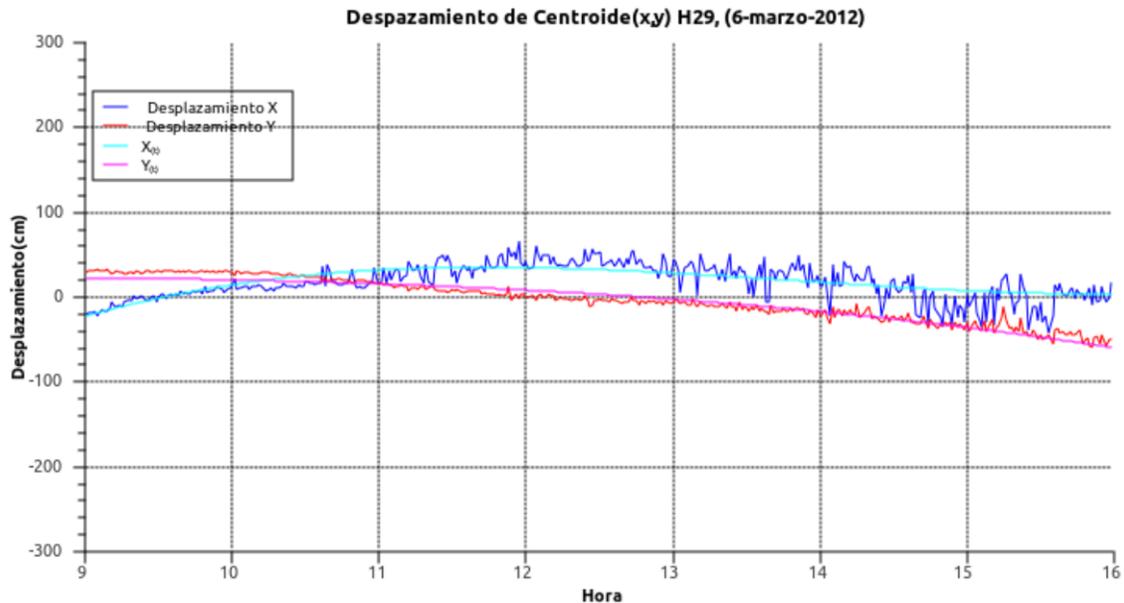


Figura 6.15 Datos del centroide y evaluación del polinomio.

6.5 Corrección de Deriva

Para que un heliostato no afecte la eficiencia de nuestro proceso térmico por errores de deriva, es necesario que su deriva máxima siempre este por debajo del límite máximo de deriva fijado por las dimensiones de operación del Horno Solar. En el caso del CPH estamos suponiendo una deriva radial máxima de 100 cm.

El problema de deriva se puede deber a uno o múltiples factores, éstos son alguno que han sido identificados en el CPH:

- Instalación de la base del heliostato desnivelada.
- Mala alineación del norte geográfico del heliostato.
- Mala sincronía en el reloj base para el cálculo de la posición solar.
- Estrés estructural de la montura de los espejos del heliostato.
- Mal canteo de espejos.

Un método para realizar una corrección de deriva instantánea o dinámica, consiste en inyectarle la ecuación de deriva en su forma negativa como *offset* a cada heliostato

caracterizado con el método descrito en la sección 6.4. Por lo anterior se adaptó el software de control para que en lugar de tener un *offset* fijo, se pudiera ingresar un *offset* dinámico en función del tiempo, ingresando los valores de los coeficientes de deriva para determinado helióstato, esta opción se muestra en la parte baja de la figura 6.2. Para poder encontrar la deriva de varios helióstatos de forma simultánea en el transcurso de un día, se implementó un método de muestreo de helióstato que se observa en la parte derecha inferior de la figura 6.6 donde podemos configurar los elementos siguientes:

- Hora de inicio: Hora de inicio del muestreo de helióstatos.
- Periodo de muestreo: Tiempo en el cual se vuelve a repetir la secuencia de helióstatos a muestrear.
- Tiempo de muestreo: Tiempo que permanece el helióstato muestreado en el blanco objetivo, para después ser reemplazado por el siguiente helióstato.

La cantidad de helióstatos que entran en el muestreo depende del número de helióstatos que se han seleccionado para la corrida experimental. Una corrida experimental con 10 helióstatos, con un período de muestreo de 30 minutos y un tiempo de muestreo de 3 minutos por helióstato, nos dará la información de deriva de los 10 helióstatos en un solo día de experimentación. Las gráficas de las figuras 6.16 y 6.17, muestran la información cruda del centroide en X y Y respectivamente de los 10 helióstatos muestreados. Esta corrida se llevó a cabo el día 1 de Septiembre de 2012 desde las 8:30 hasta las 14:00 Hrs.

