

Universidad Politécnica del Estado de Morelos

Universidad Morelos Politécnica



***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
SISTEMA DE CONTROL PARA HELIÓSTATOS DE TORRE
CENTRAL***

T E S I N A

Que para obtener el título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Presenta

HÉCTOR IVÁN GONZÁLEZ CAMARILLO

Directores de Tesina

DR. CARLOS ALBERTO PÉREZ RÁBAGO

ING. GRISELDA DEL PILAR VÁZQUEZ MONZÓN

Jiutepec, Morelos, Enero de 2014

Tabla de Contenido

Resumen	i
Agradecimientos	iii
Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tablas	vi
Tabla 3. 1Características generales del Arduino MEGA 2560 R3.	vi
....28	
Lista de Abreviaturas.....	vii
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Importancia de las energías renovables.....	1
1.2 Energía Solar	2
1.3 Energía solar térmica.....	3
1.3.1 Sistemas de concentración solar.	4
Concentradores cilindro-parabólicos:	4
Discos parabólicos	5
Fresnel Lineal	5
Sistemas de torre o de receptor central	6
1.4 Campo de Pruebas de Helióstatos	6
1.5 Descripción de Helióstatos de Torre Central	8
1.5.1 Funcionamiento de un Helióstatos de Torre Central.....	9
1.6 Antecedentes de la organización	10
1.7 Planteamiento del problema.....	12
1.8 Objetivo	12
1.9 Objetivos Específicos.....	12
1.10 Justificación	13
1.11 Alcances y limitaciones	13
1.12 Metodología de solución.....	14
1.13 Organización de la tesina	16
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Radiación Solar	17
2.1.1 Tipos de radiación Solar.	17

2.2 Movimiento del Sol	18
2.2.1 Algoritmo de posición Solar:	18
2.3 Descripción del helióstato	23
2.3.1 Importancia del sistema de control para un helióstato	24
Capítulo 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	25
3.1 Análisis y categorización de los componentes utilizados en el diseño.....	25
3.1.1 Sistema Mecánico y físico del helióstato.....	25
3.1.2 Sistema de control del helióstato.....	27
3.1.2.1 Controlador Principal	27
3.1.2.2 Motores CD	29
3.1.2.3 Drivers de Motores de CD.	30
3.1.2.4 Encoders.....	31
3.1.2.5 Modulo Reloj Tiempo Real RTC Tiny I2C DS1307.....	32
3.1.2.6 Fuentes de Alimentación.....	33
3.1.2.7 Ethernet Shield	34
3.1.3 Análisis de costos	35
3.2 Ecuaciones del algoritmo de posición solar	36
3.3 Diseño y programación de la interfaz de control y monitoreo de datos.....	38
3.3.1 Diseño de la interfaz de monitoreo.....	38
3.4 Diseño del Sistema de Control	41
Capítulo 4. PRUEBAS Y RESULTADOS	45
4.1 Algoritmo de Posición Solar: Comparativa del Vector Solar	45
4.2 Comunicación Ethernet entre Arduino y PC.....	47
4.3 Programación	48
4.3.1 Obtención de la Fecha y Hora	48
4.3.2 Ángulos del Vector Solar	49
4.3.3 Lectura de Encoders: Posición Angular	50
4.4 Interfaz de monitoreo de variables en LabVIEW.....	51
4.5 Implementación del Sistema de Control del Helióstato.....	52
4.6 Instalación del Sistema de Control en el mini Helióstato de 5.6 m²	56
4.6.1 Acoplamiento de Motores de CD y Encoders.....	56
4.6.2 Montaje de Gabinete del Sistema de Control	57

4.7 Puesta en operación.....	59
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO	60
5.1. Conclusiones.....	60
5.2 Trabajos a Futuro	62
Bibliografía	63
.....	65
Anexos.....	65

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y la puesta en operación de un prototipo de sistema de control en lazo abierto para helióstatos de torre central, en el que se hace una propuesta de diseño económica capaz de abastecer los requerimientos y especificaciones necesarias para catalogar como eficiente y robusto el desarrollo del prototipo. Dicho sistema de control, permitirá poner en operación un mini helióstato de 5.6 m^2 , y con la metodología de programación aplicada correctamente a este proyecto, se podrá interactuar con una interfaz de monitoreo de las variables en tiempo real del helióstato. Variables tales como el vector solar, la hora estándar, la posición angular del helióstato en todo momento y la posición en la que el helióstato debe referenciarse de acuerdo con un target de apuntamiento.

Para el diseño del dispositivo se realizó una revisión bibliográfica de los conceptos necesarios para poder desarrollar el proyecto, posteriormente se realizó un análisis de los componentes y equipo necesario para implementar una solución al diseño del sistema de control. Se hace mención que el análisis de los componentes se hace de acuerdo a las características y especificaciones del helióstato, ya que se contaba con la estructura de éste, de acuerdo con esto los componentes fueron categorizados y cotizados para el sistema de control.

Adjunto al diseño, se realizó un análisis del algoritmo de posición solar que se implementaría para obtener el vector solar, por cuestiones de práctica se optó por utilizar el algoritmo de Duffie & Beckman, el cual realiza operaciones con ecuaciones que comprenden constantes como la posición geográfica del helióstato, la hora estándar y el día Juliano de acuerdo a la fecha actual.

Posteriormente se diseñó una interfaz en LabVIEW que se muestra en una PC conectada por medio de cable Ethernet al controlador principal y que mediante protocolo TCP/IP transmite los datos en forma de texto para interactuar con la interfaz en la que se puede monitorear las variables en tiempo real.

El sistema de control se implementó de acuerdo a la solución de diseño en el cual funge como controlador principal un Arduino Mega 2560 que realiza los cálculos del algoritmo y la adquisición de datos de los encoders, así como la obtención de la fecha y hora en tiempo real mediante un módulo externo, motivo por el cual se buscaba establecer una autonomía respecto al cálculo del vector solar, y no tener cierta dependencia de la PC para realizar este tipo de cálculos.

Como etapa final se realizaron una serie de pruebas de validación del funcionamiento de cada una de las etapas del sistema, tanto en la etapa de control como la etapa de potencia y se determinó el funcionamiento eficiente del sistema propuesto.

Agradecimientos

Lista de Figuras

Figura 1.1 Canal Parabólico en planta solar de Almería, España.	4
Figura 1.2 Sistema de concentración: Canal Parabólico.	4
Figura 1.3 Sistema de concentración: Disco Parabólico.....	5
Figura 1.4 Sistemas de concentración: Fresnel Lineal.	5
Figura 1.5 Sistema de concentración: Torre Central.....	6
Figura 1.6 Diseño Arquitectónico del CPH.	7
Figura 1.7 Torre central con blanco de pruebas óptico.	8
Figura 1.8 Diagramas de rayos de modos de operación del helióstato.....	9
Figura 1.9 Tipos de Helióstatos.	10
Figura 1.10 Metodología de solución del proyecto.	15
Figura 2.1 Diagrama de vectores referentes a la posición del Sol.....	18
Figura 2.2 Definición gráfica de los ángulos del vector solar	22
Figura 2.3 Diagrama del funcionamiento del Helióstato.	23
Figura 2.4 Fotografía y esquema de la estructura del Helióstato de 5.6 m2para el MSF.....	24
Figura 3. 1 Fotografía y esquema de la estructura del Helióstato de 5.6 m2para el MSF.....	26
Figura 3. 2 Controlador Arduino MEGA 2560 R3.	28
Figura 3. 3 Motor CD marca Bodine de 24V.	29
Figura 3. 4 Controlador de motores de DC MD03 24V/20A.	30
Figura 3. 5 Encoders modelo E6B2-CWZ1X.	32
Figura 3. 6 Módulo Reloj en Tiempo Real.	32
Figura 3. 7.Fuente de Alimentación NI PS-16 (10 A).....	33
Figura 3. 8 Arduino Ethernet Shield basada en el chip W5100.	35
Figura 3. 9 Diagrama a bloques de la secuencia del algoritmo de posición solar para la obtención del vector solar.	37
Figura 3. 10 Diagrama a bloques de las variables a desplegar en el diseño de la interfaz de monitoreo.	38
Figura 3. 11 Programa de comunicación mediante protocolo TCP/IP desarrollado en LabVIEW.....	39
Figura 3. 12 Diagrama a bloques del programa de análisis de la cadena de caracteres enviada desde el Arduino.....	40
Figura 3. 13. Diagrama a bloques de la programación final de la interfaz de monitoreo de la variables en LabVIEW.....	41
Figura 3. 14 Diagrama a bloques del conjunto de componentes que comprenden el sistema de control del helióstato.....	42
Figura 3. 15 Circuito adicional diseñado para seleccionar la salida a los motores en los dos modos de operación del sistema de control Manual /Automático.	43
Figura 3. 16 Diseño de PCB's de los circuitos adicionales al sistema de control del Helióstato.	44
Figura 4. 1 Gráfica comparativa del ángulo acimutal obtenido desde el Arduino MEGA y el cálculo realizado desde LabVIEW con la hora estándar.	45
Figura 4. 2Gráfica comparativa de la altura solar obtenida desde el Arduino MEGA y el cálculo realizado desde LabVIEW con la hora estándar.....	46

Figura 4. 3 Diagnóstico de Comunicación entre PC y Arduino MEGA 2560 mediante una dirección IP asignada.	47
Figura 4. 4 Diagrama de bloques del programa principal de conexión TCP/IP.....	48
Figura 4. 5 Programa desarrollado en Processing para obtener la hora y fecha en Arduino.....	48
Figura 4. 6 Visualización de la hora y día juliano en el monitor serial.	49
Figura 4. 7. Monitor Serial muestra los ángulos del vector solar obtenidos desde el Arduino.	50
Figura 4. 8 Gráfica de la retroalimentación angular del Encoder de Elevación.	51
Figura 4. 9 Gráfica de la retroalimentación angular del Encoder en Acimut.....	51
Figura 4. 10 Interfaz de monitoreo y control del Helióstato desarrollada en el software LabVIEW.....	52
Figura 4. 11 Implementación de los circuitos con relevadores RHL-2-12D-10H.....	53
Figura 4. 12. Conexión de los Drivers para los motores de CD VNH5019A.	54
Figura 4. 13 Implementación del PCB para conexiones del Arduino Mega 2560 e integración del Ethernet Shield.....	54
Figura 4. 14 Integración del sistema de control del Helióstato de Torre Central.....	55
Figura 4. 15 Acoplamiento de motores de CD y Encoders.....	56
Figura 4. 16 Primera Etapa de montaje del sistema de control del Helióstato.	57
Figura 4. 17 Instalación completa del sistema de control sobre el mini helióstato.	57
Figura 4. 18 Pruebas de funcionamiento del sistema de control.	58
Figura 4. 19 Pruebas preliminares del apuntamiento de la mancha solar del Helióstato.	59

Lista de Tablas

Tabla 2. 1 Tipos de radiación solar.....	17
Tabla 2. 2 Conteo del día Juliano de los 12 meses del año.	20
Tabla 3. 1Características generales del Arduino MEGA 2560 R3.	28
Tabla 3. 2 Especificaciones generales del Motor CD Bodine.	30
Tabla 3. 3 Tabla de cotizaciones de los componentes propuestos para el sistema de control.....	35
Tabla 3. 4 Tabla de cotizaciones de los componentes sistema de control desarrollado en el IER.	36

Lista de Abreviaturas

AIE	Agencia Internacional de Energía
mtep	millones de toneladas equivalentes de petróleo
MWh	Mega Watts hora
CPH	Campo de Pruebas de Helióstatos
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
IER	Instituto de Energías Renovables
LACYQS	Laboratorio Nacional de Concentración y Química Solar
HoSAFR	Horno Solar de Altos Flujos Radiativos
PTFAR	Planta Fotocatalítica para el Tratamiento de Aguas Residuales
SCADA	Supervision, Control and Data Acquisition
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
PWM	Pulse Width Modulation
ICSP	In Serial Circuit Programming
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static Random Access Memory
MHz	Mega Hertz
V	Volts
A	Amperes
mA	mili Amperes
NI-PS	National Instruments Power Supply
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
IP	Internet Protocol
RTC	Real Time Clock
LCD	Liquid Crystal Display

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia de las energías renovables

La sociedad actual se encuentra sometida a una serie de cambios que afectan en todos los niveles económicos y sociales, y que influyen directamente sobre las tendencias y hábitos de la población en general. Dentro de esta situación de cambio cabe destacar un aspecto importante que podemos denominar como “conciencia ambiental”, el cual podemos describir como un proceso en el cual, la sociedad comienza a tener conciencia y percepción de que los avances científicos y tecnológicos han contribuido a mejorar las condiciones de vida, sin embargo, consecuencia de estos procesos se han generado una serie de afectaciones graves con el medio ambiente.

El progreso de la humanidad permanece estrechamente ligado a la capacidad de proveerse y utilizar los recursos naturales, para satisfacer sus necesidades y requerimientos energéticos, dado el caso del desarrollo industrial y tecnológico que ha tenido durante los dos últimos siglos, en los que en gran medida se debe al aprovechamiento de los combustibles fósiles como el gas natural, el carbón y primordialmente al petróleo.

Según datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE), en 2009 el total del suministro de energía primaria en el mundo fue de 12,150 millones de toneladas equivalentes de petróleo (mtep) (1.413×10^{11} MWh). Los combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) representan el 80.9%, los cuales son datos desmesurados comparados con el porcentaje de energías renovables como la energía solar, geotérmica y eólica, las cuales representan apenas el 0.8% del total.¹

¹ Key World Energy Statistics, IEA, 2011.

Los problemas de contaminación ambiental se agudizan con el paso del tiempo, por ello es necesario aplicar políticas para la reducción y el control de las emisiones de contaminantes, así como la reducción en la generación de gases de efecto invernadero. Ante esta situación, toma especial importancia la alternativa de suplir las fuentes de combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, que son no contaminantes. Debe de entenderse por fuentes de energías renovables, como aquellos recursos que pueden ser explotados de manera indeterminada para generar energía si se emplean los mecanismos adecuados. Para hacer posible el uso de las fuentes renovables a gran escala, se requieren tecnologías con altas eficiencias, disminuyendo los costos de producción, que en estos momentos la hacen en muchos casos poco competitivas frente a las tecnologías convencionales que emplean combustibles fósiles [Brakmann et al., 2005].

1.2 Energía Solar

El sol es una fuente de vida que ha favorecido diferentes formas de energía en la tierra. La humanidad puede satisfacer sus requerimientos y necesidades si aprende a aprovechar de forma racional esta energía.

La energía solar directa que proviene del Sol es aquella que sin transformar, se traduce en calor e iluminación sobre la Tierra. Si se quiere aprovechar esta energía proveniente del Sol se necesitan sistemas de captación, transformación y almacenamiento que transformen la radiación solar en energía útil. Existen diferentes formas de captar la radiación del Sol:

Utilización Directa: También llamada energía solar térmica pasiva que se produce mediante la incorporación de acristalamientos y componentes arquitectónicos con elevada masa y capacidad de absorción de energía térmica. (Méndez & Cuervo, 2007).

Transformación en Electricidad: llamada energía solar fotovoltaica, que permite transformar la radiación solar en energía eléctrica por medio de células fotovoltaicas que integran los módulos fotovoltaicos, esta electricidad se puede utilizar

directamente o introducirla en acumuladores o baterías para aprovecharla con más eficiencia, o bien, inyectarla a la red eléctrica.

Transformación en Calor: consiste principalmente en el aprovechamiento de la radiación del Sol para aplicaciones que requieran el calentamiento de algún tipo de fluido que circulan por captadores solares, es la llamada energía solar térmica.

1.3 Energía solar térmica

La trascendencia de la energía solar fototérmica radica principalmente en la gama de aplicaciones para la cuál sea utilizada, diversas tecnologías han sido creadas para concentrar la radiación proveniente del sol y que pueden alcanzar rangos de temperaturas muy altos. Para incrementar los niveles de temperatura los sistemas fototérmicos emplean componentes ópticos y mecánicos que siguen al sol y concentran la radiación en un receptor. La superficie de la Tierra recibe al medio día solar 1000 W/m^2 de energía proveniente del sol, sin embargo, para aumentar la densidad de flujo de la radiación, es necesario concentrar los rayos de luz en un área más pequeña. (Estrada Gasca & Islas Samperio, 2010).

Los colectores solares planos consisten en la captación del calor de las radiaciones solares para calentar un fluido (agua o aceite térmico), que posteriormente, según la temperatura alcanzada, son utilizados para distintos usos ya sean domésticos o industriales. Una posibilidad es calentar agua para uso doméstico (baño, calefacción, etc.); la temperatura alcanzada en estas instalaciones no supera los 100°C . Si se concentran los rayos solares por medio de unos espejos especiales (sistema óptico) llamados colectores, se pueden conseguir temperaturas muy superiores y se genera el vapor necesario para mover una turbina que, asociada a un alternador, produce electricidad. Este es el sistema utilizado en la Plataforma Solar de Almería en España ver figura 1.1, uno de los complejos más importantes del mundo.