Realizando un análisis de la información para cada uno de los helióstatos y haciendo uso del software matemático Octave se obtiene la información mostrada en la tabla 6.1. Además de los coeficientes de deriva también se obtiene la deriva máxima y mínima en X, Y y la deriva radial, los cuales se muestran en la tabla 6.2.

Se concluye que solamente dos helióstatos se encuentra dentro del límite de deriva radial máximo permisible que es de 100 cm.

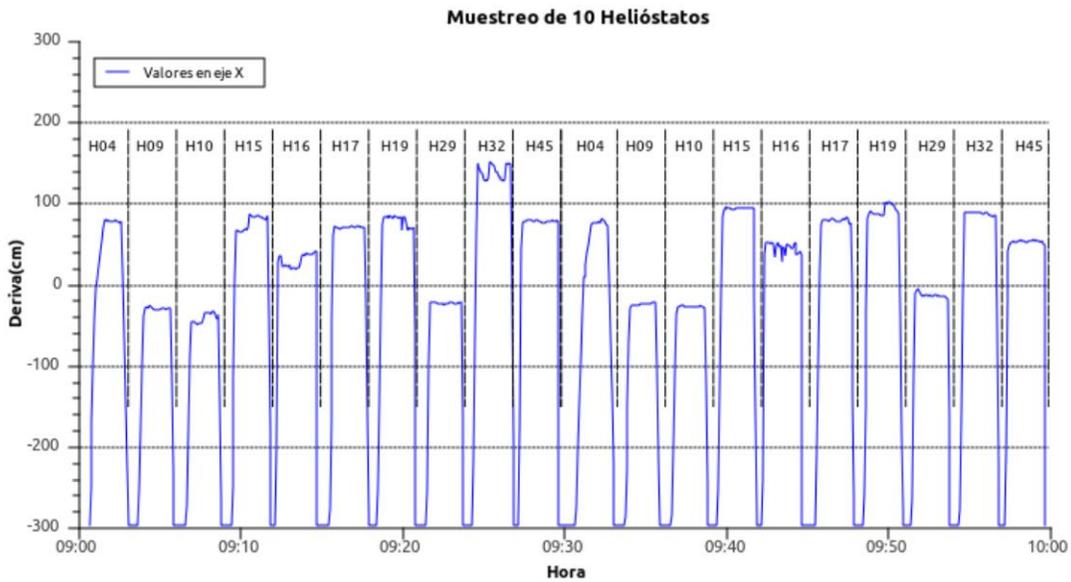


Figura 6.16 Eje X para el centroide de 10 heliéstatos.

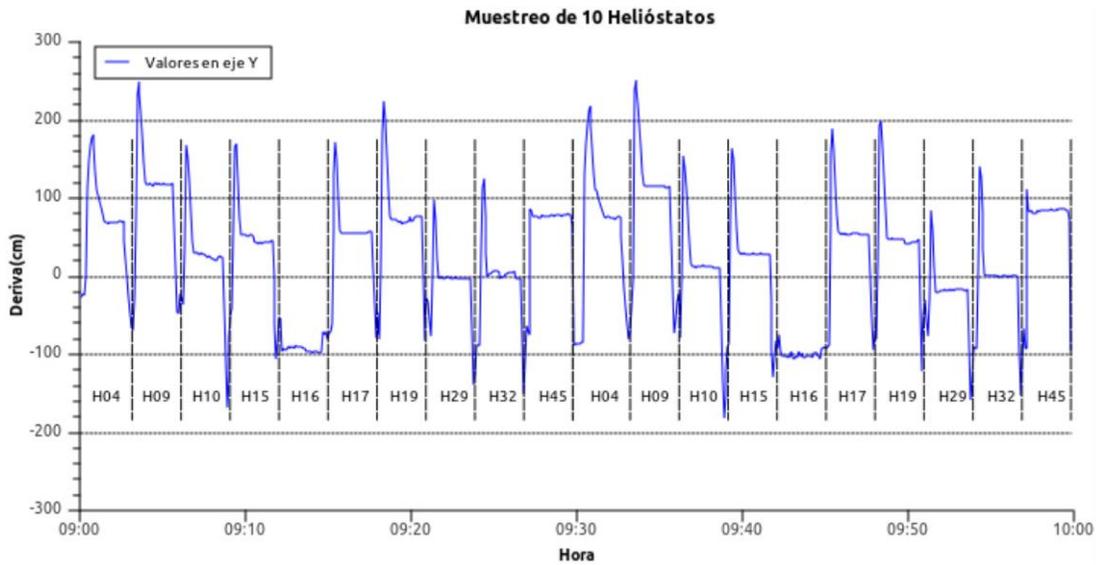


Figura 6.17 Eje Y para el centroide de 10 heliéstatos.