Existen muchas y diferentes aplicaciones solares térmicas, que se caracterizan por diferentes requerimientos de temperatura: calentamiento de agua para albercas (27-

30 °C), calentamiento de aire para secado y climatización de espacios (30-45 °C), cocción de alimentos (90-120 °C), calor para procesos industriales (40-225 °C, generación termosolar de potencia eléctrica (250-1000 °C) y producción de combustibles solares (500-2000 °C). (Arancibia Bulnes & Best Brown, 2010)



Figura 1.1 Canal Parabólico en planta solar de Almería, España.

1.3.1 Sistemas de concentración solar.

Existen cuatro tipos de sistemas de concentración solar para la generación de potencia eléctrica, calor de procesos y producción de combustibles solares:

Concentradores cilindro-parabólicos: Son concentradores de foco lineal con seguimiento en un solo eje, concentraciones de la radiación de 30 a 80 veces, alcanzando temperaturas entre 250 a 450 °C y potencias por campo unitario de 30 a 80 MW. (Romero Álvarez)

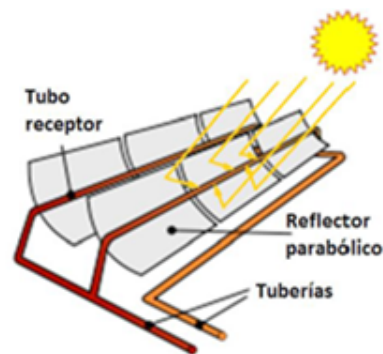


Figura 1.2 Sistema de concentración: Canal Parabólico.²

² Fuente: Solar PACES. Imágenes tomadas y modificadas de www.solarpaces.org

Discos parabólicos: Son pequeñas unidades independientes con reflector parabólico habitualmente conectado a un motor Stirling situado en el foco. Los niveles de concentración son superiores (1.000-4.000), operando con niveles de temperatura entre 450 a 1000 °C y las potencias unitarias son de 5 a 25 kW. (Romero Álvarez)

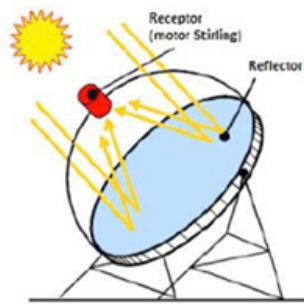


Figura 1.3 Sistema de concentración: Disco Parabólico.

Fresnel Lineal: Esta tecnología se aplica para obtener electricidad y, en algunos casos, energía térmica, con el mismo principio de un canal parabólico. El Fresnel lineal se basa en la concentración de los rayos solares utilizando espejos ligeramente curvos que se orientan hacia un reflector secundario al cual se reflejan los rayos del sol hasta un absorbedor en el cual circula un fluido de trabajo, generando directamente vapor saturado. Las plantas desarrolladas con este sistema son principalmente pilotos de hasta de 6 MWatts.

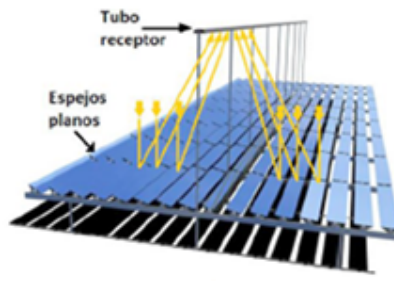


Figura 1.4 Sistemas de concentración: Fresnel Lineal.

Sistemas de torre o de receptor central: Consisten en un campo de helióstatos que siguen la posición del Sol en todo momento (elevación y acimut) y orientan el rayo reflejado hacia el foco colocado en la parte superior de una torre. Los órdenes de concentración son de 200 a 1.000, alcanzando niveles de temperatura de 350 hasta 1000 °C y las potencias unitarias de 10 a 200 MW. (Romero Álvarez)

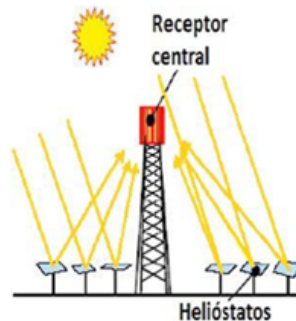


Figura 1.5 Sistema de concentración: Torre Central.³

En los sistemas de torre central, el componente óptico más importante es el helióstato, el cual tiene la función de concentrar los rayos del sol en el receptor ubicado en lo alto de la torre. Otra función que tiene el helióstato es realizar el seguimiento del sol a lo largo del día. Para ello se requiere de una instalación que permita caracterizar estos dispositivos.

1.4 Campo de Pruebas de Helióstatos

El Campo de pruebas de helióstato (CPH) ubicado en Hermosillo, Sonora, México, permite realizar investigaciones de los sistemas de potencia eléctrica basados en centrales térmicas solares de torre central. La instalación consta de un conjunto de helióstatos, una torre central de experimentación y un laboratorio de control (ver figura 1.6). Como parte de estas investigaciones, está el diseñar, construir y evaluar prototipos de helióstatos en condiciones de operación. (Marroquín García, 2011).

³ Fuente: Solar PACES. Imágenes tomadas y modificadas de www.solarpaces.org

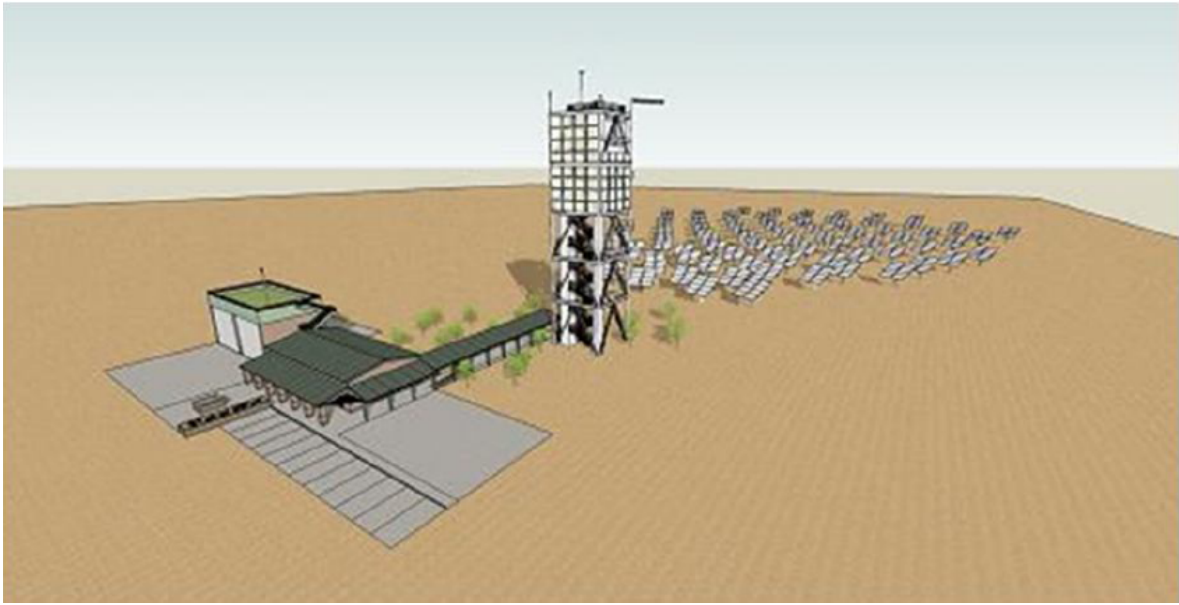


Figura 1.6 Diseño Arquitectónico del CPH.⁴

Hasta el momento, el CPH se encuentra con una primera etapa de construcción finalizada. Cuenta con un total de 16 helióstatos de 36 m² instalados de diferentes tipos y una torre con un blanco de pruebas óptico y un cuarto de control (ver figura 1.7).

⁴ Fuente: Marroquín, D. (2011). *Sistema de control para un conjunto de helióstatos*, IER-UNAM, Temixco, Morelos MX.

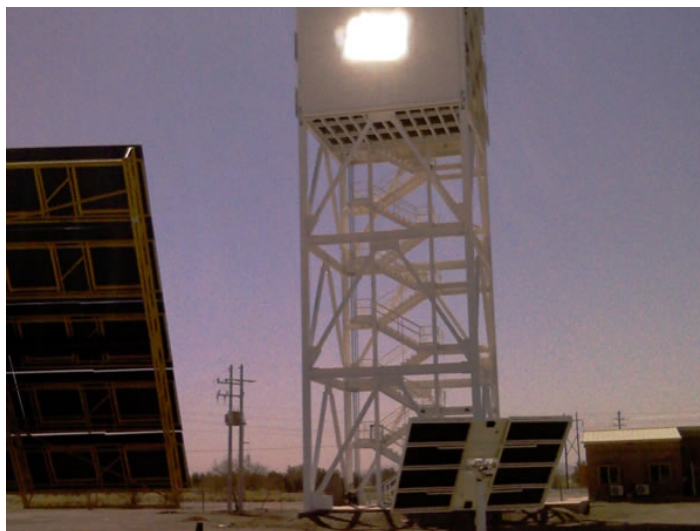


Figura 1.7 Torre central con blanco de pruebas óptico.⁵

1.5 Descripción de Helióstato de Torre Central

Tanto en los Sistemas de Torre Central como en los hornos solares, es necesario utilizar helióstatos para redireccionar la radiación solar ya sea hacia un receptor o hacia una segunda etapa de concentración en el caso del Horno Solar.

Las componentes principales de un helióstato son las facetas o espejos, las estructuras donde son montados las facetas, que a su vez se encuentran en una estructura de soporte mayor llamada armadura, los brazos, sistema de transmisión de movimiento (cabezal), el pedestal, la base, el sistema de control para el seguimiento y los elementos necesarios para el movimiento del mismo.

En desarrollos recientes, estos sistemas ya se utilizan espejos con una película delgada de plata, la cual debido al bajo contenido de hierro implican una mejora en la reflectancia, una mayor resistencia a la oxidación y consecuentemente, una mayor durabilidad. (Ochoa , 2012).

⁵ Imagen Recuperada de : <http://lacyqs.cie.unam.mx/es/index.php/instalaciones/campo-de-pruebas-de-heliostatos>

1.5.1 Funcionamiento de un Helióstatos de Torre Central

Existen dos modos de operación de Heliostatos según el sistema de concentración solar. El primero es el helióstato modo Torre Central, que consiste en mantener el vector de proyección apuntando siempre a un punto fijo del receptor sin importar el ángulo de incidencia en este.

El segundo modo es el de Horno Solar, donde a diferencia del modo de Torre Central, es necesario que el vector de proyección mantenga el ángulo de incidencia constante sobre el receptor, que en este caso es el concentrador del horno. Si los rayos inciden en el concentrador a un ángulo diferente, la imagen del sol se formará en un punto del plano focal desplazado respecto al foco nominal, como se observa en la figura 1.8.

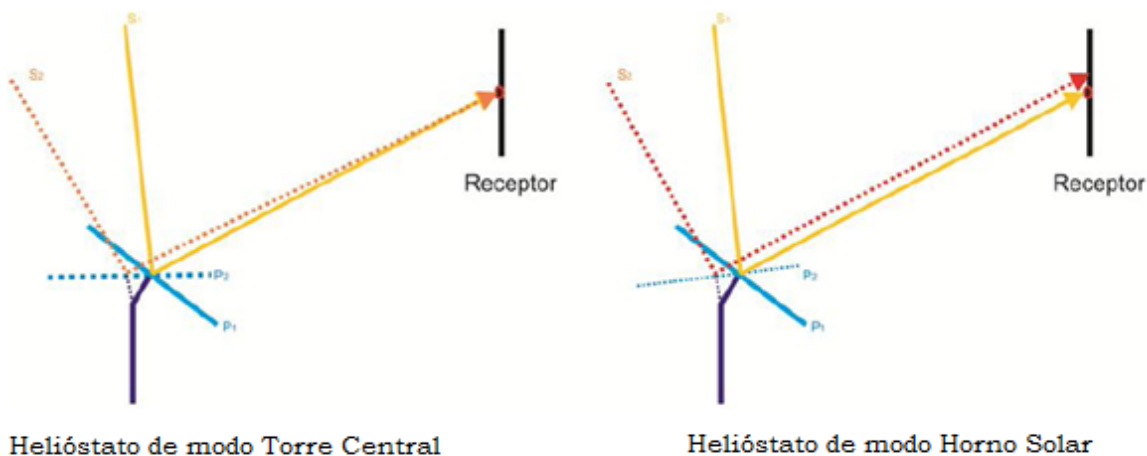


Figura 1.8 Diagramas de rayos de modos de operación del helióstato.⁶

Las configuraciones mecánicas de los heliostatos que se muestran en la figura 1.9 poseen un sistema de accionamiento diferentes, así como estructuras de diversos tipos, formas y tamaños, que en conclusión tienen como propósito común de tratar de captar la mayor cantidad de radiación solar de manera que el operario obtenga la

⁶ Imagen Recuperada y modificada de: Sistema de control para un conjunto de heliostatos, IER-UNAM, Temixco, Morelos MX.

capacidad de poner en funcionamiento el sistema completo así como realizar los diseños de manera económica.



a) Helióstato de espejos circulares cóncavos.



b) Helióstato de Herradura



c) Helióstato Plano de Múltiples Facetas



d) Helióstatos de membrana derecha

Figura 1.9 Tipos de Helióstatos.

1.6 Antecedentes de la organización

La misión del Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER) se establece que el objetivo principal de dicha organización es el realizar investigación básica, aplicada y desarrollo tecnológico en cuestiones de generación, conversión, almacenamiento y utilización de la energía enfocada principalmente a las fuentes renovables. Formar

estudiantes de posgrado y licenciatura a través de cursos y tesis o tesinas así como difundir los conocimientos que se adquieren en el área para alcanzar el desarrollo sustentable del país. Por otra parte, el objetivo del Departamento de Sistemas Energéticos para el que se está desarrollando el proyecto de control de un Helióstato de Torre central es realizar investigación y desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía y contribuir a la apropiación de tecnología avanzada por instituciones nacionales e internacionales. Para ello se requiere conocer los impactos, presentes y futuros de la energía en la sociedad, prestar servicios y educar en el área, para contribuir al desarrollo sustentable del país. Siendo el IER sede del laboratorio Nacional de Concentración y Química Solar (LACYQS), institución científica nacional creada con el propósito de consolidar una red multisede para el desarrollo de nuevas tecnologías de fuentes renovables de energía la cual genere conocimiento científico y tecnológico mediante tres instalaciones solares, tales como: Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH), un Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSAFR) y una Planta Fotocatalítica para el Tratamiento de Aguas Residuales (PFTAR). (UNAM-IER, 2005)

En el LACYQS donde se encuentra la instalación de CPH la cual es una plataforma experimental que consta de un conjunto de prototipos de 16 Helióstatos de entre los cuales 9 son del modelo CCADET-CIE DS-900, 1 del modelo CCADET-CIE PIR1, 3 helióstatos TxTEC DS900, 1 helióstato CCADET-CIE DS48, 1 del modelo TxTEC H6 y un arreglo de 9 mini helióstatos modelo MEC, así como una torre central de experimentación y un laboratorio de control (Marroquín García, 2011).

Parte del objetivo principal de este proyecto está el optimizar los costos del sistema de control para un prototipo de helióstato ya que el primer sistema de control desarrollado para un conjunto de Helióstatos del CPH el cual contaba en su diseño con dispositivos controladores de la marca *National Instruments* (NI) constituyó un costo elevado en el producto final de dicho sistema.

1.7 Planteamiento del problema

En el IER-UNAM se desarrolló un sistema de control en lazo abierto para Helióstatos donde se utilizaron equipos y elementos de altos costos que incrementaron el valor total del producto final, dando como resultado, que la implementación de la tecnología en concentraciones mayores, presente un alto costo del producto, afectando económicamente al IER. Por lo tanto, con el fin de reducir los costos del producto, se pretende diseñar un nuevo equipo que permita mantener la calidad y eficiencia en el funcionamiento del sistema de control del Helióstatos.

El sistema de control actual de los helióstatos de torre central dispone de componentes National Instruments que fueron elegidos gracias a la versatilidad y compatibilidad con el software LabVIEW que estos ofrecen. El controlador principal es un módulo cRIO – 9104 encargado de establecer comunicación con los módulos NI-9505 que tienen como función controlar los motores de corriente directa, así como su retroalimentación de los encoders de censo de la posición angular de los mismos. El sistema SCADA que se encuentra en el CPH, fue desarrollado en la plataforma LabVIEW en los que el operario puede supervisar y modificar las variables del sistema desde una PC en tiempo real.

1.8 Objetivo

Desarrollar un sistema de control en lazo abierto de un Helióstatos basado en la plataforma de desarrollo Arduino en conjunto con un sistema SCADA desarrollado en el software LabVIEW.

1.9 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica en torno al control de los helióstatos y sus sistemas de comunicación.

- Analizar y categorizar los componentes y equipo electrónico necesario para optimizar el sistema de control del Helióstato.
- Cotizar los materiales y equipo necesario para la implementación del sistema de control del Helióstato.
- Estudio de las ecuaciones para el cálculo de la posición solar y elección de la mejor alternativa para el seguimiento.
- Diseñar del sistema de control en lazo abierto para acimut y elevación del helióstato, así como desarrollar la interfaz gráfica de comunicación entre el sistema de control Arduino y la PC en el software de programación LabVIEW.
- Construir el sistema de control en lazo abierto del helióstato de torre central.
- Instalar el sistema de control en el mini helióstato de 5.6 m^2 de la plataforma solar del IER.
- Realizar una campaña de caracterización del sistema de seguimiento con el mini helióstato.

1.10 Justificación

El desarrollo del sistema de control para un helióstato desarrolló en el IER se realizó con dispositivos electrónicos y mecánicos robustos de alto costo que permitieron a dicho sistema comportarse de manera eficaz cumpliendo los requisitos establecidos. Sin embargo, con el fin de reducir costos de implementación en el desarrollo de este proyecto se pretende diseñar y construir un sistema de control de lazo abierto con elementos electrónicos y mecánicos sin alterar la eficiencia en el funcionamiento del Heliostato de Torre Central.

1.11 Alcances y limitaciones

El desarrollo del proyecto tiene como alcance principal lograr la optimización de los recursos en la implementación del sistema de control de lazo abierto para un helióstato.

Diseñar y estructurar el proyecto que cumpla los requisitos de funcionalidad y calidad para el helióstato.

Puesta en operación del sistema de control en el helióstato, instalarlo y operarlo en al menos un helióstato.

La principal limitación para este proyecto es el tiempo de desarrollo, el cual es de tan solo 4 meses. Por otra parte, la comunicación del sistema de control se realizará por medio de Ethernet, a consecuencia de esto solo se podrá monitorear variables siempre y cuando exista una conexión a internet entre el puesto de control y el sistema.

Para lograr la autonomía del dispositivo se requiere desarrollar una serie de componentes adicionales, como por ejemplo un reloj digital, sistemas de protección, sistema de control manual e indicadores externos al dispositivo para monitoreo de su estado.

El diseño del sistema propone únicamente drivers para motores de corriente directa, si se requiere utilizar algún otro tipo de motor, se tendrán que modificar las tarjetas controladoras que se adapten a los requerimientos del usuario.

La retroalimentación de la posición angular se requiere realizar a través de encoders, lo cual implica una estructura particular de programación.

Debido a la velocidad de procesamiento del microcontrolador (μC), se decidió optar por el algoritmo de seguimiento solar con menos complejidad de análisis, conservando el porcentaje de efectividad de obtención de los ángulos del vector solar.

1.12 Metodología de solución

En la Figura 1.10 se hace una breve descripción mediante un diagrama a bloques de la metodología de solución del proyecto en la que se inicia haciendo una revisión bibliográfica de todos los conceptos y teoría destacada en la que se busca describir aspectos importantes sobre el proyecto. Una segunda etapa llamada análisis en la que

se lleva a cabo una selección de los componentes que conformarán el sistema de control del helióstato, así como la cotización de los mismos.

Una etapa de diseño en la que se lleva a cabo el cálculo del vector solar por medio del estudio de las ecuaciones que rigen el algoritmo de posición solar, además se realiza el diseño de la interfaz de control y monitoreo de las variables que rigen el sistema de control del helióstato. La solución del diseño del sistema de control como un conjunto de los componentes elegidos.

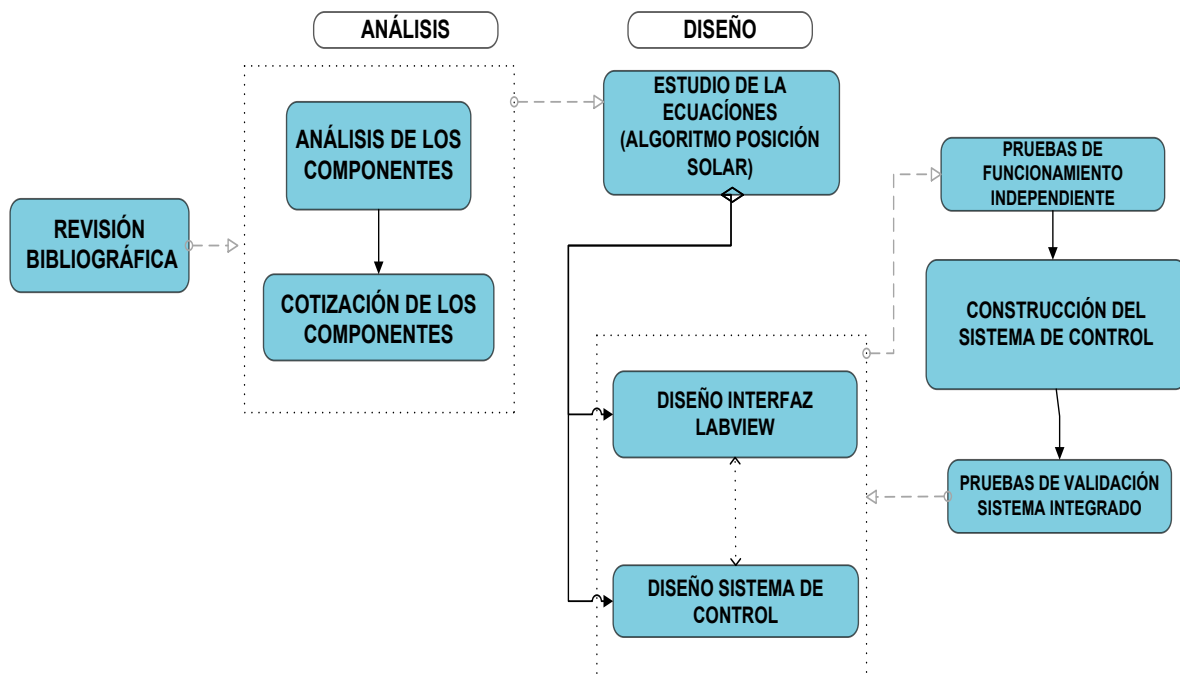


Figura 1.10 Metodología de solución del proyecto.

Las pruebas de funcionamiento independiente de los componentes y monitoreo de las variables en las que se observe el comportamiento del sistema en conjunto que permitirá realizar la construcción del dispositivo para posteriormente pasar a la etapa de validación del correcto funcionamiento del sistema.

1.13 Organización de la tesina

A continuación se presenta una breve descripción del contenido de la tesina, explicado por capítulos:

Capítulo 2. Marco Teórico: Se presenta contenido bibliográfico que posee conceptos necesarios para el entendimiento del desarrollo del proyecto.

Capítulo 3. Diseño y Construcción del Sistema de Control: en este capítulo hace referencia al desarrollo de la solución del sistema de control para helióstatos de torre central, así como evidencias de construcción, programación del algoritmo de seguimiento, programación en la plataforma LabVIEW de los sistemas de supervisión y monitoreo del helióstato.

Capítulo 4. Pruebas y Resultados: el contenido de este capítulo comprende todas aquellas evidencias de la metodología de implementación y pruebas de validación del proyecto, las cuales en base a la etapa de diseño se corroboraron en base a pruebas.

Las pruebas de funcionamiento independientes de los componentes se incluyen en este apartado, así como las evidencias gráficas de los objetivos de implementación e instalación del sistema de control del helióstato,

Capítulo 5. Conclusiones: comprende todas las conclusiones y propuestas del proyecto, los razonamientos y experiencias que se tuvieron en el desarrollo del proyecto, así como las propuestas de trabajos a futuro de la tesina.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Radiación Solar

El sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de 5.778 K, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones que producen una pérdida de masa que se traduce en energía. Esta energía liberada del Sol, se transmite al exterior mediante la denominada, radiación solar. (Méndez & Cuervo, 2007).

La radiación en el Sol es de 63, 450,720 W/m². El valor de la radiación recibida fuera de la atmosfera sobre una superficie perpendicular a los rayos solares es conocida como constante solar con 1, 353 W/m², variable durante el año de $\pm 3\%$ a causa de la elipticidad de la órbita terrestre. La radiación solar que llega a la tierra pasa a través de la atmosfera, teniendo diferentes procesos de absorción y dispersión al entrar en contacto con los diferentes componentes de la atmosfera terrestre. Por ello es que existen diferentes tipos de radiación solar a nivel terrestre.

2.1.1 Tipos de radiación Solar.

Existen tres tipos de radiación solar dependiendo de cómo incidan los rayos sobre la Tierra:

RADIACIÓN	
Directa	Es la radiación recibida desde el Sol sin que se desvíe a su paso por la atmosfera.
Difusa	Sufre cambios en su dirección principalmente a causa de la reflexión y difusión en la atmósfera.
Albedo	Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

Tabla 2. 1 Tipos de radiación solar.

2.2 Movimiento del Sol

El Sol presenta trayectorias distintas de acuerdo a la estación del año, en invierno asciende con minoridad, y en verano sobrepasa la altura que presenta en invierno, lo que provoca que las sombras sean distintas en estas diferentes estaciones.

Para conocer el movimiento del Sol se manejarán dos diferentes coordenadas con dos ángulos, que permite saber en cada momento donde se posiciona el Sol.

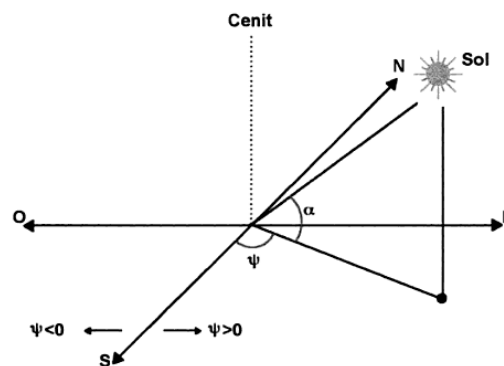


Figura 2.1 Diagrama de vectores referentes a la posición del Sol (Méndez & Cuervo, 2007) .

Dónde:

$\alpha = \text{Altura Solar}$: es el ángulo formado por la posición aparente del Sol en el cielo con la horizontal del lugar o la posición de un objeto.

$\varphi = \text{Acimut Solar}$: es el ángulo horizontal formado por la posición del Sol, y la dirección del verdadero Sur.

2.2.1 Algoritmo de posición Solar:

Se han desarrollado algoritmos relativamente sencillos que con datos mínimos de entrada permiten determinar los parámetros solares que se necesitan para obtener el vector solar. El algoritmo propuesto en 1980 por los autores Duffie y Beckman en su libro “Solar Engineering of Thermal Process” presenta aproximaciones para determinar

la declinación solar (δ) y la ecuación del tiempo (E), presentadas por Cooper y Spencer respectivamente.

La declinación solar (δ) es obtenida mediante una aproximación que está en función del día del año (N). El resto de los ángulos solares, cenital (θ_z), azimutal (γ_s) y altura solar (α_s), para un punto P ubicado en la superficie terrestre, son obtenidos mediante un cálculo analítico que supone la geometría de la Tierra como una esfera perfecta. (Marroquín García, 2011).

A este conjunto de ecuaciones presentadas por diferentes autores se le denomina Algoritmo de Duffie & Beckman. Los datos requeridos para el cálculo del vector solar son:

- Día Juliano del año (N),
- Tiempo Real (Hora, Minuto, Segundo)
- Posición Geográfica, Latitud (ϕ) y Angulo Horario (ω). Este último calculado a partir de la Longitud Local (L_{loc}) y Estándar (L_{std}).

Partiendo de los datos antes mencionados se obtiene la variable B, la cual está en función del día Juliano iniciando este desde el 1^{ero} de enero hasta el día 365 del año para años no bisiestos. En caso de ser año bisiesto la cuenta del día Juliano sería de 366. Ver Tabla 2.1.

MES/DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Enero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Febrero	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59			
Marzo	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Abril	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	
Mayo	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151
Junio	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	
Julio	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212
Agosto	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243
Septiembre	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	
Octubre	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304
Noviembre	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	
Diciembre	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365

Tabla 2. 2 Conteo del día Juliano de los 12 meses del año.

Se obtiene B a partir de la siguiente ecuación:

$$B = \frac{(N-1)360}{365} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (\text{Ec. 1})$$

Duffie y Beckman (1991), mencionan que es necesario convertir la hora estándar aplicando dos correcciones. Primero, existe una corrección constante por la diferencia de longitud (DLO) entre el meridiano donde se ubica el observador (L_{loc}) y el meridiano estándar en el cual está basado la hora local (L_{std}):

$$DLO = \frac{4(L_{std} - L_{loc})}{60} \quad (\text{Ec. 2})$$

La segunda corrección es la ecuación del tiempo (E), la cual considera las perturbaciones de la rotación de la Tierra (Villeda et al, 2014):

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032079 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04069 \sin 2B) \quad (\text{Ec. 3})$$

El ángulo de declinación de la Tierra (δ) define la posición angular del Sol al mediodía solar, es decir, en el momento en que el Sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador. Este parámetro depende del día del año, puede calcularse con la expresión:

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284+N)}{365} * \frac{\pi}{180}\right) \quad (\text{Ec. 4})$$

Para el cálculo de la hora solar se toman en cuenta los siguientes parámetros:

Siendo la hora estándar (HE), se calcula con la siguiente ecuación:

$$HE = H + \frac{M + \frac{S}{60}}{60} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

H: Horas del día., M: Minutos. , S: Segundos.

A partir de la obtención de la hora estándar podemos calcular la hora solar con la siguiente ecuación:

$$HS = 4 * O * (L_{std} - L_{loc}) + E + (H * 60 + M + \frac{S}{60} - HV) \quad (\text{Ec. 6})$$

Siendo:

O: Orientación del ángulo acimut solar medido hacia el este positivamente y al oeste negativamente.

HV: Valor del horario de verano, correspondiente a un 0 si no se encuentra activo y un 60 (1 hora adicional) si se encuentra en el mismo.

El ángulo horario (ω) es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo negativo en las mañanas y positivo por las tardes, se calcula con la ecuación:

$$\omega = (HS * 60 - 12)15 \quad (\text{Ec. 7})$$

Obteniendo todos los datos anteriores a partir de las constantes mencionadas se calculan los ángulos correspondientes al vector solar,

El cenit (θ_z) es el ángulo formado entre el cenit local y la línea que une al usuario u observador y el Sol, que varía desde 0° hasta 90° . La elevación solar α , se define como la altura angular del Sol sobre el horizonte celestial del observador, este ángulo varia también entre 0° y 90° , se define también como el complemento del ángulo cenital.

El acimut solar (γ_s) es el ángulo en el cenit local que se forma entre el plano meridiano del observador y el plano de un gran círculo que pasa por el cenit y el sol. Es medido hacia el este positivamente, oeste negativamente y de este modo varía entre 0° y $\pm 180^\circ$. Para entender la formación de los ángulos véase la Figura 2.2.

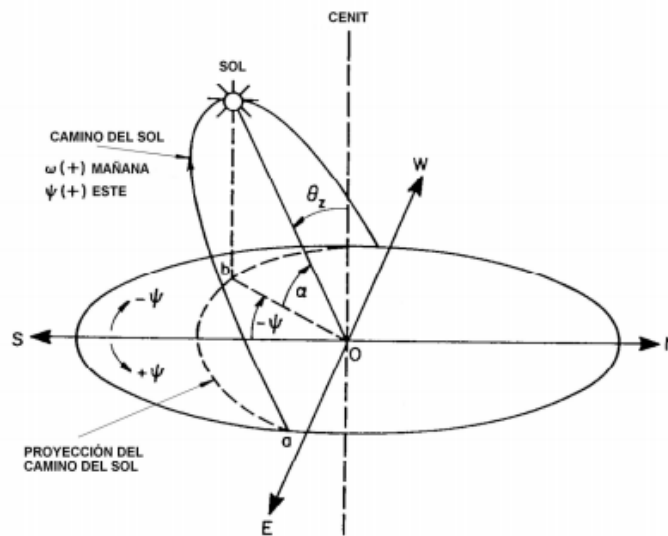


Figura 2.2 Definición gráfica de los ángulos del vector solar: Acimut solar, elevación solar y el cenit.⁷

Para calcular el ángulo cenital (θ_z) se procede con la siguiente fórmula:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (\text{Ec. 8})$$

Dónde:

δ = la declinación solar.

φ = latitud local .

ω = el ángulo horario .

Como se mencionó anteriormente el ángulo de elevación solar es el complemento del ángulo cenital dado por la siguiente fórmula:

$$\theta_\alpha = 90 - \theta_z \quad (\text{Ec. 9})$$

⁷ Imagen recuperada de: <http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6839/10Nvm10de17.pdf?sequence=11>

El ángulo en acimut solar (γ_s), viene definido por la ecuación 10:

$$\gamma_s = \sin^{-1} \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta_z} \quad (\text{Ec. 10})$$

2.3 Descripción del heliostato

La función principal de un heliostato es captar la radiación proveniente del sol y proyectarla en un punto específico donde se encuentre un receptor.