Inyectando un *offset* con el valor instantáneo del polinomio de deriva en X y Y pero de forma negativa, se corregirá la deriva en ese instante, implementado el sistema con la información del día 01 de Septiembre de 2012 y realizando la siguiente prueba 7 días después el 08 de Septiembre de 2012. La gráfica de la figura 6.18 muestra los resultados de las posiciones X y Y de los centroides, tal y como fueron obtenidos.

Tabla 6.1 Coeficientes de deriva de los helióstatos.

		t^3	t^2	t	cte.
H04	$X_{(t)}$	0.031	0.928	-14.196	-16.082
	$Y_{(t)}$	0.754	-24.528	253.557	-710.417
H09	$X_{(t)}$	-0.222	7.421	-88.229	321.365
	$Y_{(t)}$	0.974	-32.480	351.310	-1059.207
H10	$X_{(t)}$	0.655	-20.630	190.828	-440.096
	$Y_{(t)}$	-0.518	13.046	-74.077	457.186
H15	$X_{(t)}$	0.134	-6.196	40.997	123.522
	$Y_{(t)}$	-1.051	24.933	-140.567	868.373
H16	$X_{(t)}$	-0.096	5.969	-107.145	563.462
	$Y_{(t)}$	0.484	-14.847	156.782	-419.097
H17	$X_{(t)}$	-2.587	82.438	-874.657	2963.397
	$Y_{(t)}$	0.357	-10.214	93.869	47.270
H19	$X_{(t)}$	0.064	-3.171	20.348	160.543
	$Y_{(t)}$	0.017	-12.383	297.564	-1003.317
H29	$X_{(t)}$	-0.951	33.578	-386.439	1414.412
	$Y_{(t)}$	-1.277	41.283	-412.081	1580.846
H32	$X_{(t)}$	-0.463	15.545	-89.412	-66.416
	$Y_{(t)}$	0.544	-9.951	47.750	717.480
H45	$X_{(t)}$	-0.672	25.688	-260.630	741.862
	$Y_{(t)}$	0.766	-21.867	200.358	-733.294

Tabla 6.2 Valores de deriva máximo y mínimo de los helióstatos, todos los valores en cm.

	X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Δr_{min}	Δr_{max}
H04	51	81	63	88	95	109
H09	-36	-13	108	120	109	125
H10	-84	13	-14	45	11	95
H15	16	164	-26	92	84	166
H16	-7	57	-109	-85	85	123
H17	36	98	47	62	72	108
H19	27	120	-4	131	104	134
H29	-77	-1	-53	28	20	82
H32	-1	154	-15	42	14	157
H45	10	102	65	97	98	121