Para que esta situación se dé, es necesario que el vector normal al plano del espejo bisecte el ángulo formado entre el vector de incidencia solar y el vector proyección. Este último vector va del centro de plano del espejo al punto deseado de incidencia. (Marroquín García, 2011)

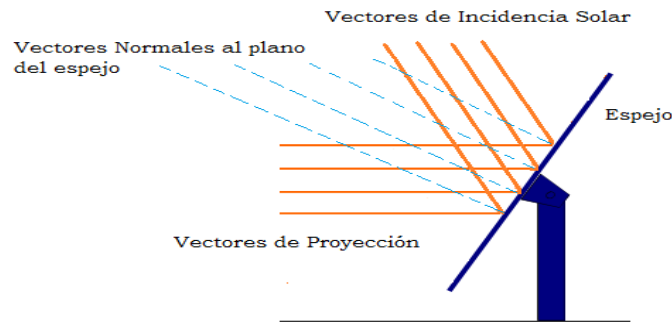


Figura 2.3 Diagrama del funcionamiento del Heliostato.

El heliostato de 5.6 m^2 para el Mini Horno Solar o MSF (*por sus siglas en inglés Mini Solar Furnace*), fue diseñado para asegurar que durante un cierto periodo de tiempo el haz de radiación solar cubra todos los espejos del concentrador.



Figura 2.4 Fotografía y esquema de la estructura del Helióstato de 5.6 m² para el MSF.

El helióstato del MSF fue diseñado para operar en Temixco, Morelos con latitud: $18^{\circ} 50' 20.81''$ N, que se encuentra por debajo del Trópico de Cáncer, en esta misma latitud, el 21 de Junio, en el solsticio de verano la trayectoria solar pasa a 4.5° al norte del cenit. El solsticio de verano fue elegido como un parámetro de diseño, ya que representa la declinación máxima de la trayectoria solar durante el año. (Pérez Rábago C. A., 2003)

2.3.1 Importancia del sistema de control para un helióstato

Para el siguiente trabajo se ha puesto en consideración utilizar un sistema de control en lazo abierto el cual utiliza la posición geográfica del helióstato y época del año para realizar la automatización del seguimiento solar. La función primordial del controlador es obtener la posición solar y vectorizar ésta en un punto determinado, obteniendo dicha vectorización, se mandan indicaciones los actuadores del seguidor para mantener un corto margen de error o desviación del punto de concentración.

Para poder calcular los ángulos en acimut y elevación del helióstato es indispensable contar con un algoritmo de posición solar y realizar las operaciones correspondientes en el controlador, así como conocer la configuración mecánica del helióstato y el modo de operación en que éste se manipulará.

Capítulo 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En el siguiente capítulo se hará mención de la metodología de solución que se llevó a cabo para realizar el desarrollo del sistema de control para un helióstato.

3.1 Análisis y categorización de los componentes utilizados en el diseño

En el siguiente apartado se hace énfasis en la elección del equipo y los componentes necesarios para desarrollar el sistema de control del helióstato de 5.6 m^2 para el mini horno solar, cabe mencionar que la elección de éstos elementos se hicieron para cumplir el objetivo de optimizar los costos de acuerdo al sistema ya existente, con elementos Compact RIO de *National Instruments*, donde más adelante se presentará una tabla comparativa de los costos del sistema desarrollado en este proyecto con el existente.

3.1.1 Sistema Mecánico y físico del helióstato

La estructura mecánica del helióstato al que se le implementó el sistema de control presenta ciertas características mecánicas que influyeron directamente en la elección de los componentes del sistema.

El mecanismo de transmisión del helióstato fue diseñado mediante el uso de un par de motor-transmisión comerciales de la marca Winsmith, con una alta relación de engranaje (10.000:1). Los ejes de transmisión están acoplados teniendo en cuenta un ángulo de 90 °. La transmisión para el movimiento de acimut se fija en el pedestal del helióstato y el eje de la corona está unido a una caja de cojinete. Los brazos del helióstato apoyan la estructura donde se coloca los espejos. El helióstato consta de 4 espejos cuadrados con un espesor de 6 mm y la reflectividad de 0,86. Cada espejo ofrece un área de 2.89 m^2 y la superficie total de proyección es 5.6 m^2 , (ver figura 3.1). Los espejos del helióstato se colocan a un marco cuadrado de 3.6 m^2 y están unidos con un adhesivo de poliuretano elástico con una resistencia de 16 kg-cm^2 . Es importante indicar que el marco del helióstato se ha rectificado con una tolerancia de $\pm 0,1\text{ mm}$ para asegurar la planitud de la superficie de reflexión. (Pérez Rábago, et al, 2010).



Figura 3. 1 Fotografía y esquema de la estructura del Helióstato de 5.6 m^2 para el MSF.⁸

⁸ Imagen recuperada de:
http://lacyqs.cie.unam.mx/es/images/lacyqs/publicaciones/Memorias_Congreso/02_sp10_capr.pdf

3.1.2 Sistema de control del helióstato

Una de las clasificaciones de control utilizadas para la automatización del seguimiento del Sol, es la de controlador de lazo abierto, la cual calcula la posición del sol de acuerdo a la localización geográfica del helióstato y a la época del año. Para este proyecto se ha utilizado un sistema de control de lazo abierto, que calcula en tiempo real la posición del helióstato.

La propuesta del sistema de control para este proyecto se hace para utilizar un controlador para el helióstato que nos brinde la versatilidad para establecer comunicación con un sistema de monitoreo y supervisión desde una PC ubicada en un puesto de control. La descripción de los componentes se hace a continuación.

3.1.2.1 Controlador Principal

El controlador es una placa de desarrollo Arduino MEGA 2560 R3 es una placa de desarrollo electrónica que se basa en el chip ATmega2560. Lleva 54 entradas/salidas digitales (de los cuales 15 pueden utilizarse para salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas seriales), un cristal oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP y un botón de reset.

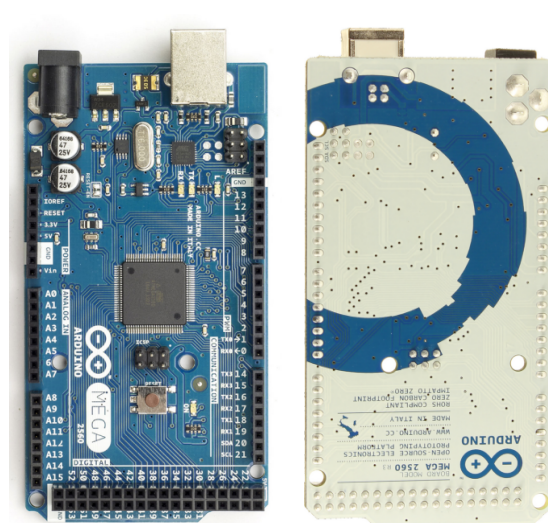


Figura 3.2 Controlador Arduino MEGA 2560 R3.⁹

El análisis para la selección del controlador se basó en los requerimientos de entradas/salidas, procesamiento de la información y accesibilidad para el desarrollo del programa ya que se requiere que el sistema sea accesible al usuario para modificar variables, también para fines de escalabilidad que se puedan aplicar al proyecto en futuros desarrollos.

Características Generales del controlador:

Microcontroladores	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente continua para las E / S Pin	40 mA
Corriente de la CC para Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB, 8 KB utilizado por el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz

Tabla 3.1 Características generales del Arduino MEGA 2560 R3.

Alimentación (Potencia):

El Arduino MEGA puede alimentarse a través de la conexión USB, y si se requiere con una alimentación externa; esta alimentación se puede realizar por medio de un

⁹ Imagen recuperada y modificada de: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560#.UxoHVfI5N1Z>

adaptador AD-DC con un enchufe de 2.1mm en el conector de alimentación de la placa, o bien con dos cables conectados al Vin y GND de la placa, mencionando la tensión de alimentación de la placa se encuentra entre 6 -20V. Si se suministran menos de 7V la placa puede ser inestable y si se utilizan más de 12V la placa puede dañarse al sobrecalentarse el regulador. La alimentación típica se encuentra entre los 7 -12V.

Memoria:

El ATmega2560 tiene 256 KB de memoria flash para almacenar código (de los cuales 8 KB se utiliza para el gestor de arranque), 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM (que puede ser leído y escrito con la librería EEPROM). (Arduino, 2014)

3.1.2.2 Motores CD

Se utilizaron motores marca Bodine para el movimiento de los dos ejes de giro. Debido al diseño de la transmisión se tomó en cuenta utilizar este tipo de motores ya que el torque que manejan éstos es suficiente para mover el helióstato en ambos sentidos, sin afecciones en la corriente consumida por el motor y en el movimiento de la transmisión.



Figura 3. 3 Motor CD marca Bodine de 24V.

Número de modelo	0044
Categoría	Series 24A Motor CD.
Velocidad (rpm)	2500
Torque nominal (oz-in)	22
Tensión nominal	24VDC
Amperios	2.6
HP Motor	1/18
KT (oz-in / A)	9.2
KE (V / krpm)	6.8
Winding Resistencia (ohmios)	2
Winding Inductancia (mH)	6.7
Inercia del rotor (oz-in-sec ²)	0.007
Carga Radial (lbs)	25
Longitud XH (pulgadas)	4.68
Peso (libras)	3.4
Tipo de producto	24A4BEPM

Tabla 3. 2Especificaciones generales del Motor CD Bodine.

3.1.2.3 Drivers de Motores de CD.

El driver para controlar los motores de 24 Vcd MD03 es un controlador de motor de corriente continua de mediana potencia, diseñado para proporcionar más potencia que los controladores basados en un único circuito integrado. Las principales características son la facilidad de uso y la flexibilidad. La potencia del motor es controlada mediante Modulación de Anchura del Pulso (PWM) del puente en H a una frecuencia de 7,8Khz. (Electronics, 2010)

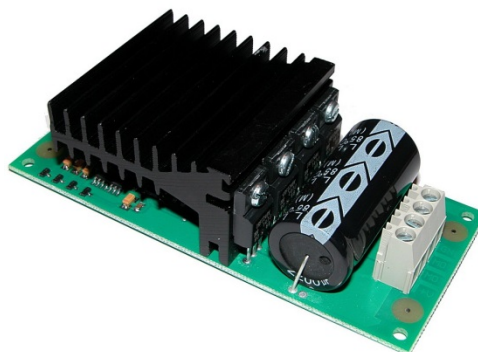


Figura 3. 4 Controlador de motores de DC MD03 24V/20A. ¹⁰

¹⁰ Imagen recuperada de: <http://www.superrobotica.com/s310110.htm>

Los 15V de la tensión de control del MOSFET se generan en el mismo circuito mediante una bomba de carga, por lo que solo se requieren 5V a 50 mA para la alimentación del circuito, además de la alimentación del motor que está comprendida entre los 5 y los 24V dependiendo de los requerimientos del motor.

El modulo puede controlarse de 5 formas diferentes:

1. Modo bus I2C. Hasta ocho módulos MD03 con direcciones seleccionables mediante micro interruptores.
2. Entrada analógica 0V - 2.5V - 5V. 0V un sentido, 2,5V parado y 5V la otra dirección.
3. Entrada analógica 0v - 5v. para control de la velocidad con control independiente de la dirección.
4. Modo RC. Para controlarlo directamente desde un receptor de radio control estándar.
5. Señal PWM que gracias al filtro incorporado puede usar entre 0% y 100% con una frecuencia de 20Khz o más.

3.1.2.4 Encoders

Con fines de diseño se decidió utilizar el mismo tipo de Encoders para censar la posición del helióstato en los dos ángulos, los Encoders se encuentran acoplados a la transmisión del helióstato para obtener las cuentas en los giros de la misma. Los Encoders utilizados son de la marca Omron modelo E6B2-CWZ1X se trata de un Encoder óptico rotatorio de tipo incremental. Este tipo de Encoders tienen una resolución de 4000 pulsos/revolución.



Figura 3. 5 Encoders modelo E6B2-CWZ1X. ¹¹

3.1.2.5 Modulo Reloj Tiempo Real RTC Tiny I2C DS1307

El siguiente módulo es un dispositivo electrónico capaz de proporcionar la hora en tiempo real, con horas, minutos y segundos, así como la fecha en un formato de día, mes y año. La implementación del circuito en el sistema de control es con el fin de obtener de manera independiente los datos antes proporcionados para poder realizar el proceso del seguimiento del sol de forma automática, ya que al introducir estos datos de manera externa permitirán al controlador realizar los cálculos de manera independiente sin dependencia de la computadora.

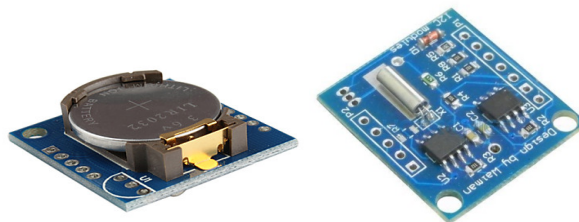


Figura 3. 6 Módulo Reloj en Tiempo Real.

¹¹ Imagen recuperada de: http://www.ia.omron.com/data_pdf/data_sheet/e6b2-c_dsheets_csm491.pdf

Especificaciones

- Interface: I2C dos alambres
- Resolución: Horas : Minutos : Segundos : AM/PM
- Calendario: Día, Mes, Fecha-Año
- Compensación por año bisiesto: Si
- Calendario completo hasta el año 2100
- Batería de respaldo incluida
- Pin de salida de 1Hz
- 56 bytes de memoria de usuario disponibles
- Tamaño: 25x35x7 mm
- Peso: 7 gramos.

3.1.2.6 Fuentes de Alimentación

Las Fuentes de alimentación NI PS-15 (5 A), NI PS-16 (10 A), NI PS-17 (20 A) tienen un diseño compacto y robusto. Son ideales para alimentar cualquier componente remoto por tratarse de fuentes conmutadas y de voltaje regulado. (Marroquín García, 2011).



Figura 3. 7.Fuente de Alimentación NI PS-16 (10 A).¹²

¹² Imagen recuperada de: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207474>.

Como cualquier sistema de control, es indispensable separar la etapa de potencia de la de control. Para lograr esto se propone una fuente modelo *NI PS-16* (10 A) para alimentar al controlador. Para determinar la fuente necesaria para la etapa de potencia se tomó en cuenta el tipo de motor y la cantidad de helióstatos.

Especificaciones:

- Entrada de 115/230 VAC de 1 fase, salida de 24 a 28 VDC, 10 A
- Fuente de alimentación para CompactRIO, Compact FieldPoint, NI Single-Board RIO, NI Smart Cameras y NI TPCs
- Potencia de salida completa de 240 W entre -25 y +60 °C, (depreciada 6 W/°C desde 60 a 70 °C)
- La reserva de potencia del 20 por ciento para cargas dinámicas se puede usar continuamente hasta 45 °C

3.1.2.7 Ethernet Shield

La Arduino Ethernet Shield permite a una placa Arduino conectarse a internet. Está basada en el chip Ethernet Wiznet W5100 . El Wiznet W5100 provee una dirección IP la cual permite establecer comunicaciones mediante los protocolos TCP y UDP. Usa la librería Ethernet para escribir programas que se conecten a internet usando la shield. La Ethernet shield dispone de unos conectores que permiten conectar a su vez otras placas encima y apilarlas sobre la placa Arduino. (Arduino, 2014)

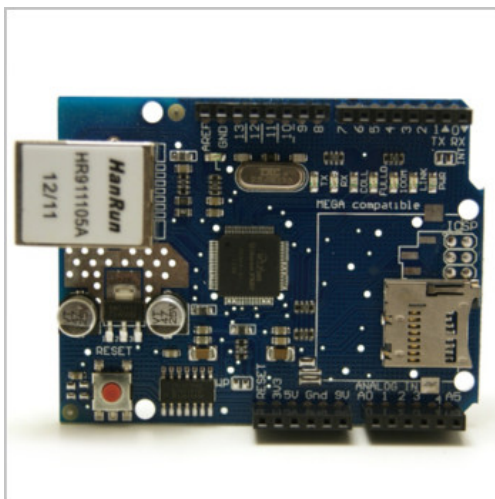


Figura 3.8 Arduino Ethernet Shield basada en el chip W5100.

El Arduino Ethernet es implementado en el circuito con fines de establecer una comunicación por medio de una red local desde el cuarto de control, debido a que en el CPH algunos helióstatos se encuentran a distancias mayores a los 40m.

Especificaciones:

- Puede ser usado como servidor o cliente
- Controlador: W5100
- Con slot para micro-SD
- Con capacidad TCP y UDP

3.1.3 Análisis de costos

Para verificar que el objetivo de optimizar los costos del proyecto se cumpla se presenta una tabla de cotizaciones del material en el que se hace hincapié de una comparativa entre el costo de los componentes del sistema desarrollado con dispositivos National Instruments y los propuestos en este proyecto.

Componente	Cantidad	Precio Unitario	Total Precio
Arduino MEGA 2560 R3	1	\$ 525.00	\$ 525.00
Drivers Motor CD VNH5019A	2	\$ 440.00	\$ 880.00
Encoders E6B2-CWZ1X	2	\$ 1,668.00	\$ 3,336.00
Motores Bodine Modelo 0044	2	\$ 2,448.00	\$ 4,896.00
RTC Tiny DS1307	1	\$ 80.00	\$ 80.00
Fuente Alimentación NI PS-16	1	\$ 3,670.00	\$ 3,670.00
Arduino Ethernet Shield	1	\$ 350.00	\$ 350.00
Total			\$ 13,737.00

Tabla 3.3Tabla de cotizaciones de los componentes propuestos para el sistema de control.

En la Tabla 3.4 se presenta la cotización del sistema de control implementado con componentes National Instruments desarrollado en el IER.

Componente	Cantidad	Precio Unitario	Total Precio
Controlador cRIO NI 91-04	1	\$ 44 770.00	\$ 44 770.00
Módulos NI 9505	2	\$ 6, 590.00	\$ 13, 180.00
Encoders E6B2-CWZ1X	2	\$ 1, 668.00	\$ 3, 336.00
Motores Bodine Modelo 0044	2	\$ 2, 448.00	\$ 4, 896.00
Fuente Alimentación NI PS-16	1	\$ 3, 670.00	\$ 3, 670.00
Total			\$ 69, 852.00

Tabla 3. 4Tabla de cotizaciones de los componentes sistema de control desarrollado en el IER.

El total de ahorro del sistema propuesto en este proyecto presentó un total del 77.04% de ahorro en los recursos del sistema de control para el helióstato central, mencionando solamente los componentes principales del sistema propuesto y el sistema existente.

3.2 Ecuaciones del algoritmo de posición solar

El algoritmo mencionado en el apartado 2.2.1, para la obtención del vector solar se desarrolló en la plataforma Arduino basada en processing, el procedimiento se hace mediante el microprocesador usando los datos y constantes antes mencionados.

El Microcontrolador procesa la información mediante la obtención de la hora local enviada a través del bus I2C conectada al módulo de tiempo real (RTC DS1307). Esta secuencia de datos controla los motores, los cuales se coordinan mediante la obtención de la posición real del helióstato mediante los encoders, para accionarlos mediante señales PWM y lograr los ángulos objetivos establecidos por el vector solar.

El funcionamiento antes mencionado es autónomo y corresponde al procedimiento del sistema de control para el helióstato de torre central, en la figura 3.9 se presenta el diagrama de flujo de este programa.

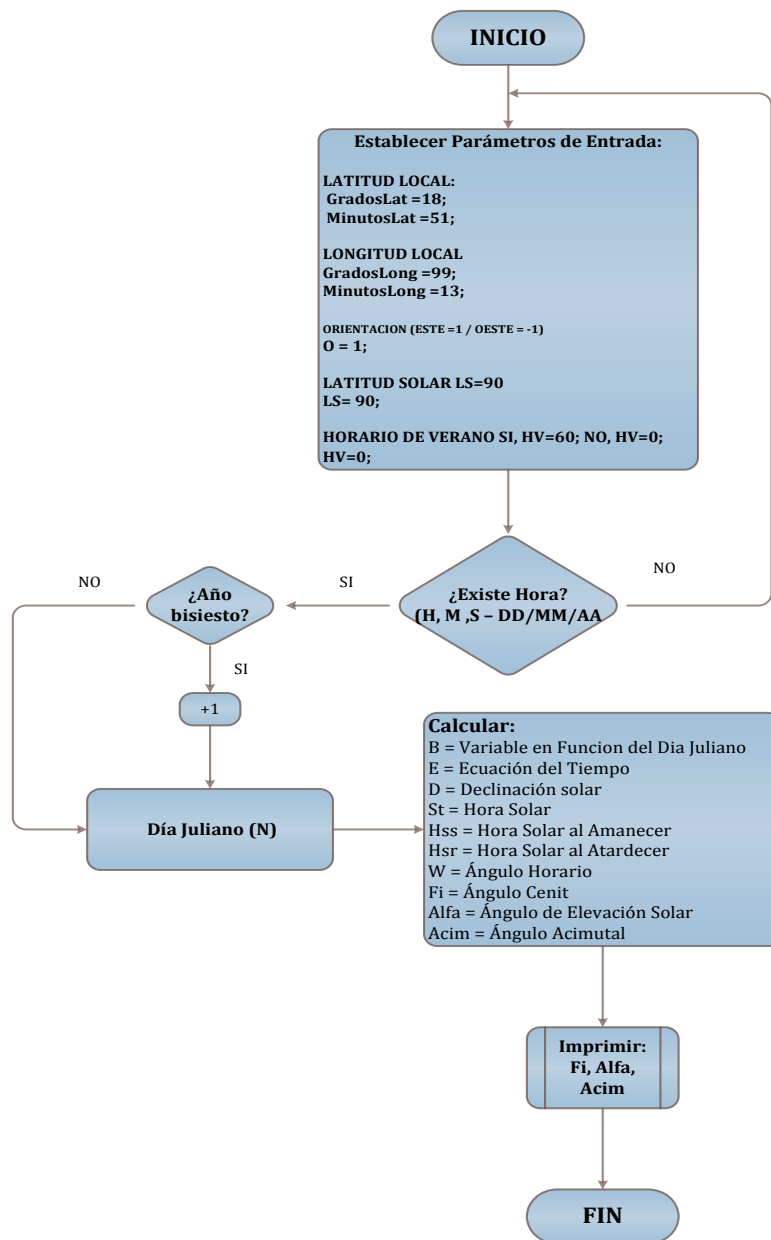


Figura 3. 9 Diagrama a bloques de la secuencia del algoritmo de posición solar para la obtención del vector solar.

Con el algoritmo del calculo del vector solar se presenta un diagrama a bloques de la secuencia de programación que se llevo a acabo para desarrollar el algoritmo de posición del helióstato en la que se obtienen los ángulos principales para referenciar la posición del Sol en todo momento del día.

Iniciando con establecer las constantes de entrada del algoritmo tales como: la posición geográfica de la posición del helióstato dada en Latitud Local y Longitud Local

(GradosLat, MinutosLat, GradosLong, MinutosLong, respectivamente). Después de proceder a corroborar la existencia del tiempo y la fecha local para poder obtener las variables H, M, S y N en el que N es el día juliano del año, además se coloca el horario de verano y la orientación y apartir de la configuración de los parámetros mencionados se calculan los ángulos solares (acimut y elevación) con las fórmulas descritas en el apartado 2.2.1

3.3 Diseño y programación de la interfaz de control y monitoreo de datos

La programación y diseño de la interfaz de monitoreo se realizó por medio del software LabVIEW, por medio del protocolo TCP/IP, se logro establecer comunicación, transferencia y adquisición de los datos obtenidos mediante el arduino MEGA 2560 R3, de este modo se crea la compatibilidad entre el software y hardware de distintas plataformas.

En el siguiente apartado se presenta toda la metodología de programación que se implementó para realizar el diseño de la interfaz de control, incluyendo los diagramas a bloques desarrollados en LabVIEW y dando una breve explicación del funcionamiento de cada uno.

3.3.1 Diseño de la interfaz de monitoreo

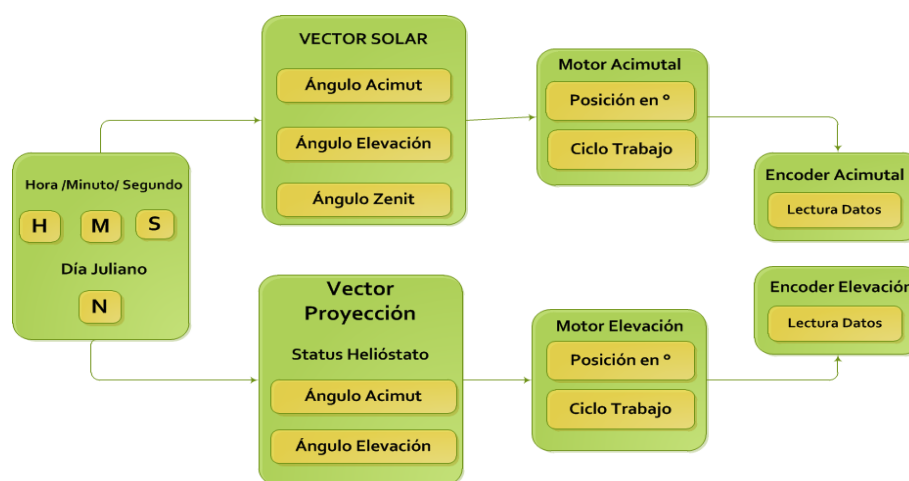


Figura 3. 10 Diagrama a bloques de las variables a desplegar en el diseño de la interfaz de monitoreo.

El diagrama bloques presentado en la Figura 3.10 corresponde a las variables que se pretende monitorear en la interfaz desarrollada en LabVIEW.

Como se mencionó con anterioridad, la comunicación que permite adquirir las variables, se hace mediante cable Ethernet, la programación para crear una interfaz de comunicación entre dispositivo y PC se hace mediante protocolo TCP/IP, dando como resultado el siguiente diagrama de bloques en LabVIEW.

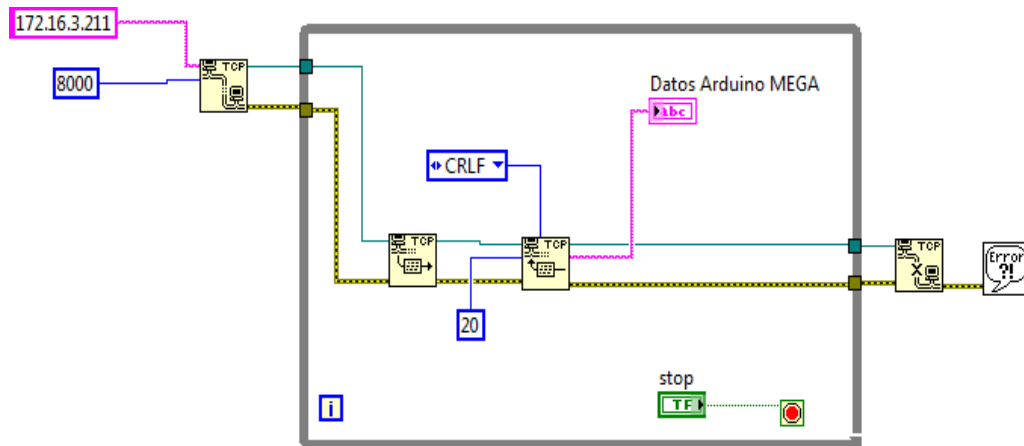


Figura 3. 11 Programa de comunicación mediante protocolo TCP/IP desarrollado en LabVIEW.

El protocolo TCP/IP permite establecer comunicación entre dispositivos y PC mediante la asignación de una dirección IP, la cual se fija en el sub-segmento de red 172.16.3.xxx, y para este controlador se asignó la dirección 211, ya sea que la PC o el dispositivo externo funcionen como cliente o servidor. Para este caso el Arduino MEGA 2560 funciona como un cliente y la PC como servidor.

Mediante el diagrama de bloques presentado en la Figura 3.11 se establece una petición entre cliente y servidor, la cual se está ejecutando en un ciclo continuo que permite realizar la adquisición de los datos que se envían a través del puerto Ethernet y que se necesitan estar monitoreando en tiempo real desde el Arduino MEGA.

Como siguiente paso, se desarrolló un programa para analizar la cadena de caracteres que se adquiere desde el Arduino, con fines de separar cada una de las variables que se ejecutan y se envían desde el dispositivo, como se observa en la figura 3.12.

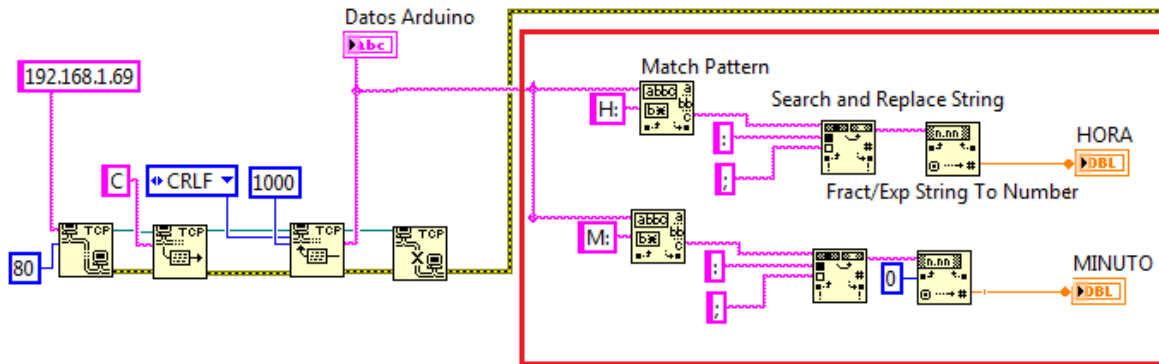


Figura 3. 12 Diagrama a bloques del programa de análisis de la cadena de caracteres enviada desde el Arduino.

El recuadro en rojo muestra los bloques utilizados para realizar el análisis de la cadena de caracteres que se envía a través del Arduino en el cual se pretende dividir dicha cadena en variables independientes que permita manipular fácilmente cada una de ellas.

El bloque *Match Pattern* incluye la cadena especificada desde un carácter especial (H:), para dividir esta cadena de caracteres se introducen los límites que permitirán obtener los datos que se encuentren antes y después de los caracteres especificados en el bloque *Search and Replace String*, por consecuencia los datos restantes son desechados y en la salida del bloque *Fract /Exp String To Number* el carácter obtenido se convierte en un dato de valor numérico.

El mismo diagrama se aplica para las mismas variables que se encuentran en la cadena de caracteres, obteniendo una serie de bloques repetitivos que ayudarán a visualizar los datos de manera ordenada en la interfaz de monitoreo.

El programa final se muestra en la figura 3.13 en el cuál se puede visualizar cada uno de los bloques mencionados con anterioridad y que comprenden el desarrollo de la interfaz de monitoreo de los datos.

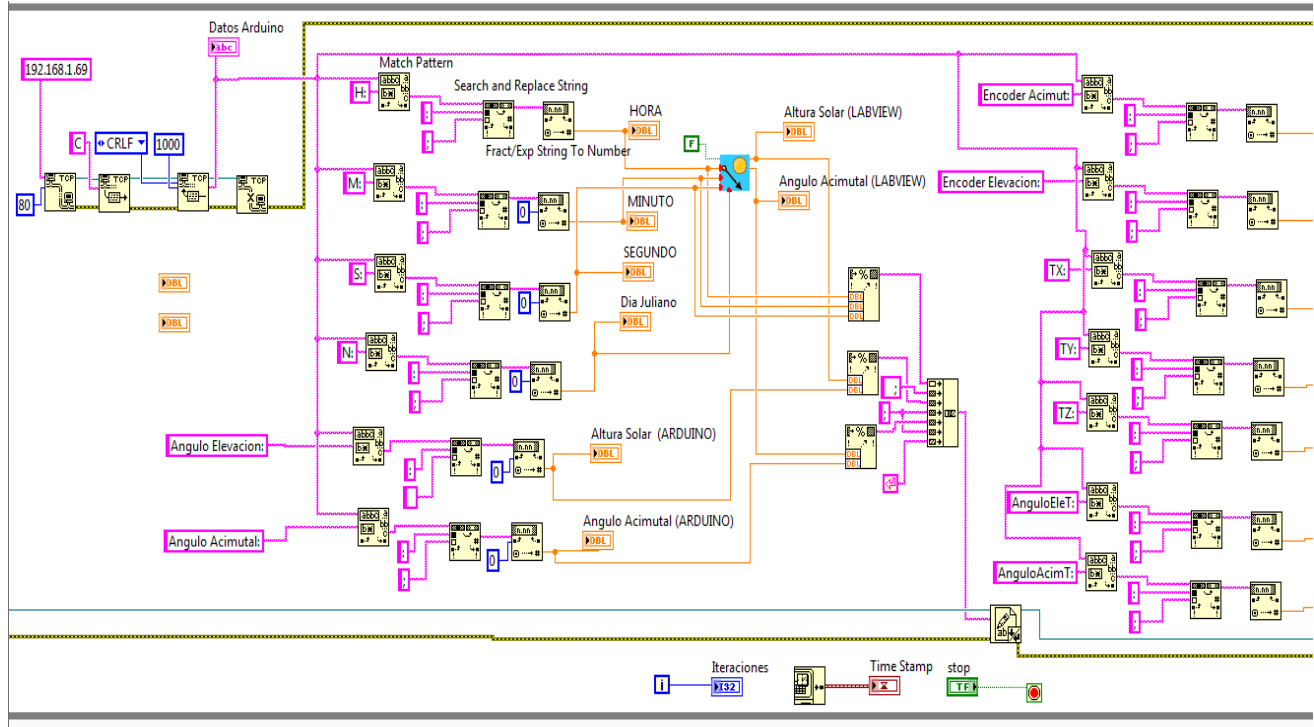


Figura 3.13. Diagrama a bloques de la programación final de la interfaz de monitoreo de las variables en LabVIEW.