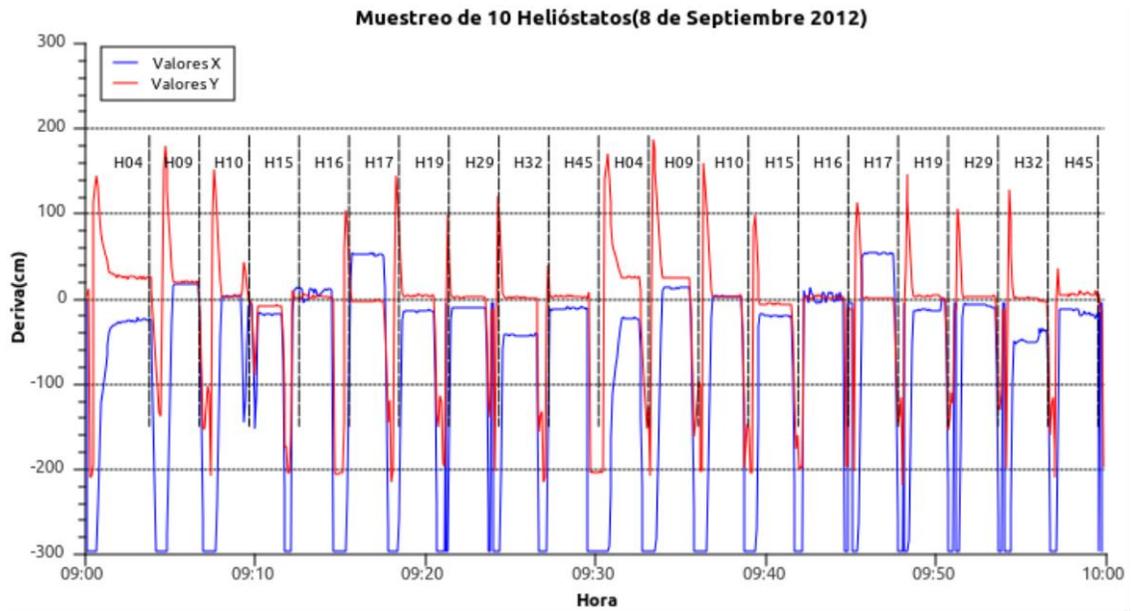


Figura 6.18 Valores X, Y corrección de deriva.

Realizando el análisis estadístico de la información del centroide para cada uno de los helióstatos tenemos los resultados mostrados en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Valores del centroide para cada helióstato, todos los valores en cm.

	X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Δ_r_{min}	Δ_r_{max}
H04	-32	26	8	27	12	41
H09	-1	23	15	30	23	30
H10	0	20	-3	4	3	20
H15	-21	-3	-11	6	7	21
H16	-15	16	-6	1	0	16
H17	52	76	-6	21	52	79
H19	-10	3	-6	3	0	10
H29	-23	4	-3	2	0	23
H32	-66	-24	-15	11	26	67
H45	-16	19	4	8	4	19

En la tabla 6.3, es posible observar que todos los helióstatos se encuentran por debajo del rango máximo de deriva radial, por lo que no será afectada la eficiencia del horno solar al menos por 7 días de operación de forma continua.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

Este trabajo es el resultado de múltiples esfuerzos, las mejoras presentadas al software “SCADA central”, consistieron en las secciones de apuntamiento del helióstato, así como en la calibración del ángulo de altura solar (α_h). La selección de objetivos mediante el arrastre de etiquetas (*drag & drop*) genera una interfaz de fácil operación o intuitiva para el usuario final, mientras que el uso de polinomios de corrección de deriva “corrigen” el apuntamiento a rangos tolerables de operación del sistema de calentamiento, sin la necesidad de caracterizar cada uno de los factores que provocan una falla en el apuntamiento del helióstato.

En la estación solarimétrica se concluyó un sistema *datalogger*, capaz de almacenar 4 meses de datos de variables solarimétricas y atmosféricas, para su posterior procesamiento, accesible mediante servidor FTP. Además de proveer información confiable en “Tiempo Real” al sistema de control de las variables de velocidad y dirección de viento y las variables de radiación directa y concentración solar, para la evaluación de la eficiencia de concentración solar (canteo y superficie reflectora) de cada helióstato.

Se logró la concluir la instalación de infraestructura del sistema de visión artificial, pudiendo realizar corridas de análisis de imágenes de jornadas completas continuas a través del almacenamiento y procesamiento de imágenes en cuarto de control y no en sistema CVS de campo, pudiendo realizar la respectiva caracterización de “imagen solar” de los 10 helióstatos UNAM-DS-36A, por medio de su deriva, dejando la infraestructura y el software listo para realizar la caracterización del resto de los helióstatos y para evaluación de los nuevos diseños de helióstatos.

Se comprobó que el método desarrollado de la retroalimentación de un *offset* generado a partir de la deriva de un día anterior, genera resultados favorables incluso 7 días después de haber sido hecha la verificación, pudiendo extenderse para los helióstatos que tienen una deriva muy grande inicial. Este procesamiento también nos proporciona información para las dimensiones en el diseño del colector solar y garantiza su eficiencia de operación por un tiempo delimitado. Este método puede ser formalizado a través técnicas de “procesamiento por lotes” comúnmente utilizados en el desarrollo de software y capacidades del sistema.

7.1 Mejoras Programadas a la Conclusión de este Trabajo

Se hicieron pruebas de control PID en motores pero no se llegó a una evaluación exhaustiva del método, por lo cual, no se incluyó en esta tesis, queda pendiente realizar esta prueba y generalizar las rutinas PID para todos los heliostatos disponibles en campo, aún y cuando el método de ON/OFF que actualmente se tiene ha resultado satisfactorio en las pruebas realizadas.