3.4 Diseño del Sistema de Control

De acuerdo a los componentes categorizados con anterioridad se diseñó el sistema que incluye cada uno de los componentes elegidos y el cual actuará en conjunto para lograr el objetivo principal del sistema, controlar el movimiento del heliostato en los dos distintos movimientos que comprende en acimut y elevación, así como obtener por medio de los encoders la retroalimentación de la posición angular del heliostato en tiempo real.

El diagrama 3.14 presenta cada uno de los dispositivos que comprende el sistema de control, los cuales fueron analizados y cotizados con anterioridad, la interfaz de control

y monitoreo se desarrolla en LabVIEW, la comunicación que se establece entre el puesto de control y el sistema es por medio de un cable Ethernet que se conecta directamente al Microcontrolador por medio del Ethernet Shield,

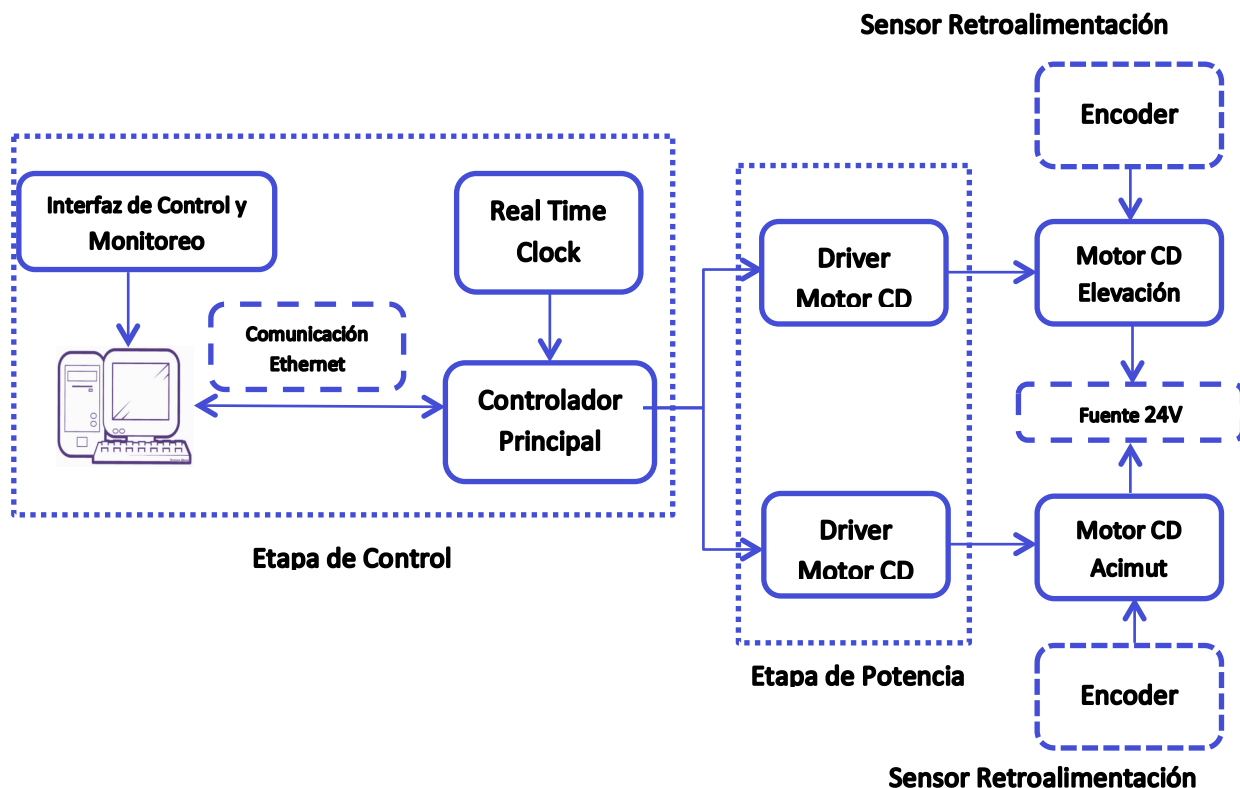


Figura 3. 14 Diagrama a bloques del conjunto de componentes que comprenden el sistema de control del helióstato.

Conectado al controlador principal, se encuentra el Real Time Clock, el cual fue seleccionado para proporcionar la hora y fecha en tiempo real al controlador, ya que se busca establecer la autonomía del sistema sin que las variables que se utilizan para obtener los ángulos del vector solar, dependan directamente desde la PC.

Como siguiente etapa se encuentran los drivers de los motores en elevación y acimut, los cuales reciben señales PWM (Pulse Width Modulation) que controlan la velocidad y sentido del motor dependiendo de los requerimientos establecidos en la programación.

Como etapa final se encuentran los motores de corriente directa que funcionan a 24V y acoplados a ellos están los encoders, que retroalimentan la posición angular del helióstato en tiempo real.

Como circuitos adicionales al sistema de control se diseñaron PCB's, la primera como extensiones de las conexiones del Arduino hacia los demás componentes, y la segunda contiene la circuitería necesaria para intercambiar el sistema entre los modos, manual y automático, dicha placa permite manipular los motores en acimut y elevación directamente desde switches que se conectan a relevadores que intercambian el modo en que se desea operar el sistema.

El diseño de ambas circuiterías de presentan a continuación:

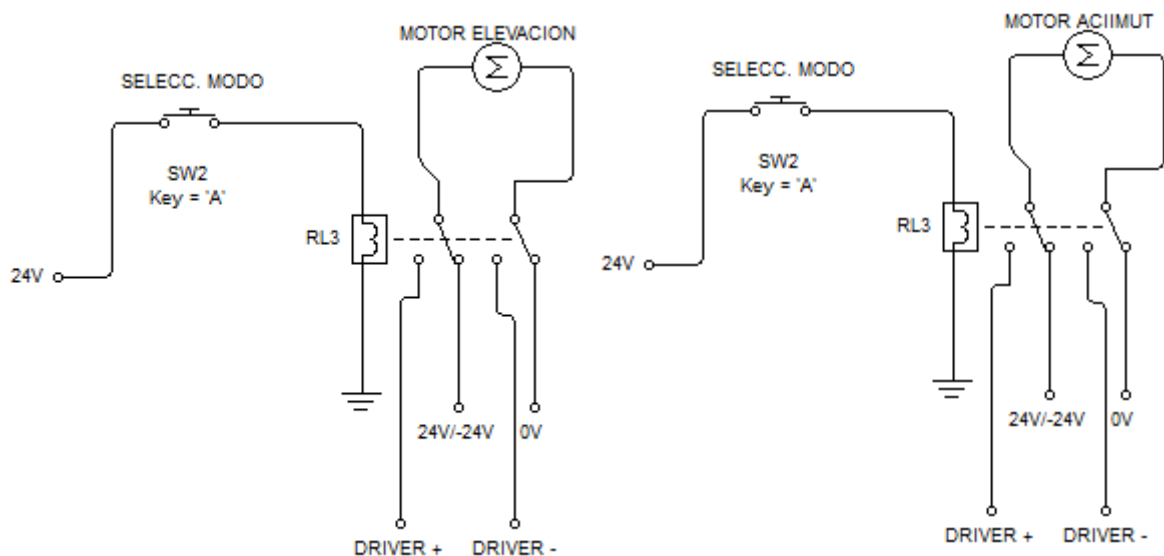


Figura 3. 15 Circuito adicional diseñado para seleccionar la salida a los motores en los dos modos de operación del sistema de control Manual /Automático.

La figura 3.15 muestra la circuitería diseñada para controlar las salidas que accionarán los motores, ya sea en modo manual, para el cual se implementaron una serie de botoneras que alternan el sentido del motor en una sola velocidad, dicho modo podrá ser utilizado para pruebas directamente en campo sin tener que manipular el helióstato desde el puesto de control.

El otro modo es el automático en el cual se seleccionan las salidas de los drivers los cuales controlan la velocidad y el sentido de giro del motor dependiendo de la programación que se les dé a estos.

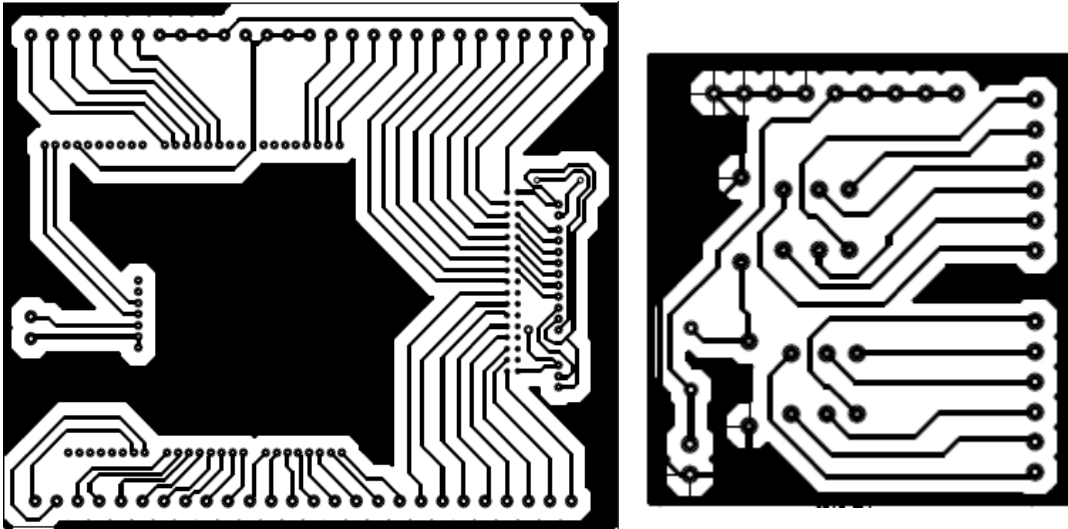


Figura 3. 16 Diseño de PCB's de los circuitos adicionales al sistema de control del Helióstató.

En la figura 3.16, se muestran los circuitos impresos que se implementaron para la circuitería del sistema de control. La primera (izquierda) son las extensiones de las conexiones de las salidas del Microcontrolador, hacia los componentes restantes del sistema, y el segundo (derecha) es el circuito impreso resultante de la simulación de los circuitos presentados en la figura 3.15.

Capítulo 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas de funcionamiento y evidencias de la implementación del sistema de control, así como las pruebas de software que se llevaron a cabo para la validación del funcionamiento del prototipo.

4.1 Algoritmo de Posición Solar: Comparativa del Vector Solar

De acuerdo con el diseño de la interfaz y la programación llevada a cabo para la obtención de los ángulos del vector solar, se llevó cabo una comparativa de los datos obtenidos desde la PC y los calculados desde el Arduino, dando resultado la obtención de la variación de los ángulo en un día solar entero, comprendido desde las 6 de la mañana a las 6 de la tarde del día 21 de Marzo del 2014.

A continuación se presentan dos gráficas comparativas de los ángulos obtenidos en acimut y elevación.

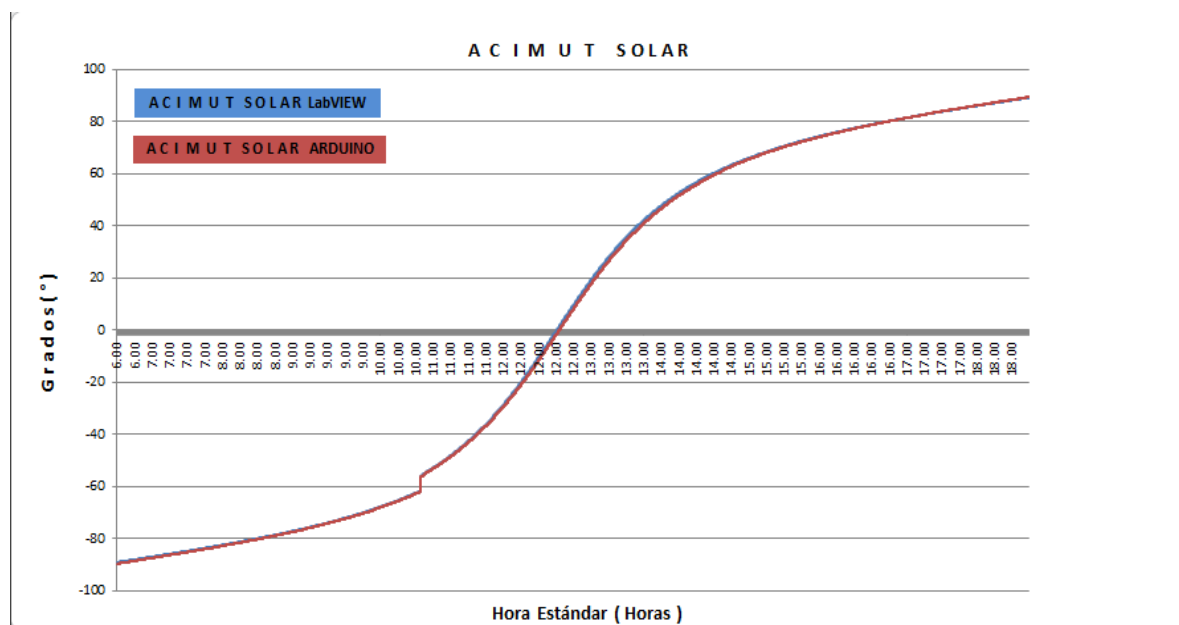


Figura 4.1 Gráfica comparativa del ángulo acimutal obtenido desde el Arduino MEGA y el cálculo realizado desde LabVIEW con la hora estándar.

En la figura 4.1 se muestra una comparativa del ángulo acimutal calculado desde el Arduino MEGA y LabVIEW, con el algoritmo de Duffie & Beckman en la que se puede

observar cierta similitud de la variación del ángulo a lo largo del día solar, cabe mencionar que en el cálculo del Arduino se presentan escalones relativamente pequeños debido a la resolución del Microcontrolador el cual tiene una periodicidad de cálculos de 60 segundos, el cálculo se realiza cada segundo y las variaciones que presentan los ángulos respecto a los calculados en LabVIEW desde la PC son más visibles.

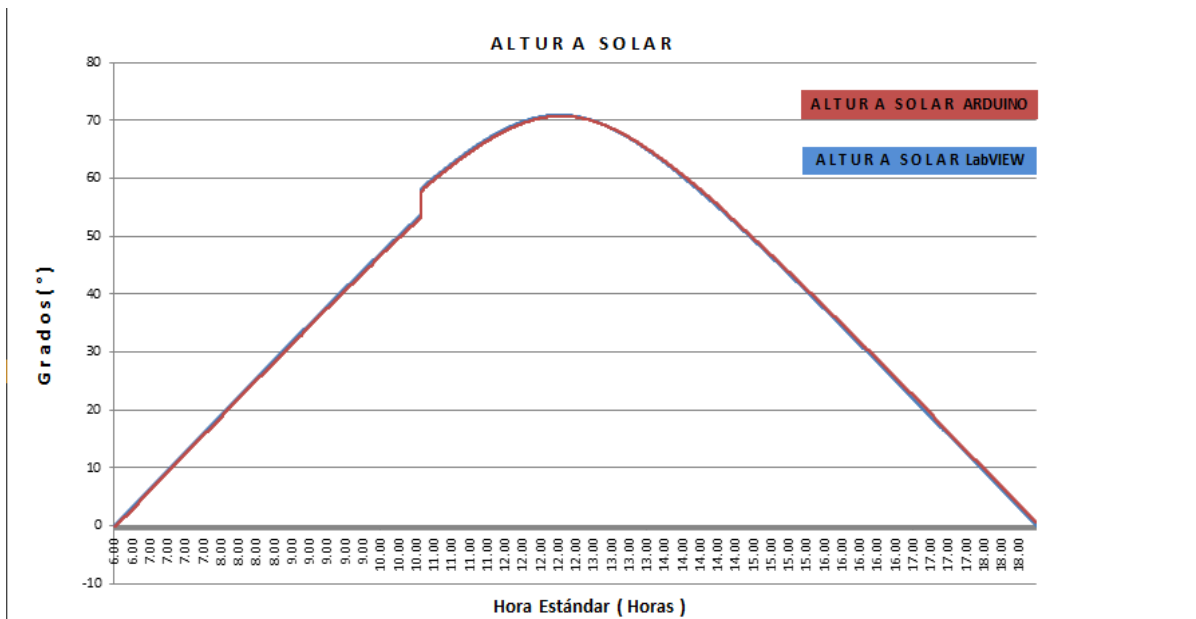


Figura 4. 2Gráfica comparativa de la altura solar obtenida desde el Arduino MEGA y el cálculo realizado desde LabVIEW con la hora estándar.

En la figura 4.2 se muestra la comparativa del ángulo de altura solar en el que se muestran los ángulos obtenidos desde el Arduino MEGA (en rojo) y la altura solar obtenida desde el programa LabVIEW, debido a los factores mencionados en la Figura 4.0 se obtienen los mismos escalones en la respuesta del Arduino, a lo largo del día solar se hace la comparativa de los ángulos y se observa un comportamiento similar entre los ángulos calculados en las dos diferentes plataformas.

4.2 Comunicación Ethernet entre Arduino y PC

Para establecer la comunicación entre la PC y el controlador principal se utilizó el protocolo TCP/IP, debido al problema de compatibilidad que presentan las plataformas de LabVIEW y Arduino para establecer comunicación directa, se optó por utilizar este tipo de protocolo que fue diseñado para enlazar ordenadores que ejecuten diferentes sistemas operativos y que mediante una dirección IP permite transferir datos en Internet y redes de área local.

Mediante el Arduino Ethernet Shield se conecta un cable RJ45 al servidor local, en el programa se asignan una dirección IP, por medio de la cual el Arduino MEGA 2560 funciona como un cliente que gestiona la transmisión de los datos en todo momento. Al asignar la Dirección IP (172.16.3.211) se elaboró un diagnóstico de comunicación mediante el Comand Windows de la PC, haciendo ping a dicha dirección IP, en la que se comprobó el estado conectado al host local, y que se visualiza el envío de paquetes mediante solicitud y respuesta al controlador principal.

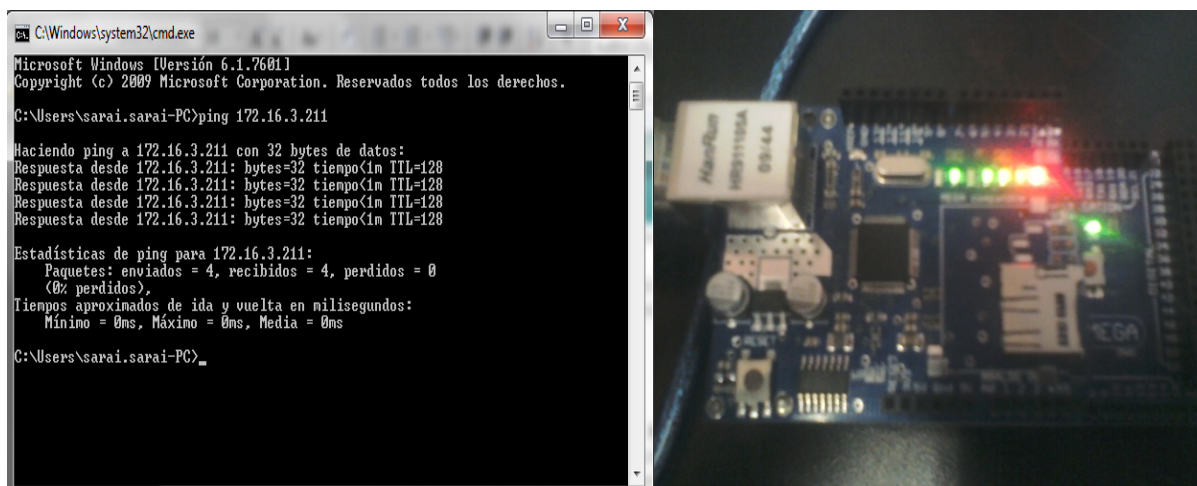


Figura 4.3 Diagnóstico de Comunicación entre PC y Arduino MEGA 2560 mediante una dirección IP asignada.

La comprobación de la comunicación establecida mediante Ethernet desde el controlador principal y PC se hace desde el diagrama a bloques desarrollado en la plataforma LabVIEW, en la que es posible ejecutar el programa para visualizar el flujo

de los datos y de las conexiones existentes, esto se puede observar en la figura 4.3, en la que el flujo de la conexión muestra mensajes que permiten establecer un sentido de la transmisión de datos.

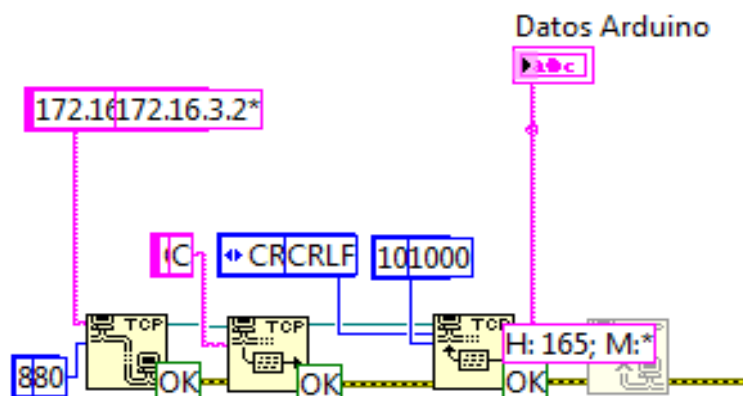


Figura 4. 4 Diagrama de bloques del programa principal de conexión TCP/IP.

4.3 Programación

En el siguiente apartado se presentan las pruebas contundentes de la programación que se llevó a cabo para la adquisición de datos y el procesamiento del algoritmo de obtención del vector solar, así como de la hora y fecha del módulo del Arduino.

4.3.1 Obtención de la Fecha y Hora

```
DateTime now = RTC.now(); // Obtiene la fecha y hora del RTC
int N=0;
int H=(now.hour());
Serial.print("HORA: ");
Serial.println(H);
int M=(now.minute());
Serial.print("MINUTO: ");
Serial.println(M);
int S=(now.second());
Serial.print("SEGUNDO: ");
Serial.println(S);

int MES=(now.month());
```

Figura 4. 5 Programa desarrollado en Processing para obtener la hora y fecha en Arduino.

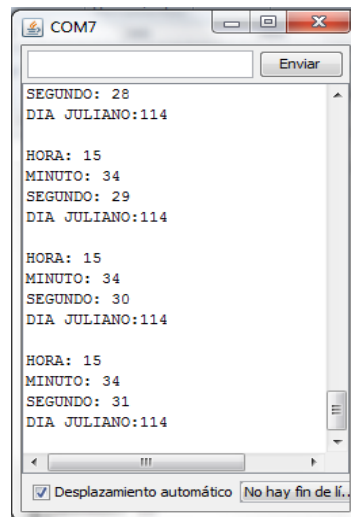


Figura 4. 6 Visualización de la hora y día juliano en el monitor serial.

En la impresión del monitor serial presentado en la Figura 4.6 se pueden observar las variables de la hora y el día juliano las cuales se obtienen a partir de la librerías de Arduino RTCLib, y que a partir de la obtención de la fecha actual se despliega el día juliano dependiente esta variable, y que corresponde en un rango de 365 días del año y 366 para año bisiesto.

4.3.2 Ángulos del Vector Solar

A partir de la obtención de las variables descritas anteriormente, se procedió a calcular los ángulos del vector solar, con el algoritmo de Duffie & Beckman, las ecuaciones se introdujeron en el controlador principal, (ver Anexo 2), cabe mencionar que el desarrollo del programa para calcular el vector solar, se hizo de acuerdo a las ecuaciones descritas en el capítulo 3, y que la lógica de programación se hizo de acuerdo al diagrama de flujo descrito en el apartado 3.2 de este documento.

El cálculo para el vector solar se hace de manera repetitiva en un intervalo de tiempo correspondiente a cada segundo, el cual no presento problemas respecto a la velocidad de procesamiento del Arduino, ya que no se manejaron tiempos relativamente pequeños o del orden de los milisegundo que pudieran afectar al procesamiento de este y por consecuencia a obtener ángulos del vector solar erróneos.

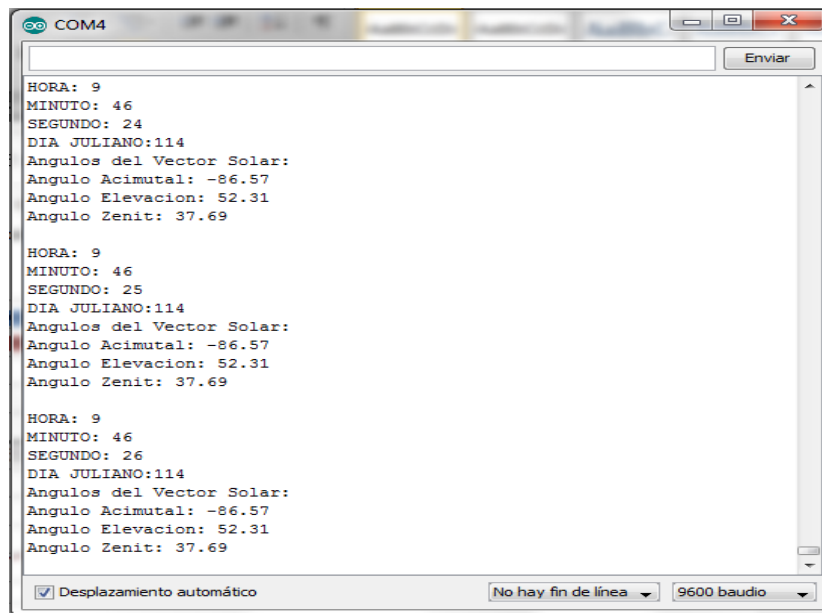


Figura 4. 7. Monitor Serial muestra los ángulos del vector solar obtenidos desde el Arduino.

4.3.3 Lectura de Encoders: Posición Angular

La retroalimentación de la posición de los ángulos del helióstato en todo momento de operación se realizó mediante Encoders de tipo incrementales acoplados a la transmisión del helióstato.

Como dato importante cabe mencionar que el Encoder entregaba 4000 cuentas por vuelta de este, al hacer un test de prueba para verificar las lecturas de este, se llegaron a obtener 10021984 cuentas correspondientes a 2505.496 vueltas de la transmisión del helióstato. y de las cuáles por medio de un acelerómetro se obtuvieron 0° en la posición inicial (0 cuentas) hasta 90°(10021984) en la posición final del helióstato en la altura solar.

Como se utilizó el mismo tipo de encoders, y acoplamiento a la transmisión tanto para acimut y elevación, se obtuvieron los mismos parámetros de lectura de las cuentas para los ángulos en acimut., con diferencia de que en la posición inicial 0° (0 cuentas) en sentido de las manecillas del reloj se obtienen 90° positivos (10021984 cuentas) y en sentido contrario de las manecillas del reloj -90°(-10021984 cuentas) esto

debido a que se tienen ángulos distintos en acimut dependiendo de la dirección que tome el heliostato respecto al verdadero Sur.

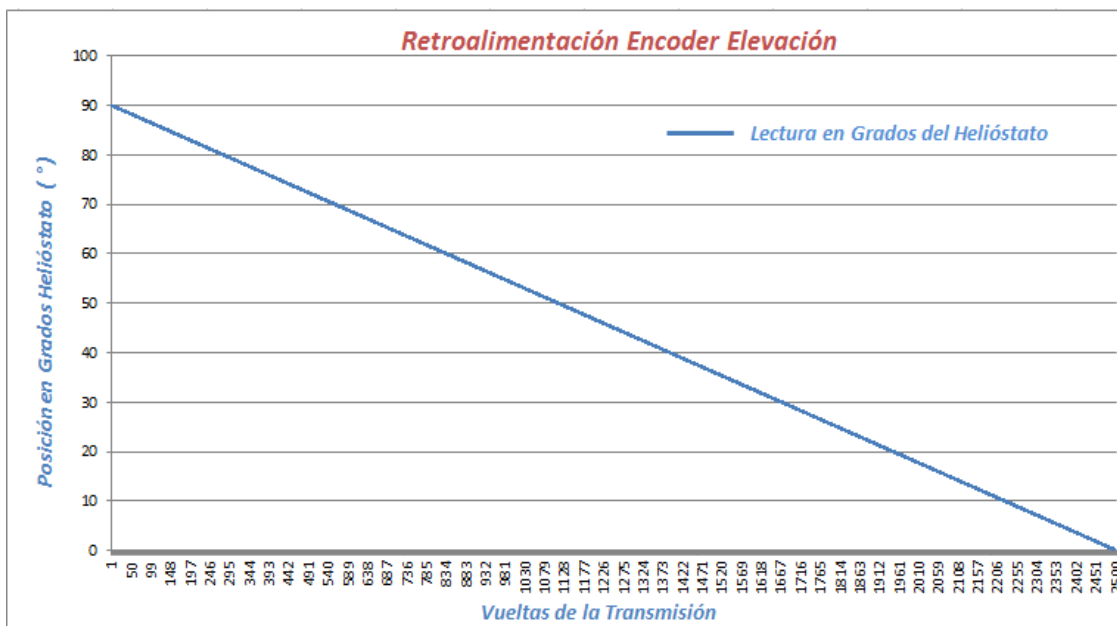


Figura 4. 8 Gráfica de la retroalimentación angular del Encoder de Elevación.

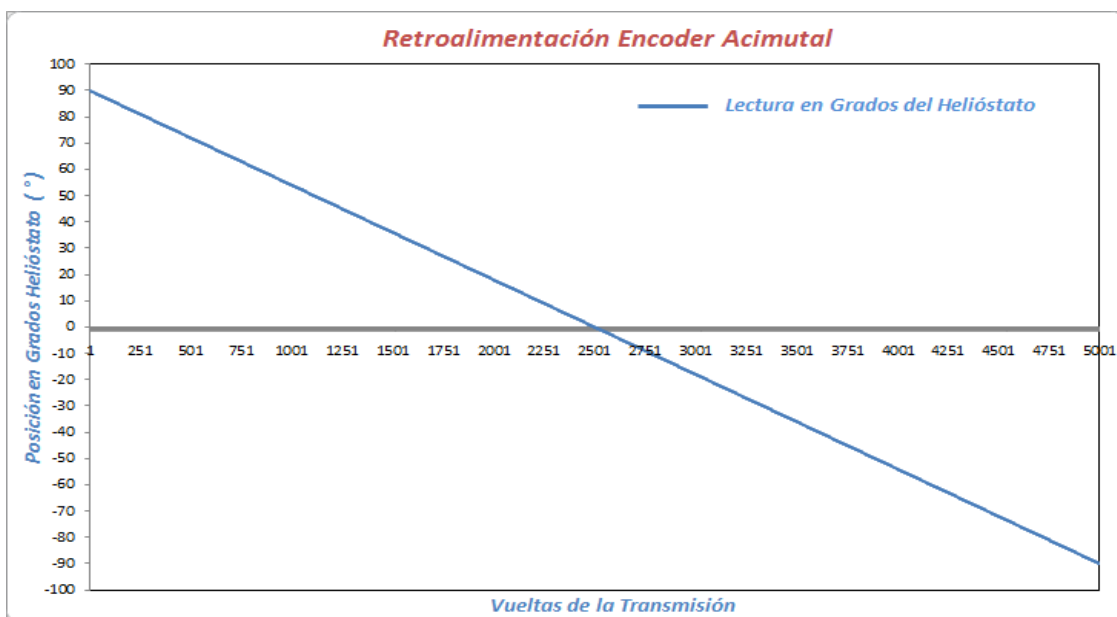


Figura 4. 9 Gráfica de la retroalimentación angular del Encoder en Acimut.

4.4 Interfaz de monitoreo de variables en LabVIEW.

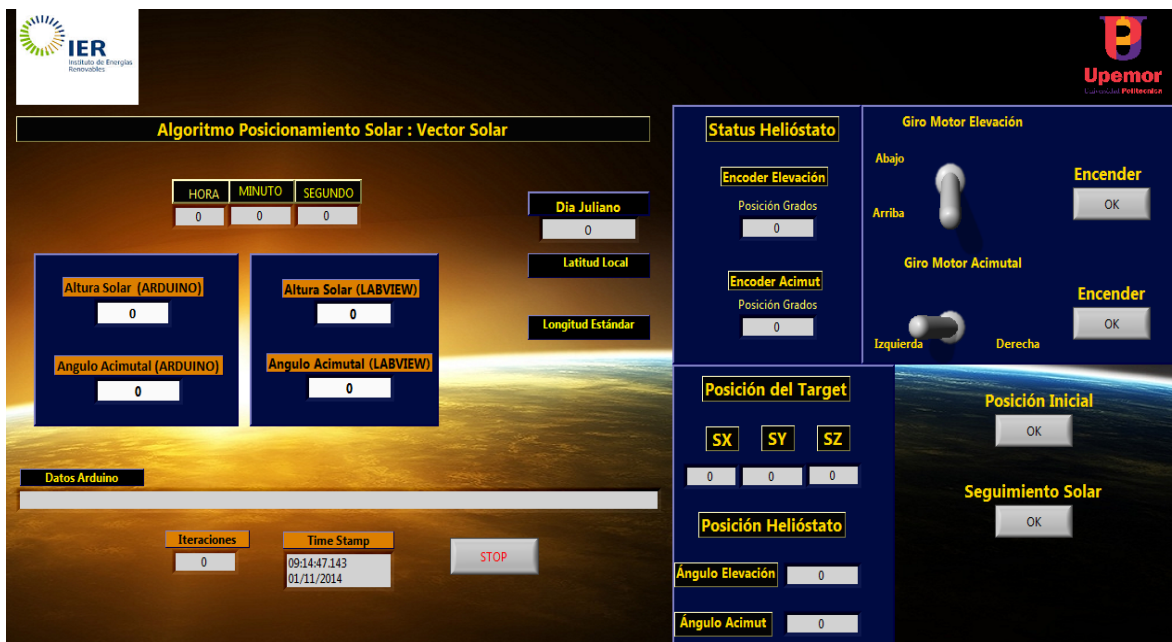


Figura 4. 10 Interfaz de monitoreo y control del Helióstatto desarrollada en el software LabVIEW.