Automatizar el método de retroalimentación de *offset*, para realizar corrección en “tiempo real” en cada uno de los muestreos y poder pronosticar derivas futuras mediante el análisis estadístico de datos, garantizando muestreos de heliostatos cada vez más largos y así eficientar la infraestructura instalada del número de heliostatos.

Posibles desarrollos futuros en base a la infraestructura desarrollada e instalada:

- Evaluación de *backlash*.
- Análisis de concentración solar por visión artificial.
- Reconocimiento de patrones en imagen solar para control de heliostatos.
- Automatización del método de polinomio de deriva.
- Desarrollo de algoritmos basados en inteligencia artificial para el control de heliostatos: Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*), Redes Neuronales, Algoritmos Genéticos, entre otros.

VIII. REFERENCIAS

- [1] Duffie J., Beckman W., “Solar Engineering of Thermal Processes”, Second Ed., Wiley Interscience, 1991.
- [2] “Basic Photovoltaic Principles and Methods”, Seri/SP-290-1448, pp. 17-22, 1982.
- [3] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa and Wilhelm Warta, “Solar Cell Efficiency Tables”, Progress in Photovoltaics, Vol. 19. No. 1, pp. 84-92, 2010.
- [4] Procalsol, Sener México, “Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México”, 2007.
- [5] Sener México, “Balance Nacional de Energía”, 2010.
- [6] Romero M., Buck R., Pacheco J., “An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects, and Technologies”, ASME 2002, Vol. 124, pp. 98-108.
- [7] Márquez C. “An Overview of CSP in Europe, North Africa and the Middle East”, 2008.
- [8] Charles W. Forsberg, “High-Temperature Liquid- Fluoride-Salt Closed-Brayton-Cycle Solar Power Towers”, Transactions of the ASME, Vol. 129, pp. 141-146, 2007.
- [9] Teplyakov D. I. and Aparisi R. R., “Heat Optimization of Solar Power Plants: Radiation Concentration and Working Medium Temperature”, Geliotekhn., No. 4, pp. 38–47, 1977.
- [10] Sh. I. Klycheva, A. A. Abdurakhmanovb, S. A. Bakhramova, and U. P. Turaevab, “Efficiency of Solar Heat Power Plants with Selective Receivers”, Applied Solar Energy, Vol. 46, No. 4, pp. 271–274, 2010.

- [11] Hildebran A. and Vant-Hul L., “Power with Heliostats”, *SCIENCE*, Vol. 197, No. 4309, 1977.
- [12] Denholm P., Mehos M., “Enabling Greater Penetration of Solar Power via the Use of CSP with Thermal Energy Storage”, NREL Technical Report, 2011.
- [13] Archer, C.B., “Comments on Calculating the Position of the Sun”, *Solar Energy* 25, pp. 91, 1980.
- [14] Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., López-Moratalla, T., Lara-Coira, M., “Computing the Solar Vector”. *Solar Energy* 70 (5), pp. 431–441, 2001.
- [15] Meeus J., “Astronomical Algorithms”, Second Ed., Willmann-Bell Inc., 1988.
- [16] Reda I. and Andreas A., “Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications”, *Solar Energy* 76 (5), pp. 577–589, 2004.
- [17] Pitman C. L. and Vant-Hull L. L., “Errors in Locating the Sun and their Effect on Solar Intensity Predictions”, Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, Denver, pp. 701–706, 1978.
- [18] Walraven R., “Calculating the Position of the Sun”, *Solar Energy* 20, pp. 393–397, 1978.
- [19] Michalsky J. J., “The Astronomical Almanac’s Algorithm for Approximate Solar Position (1950–2050). *Solar Energy* 40 (3), pp. 227–235, 1988.
- [20] Roberto Grena, “An Algorithm for the Computation of the Solar Position”, *Solar Energy* 82, pp. 462–470, 2008.
- [21] David Marroquín G., “Sistema de control para un conjunto de Helióstatos”, Tesis de

- Maestría, Centro de Investigación en Energía(CIE) 2011.
- [22] GNU Octave, <http://www.gnu.org/software/octave>, Nov. 2012.
- [23] National Instruments, “NI-PSP Networking Technology”,
http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361E-01/lvconcepts/ni_psp/.
- [24] National Instruments, “IMAQ, Vision Assistant Tutorial”,
<http://www.ni.com/pdf/manuals/372228a.pdf>, Agosto 2004.
- [25] LibreOffice, <http://www.libreoffice.org/features/calc/>.
- [26] The Mathworks Inc., <http://www.mathworks.com/>.