En el desarrollo de la interfaz, se establecieron bloques repetitivos para analizar la cadena de caracteres enviada a través del Arduino, al dividir las variables de forma independiente, se logró manipular cada una de ellas para diferentes propósitos y fines de visualización, separando cada una de ellas en la interfaz. El diagrama a bloques del programa .vi desarrollado en LabVIEW puede observarse en el Anexo 1.

La visualización de las variables más importantes pueden observarse en la Figura 4.9 en la que se presentan los ángulos obtenidos en el cálculo del vector solar desde LabVIEW y Arduino, así como la fecha y hora estándar obtenida desde el módulo Real Time Clock conectado al Arduino, variables como la cadena de caracteres enviada desde el Arduino y la retroalimentación de los encoders que presentan la posición angular del Helióstatto en todo momento.

En cuánto a la posición del Target, son las coordenadas del vector X, Y, Z en las que se encuentra posicionado el blanco para la proyección de la radiación, así como los ángulos en acimut y elevación en los que debe de posicionarse el heliostato para establecer dicho apuntamiento.

4.5 Implementación del Sistema de Control del Helióstatto

De acuerdo con lo establecido en el apartado de diseño se realizó la implementación de cada uno de los circuitos impresos así como la integración de los componentes elegidos para el desarrollo del sistema de control del helióstato de torre central.

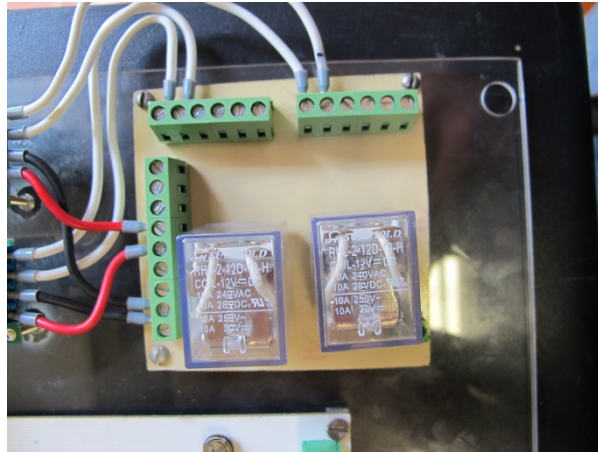


Figura 4. 11 Implementación de los circuitos con relevadores RHL-2-12D-10H.

En la figura 4.11 se presenta la implementación del circuito de conmutación con relevadores de 24V, esto para realizar la selección del modo de operación manual y automático del sistema de control. El circuito intercambia las salidas a los motores, ya sea que las señales de control provengan de los drivers de motores de CD o directamente de la botonera que se ubica en el panel principal del gabinete, esto para realizar el control manual para pruebas de campo del helióstato.

La integración de los drivers para los motores de CD VNH5019A y sus conexiones correspondientes al controlador principal y a los motores de CD. La entradas de los drivers son 3 señales digitales que se envían a través del Arduino MEGA, una señal para controlar la velocidad del motor mediante señales PWM (Pulse Width Modulation) y otras dos señales para establecer el giro del motor en sentido de las manecillas del reloj y en contra de las manecillas del reloj con estados 0 Y 1 respectivamente.

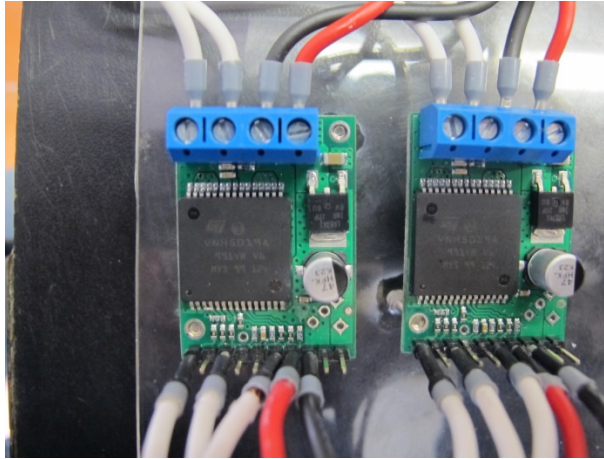


Figura 4. 12. Conexión de los Drivers para los motores de CD VNH5019A.

Las salidas de los drivers están conectadas a los relevadores y estas pasan directamente a controlar los motores dependiendo del estado de operación del helióstato, la alimentación de los drivers en su etapa de potencia es de 24V y soportan una corriente de consumo de 12A.

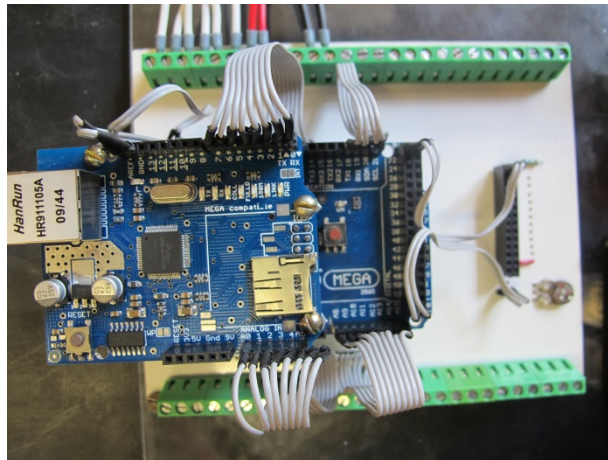


Figura 4. 13 Implementación del PCB para conexiones del Arduino Mega 2560 e integración del Ethernet Shield.

La integración de los dispositivos mencionados anteriormente se presenta a continuación en la que se observa la etapa de control y la etapa de potencia dividida, esto debido a que en la etapa de potencia de pueden presentar corrientes por encima de los 2A que pueden afectar el funcionamiento de la etapa de control, las protecciones para los drivers se encuentran inmersas en los módulos, ya que al haber un voltaje mayor a 24V en el circuito VNH5019A este abre el circuito para detener daños por voltajes en los motores y en el driver,

La etapa de control se alimenta con 8V en la entrada del plug del Arduino y los voltajes de 5V que sobresalen de los pines del Arduino son introducidos a la etapa de control del driver, y a la alimentación del módulo de reloj en tiempo real.

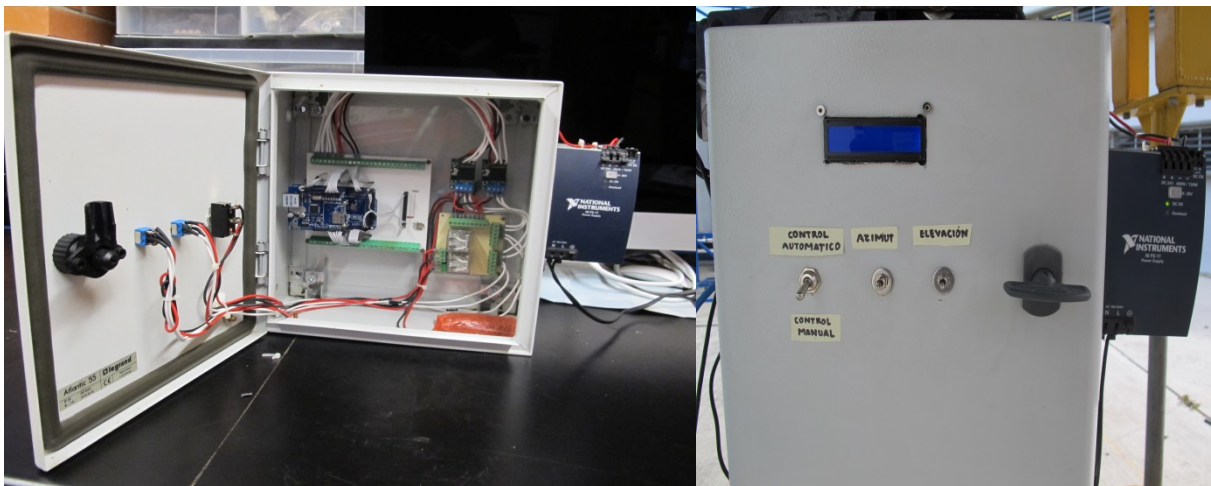


Figura 4. 14 Integración del sistema de control del Helióstato de Torre Central.

En la figura 4.14 se observa la integración de los componentes del sistema de control, a la izquierda se observa la botonera implementada en el panel frontal del gabinete, para fines del control manual y pruebas de campo, conectada externamente se encuentra la fuente de alimentación de 24V utilizada para alimentar la etapa de potencia.

4.6 Instalación del Sistema de Control en el mini Helióstato de 5.6 m²

4.6.1 Acoplamiento de Motores de CD y Encoders

Una vez implementado el sistema y validadas las etapas de funcionamiento del sistema de control se procedió a instalar el gabinete sobre el mini helióstato de 5.6 m² así como la instalación de los motores sobre la transmisión y el acoplamiento de los encoders que nos darán la posición angular del helióstato.



Figura 4. 15 Acoplamiento de motores de CD y Encoders.

En la figura 4.15 se presentan los dos acoplamientos tanto en acimut y elevación del helióstato de los motores Bodine a la transmisión del helióstato por medio de bandas que se acoplan mediante una flecha con engrane incluida en el motor y la transmisión, seguido de la instalación de los encoders a la flecha de la misma transmisión, esto debido a que las velocidades de los motores presentaban un problema en la lectura de los encoders, los datos de las cuentas se perdían y a consecuencia de esto la posición angular no era la esperada, se presentan los dos acoplamientos tanto en acimut y elevación del helióstato.

4.6.2 Montaje de Gabinete del Sistema de Control



Figura 4. 16 Primera Etapa de montaje del sistema de control del Helióstato.

En la primera etapa de instalación del control para el helióstato se tomaron las medidas para montar el prototipo sobre la estructura, tomando en cuenta las dimensiones de los contrapesos del helióstato, ya que se requiere cierta libertad de movimiento para no causar daños al sistema de control que afecten al funcionamiento del mismo.

Se llevó a cabo el cableado de los encoders y de los motores a sus conexiones correspondientes al sistema de control, así como la conexión de la fuente de poder y la alimentación de 127V, el tendido de cable Ethernet para establecer la comunicación y la alimentación al sistema de control.



Figura 4. 17 Instalación completa del sistema de control sobre el mini helióstato.

Como se aprecia en la figura 4.17 el sistema de control completamente montado sobre la estructura del mini helióstato, presentando la botonera de control manual para pruebas directas en campo, la pantalla LCD que sirve como indicador de la retroalimentación de la posición angular del helióstato en acimut y elevación, la fuente integrada al sistema y el cableado para establecer la comunicación.



Figura 4. 18Pruebas de funcionamiento del sistema de control.

Algunas pruebas de funcionamiento se realizaron sobre el sistema de control, tales como el test de comunicación y el envío de comandos directos con señales PWM a los drivers para movilizar el helióstato, así como la adquisición de las lecturas de los encoders partiendo de una posición inicial en Elevación (0°) y acimut (0°). Realizando una serie de pruebas que concretaron la validación del correcto funcionamiento del sistema instalado sobre el helióstato de 5.6 m^2 .

4.7 Puesta en operación

En el siguiente apartado se muestra la operación del helióstato en conjunto con el sistema de control y la interfaz de control.

Durante este proceso, se efectuaron pruebas de funcionamiento de la estructura en los dos ejes, acimut y elevación, enviando señales para encender los motores en ambos sentidos, izquierda, derecha, abajo y arriba respectivamente, sea en modo manual directamente desde el gabinete montado sobre la estructura y desde la interfaz ejecutándose constantemente en la PC para hacer validación y chequeo visual del sistema en condiciones normales de operación.

Por otro lado, se realizaron pruebas preliminares del apuntamiento de la mancha solar sobre el atenuador del Mini Horno Solar cubriéndose el área del helióstato y dejando solo un 1 m^2 descubierto para proyectar dicha mancha.



Figura 4. 19Pruebas preliminares del apuntamiento de la mancha solar del Helióstato.

En la Figura 4.18 se muestra el apuntamiento de la mancha solar del Helióstato en la estructura del atenuador a una distancia de 6m. Durante este proceso el control enviaba señales para accionar los motores de los dos ejes, y en los que se observó estabilidad tanto en el posicionamiento y en la operatividad del sistema de control,

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

5.1. Conclusiones

La construcción del sistema de control se completó satisfactoriamente, la instalación y validación del funcionamiento del helióstato se concretó basándose en los diseños propuestos sobre este documento.

En el análisis de las ecuaciones del vector solar, se obtuvieron los resultados esperados, por cuestiones de tiempo se decidió trabajar con el algoritmo de Duffie & Beckman, ya que las variables y constantes a utilizar fueron las mínimas que se requerían para desarrollar el proyecto del sistema de control y que para cuestiones de pruebas resultó ser el algoritmo más sencillo de implementar, En el cálculo del vector solar que se hace desde el controlador principal propuesto en este proyecto se realizó una comparativa con el vector solar calculado desde la PC en LabVIEW, dicha comparativa dio resultados satisfactorios ya que la deriva entre los ángulos acimut y elevación fue mínima entre el controlador principal y LabVIEW, cabe mencionar que los ángulos obtenidos desde el Arduino presentan ciertos escalones respecto al tiempo debido a que los cambios de las variables en el Arduino se realizaban con un tiempo limitado a cada segundo.

La programación de la interfaz se realizó mediante programas en LabVIEW, que permiten al usuario visualizar los datos de manera fácil, y que con fines de integrarlo a un sistema SCADA no presenta mayor problema de compatibilidad.

La comunicación entre la PC y el controlador principal se llevó a cabo de manera exitosa, esto debido a la asignación de una dirección IP al controlador, y por medio de cable Ethernet se realizó la conexión punto a punto, una red de área local sirve como medio de transmisión de datos (Internet) en la que el Arduino funciona como el cliente, y la PC como servidor, y que constantemente realiza peticiones al controlador principal para obtener los datos deseados y poder visualizarlos en la interfaz de control.

El protocolo TCP/IP utilizado para establecer comunicación permitió establecer la comunicación entre los dos dispositivos en todo momento, y que a partir de este el envío y recepción de datos se realizar por medio texto, una cadena de caracteres enviada a través de internet en la que se puede acceder desde cualquier punto conectado a la red de área local, con una excepción en la pérdida de datos e interrupción de la transmisión cuando existe un problema de conexión, por cuestiones de colisión de la red o algún tipo de desconexión física en las terminales de los dispositivos.

En el desarrollo de los programas en Processing para la adquisición de los datos de las diferentes variables a utilizar se llevaron a cabo una serie de pruebas iniciales e independientes en cada uno de los componentes para realizar bloques de programas distintos, y que con ayuda de estos se integraron para obtener el programa principal que se carga al Arduino Mega 2560 mediante un cable USB serial.

El programa principal cargado en el Arduino contiene librerías de Arduino que ayudaron a establecer la comunicación entre cliente y servidor, para obtener las variables de fecha y hora actual desde el módulo RTC mediante bus I2C con los pines SCA Y SCL del Arduino Mega, la lectura de los encoders por medio de interrupciones y las ecuaciones correspondientes al cálculo del vector solar con el algoritmo de Duffie & Beckman.

Los encoders utilizados en este proyecto son del tipo incremental. La razón principal para utilizar este tipo de encoders fue el factor económico y el problema que presenta con este tipo de sensores es el riesgo de la pérdida de información y de la posición del helióstato en funcionamiento, si la alimentación en éstos se interrumpe la información o las cuentas que este llevaba se pierden y la lectura del Encoder se resetea a 0.

Otro problema principal externo al sistema de control es el acoplamiento de los sensores (Encoders) a la transmisión del Helióstato, este tipo de configuraciones presenta un inconveniente debido al juego en las vueltas del cabezal que se ocasionan por el Backlash presente en cualquier mecanismo, y que afecta en cuestiones mínimas a la precisión de lectura de los ángulos del helióstato. otro mínimo que afecta

a la obtención de estos ángulos son las corrientes de aire que afectan al movimiento del helióstato y que puede presentar algunas variaciones en las cuentas de los encoders. Debido a la alta resolución que poseen estos sensores, se llegó a concluir que las afectaciones en las lecturas de la posición angular fueron mínimas.

5.2 Trabajos a Futuro

Por cuestiones de tiempo mencionadas constantemente en este documento la metodología de programación para establecer el helióstato en modo seguimiento y operarlo en un modo de funcionamiento (modo horno solar y modo torre central) quedaron ligada a este apartado de trabajos a futuro en los que se podrá observar el comportamiento del helióstato para cuestiones prácticas y de implementación para proyectos como el CPH.

Para mayor precisión del cálculo del vector solar se puede realizar y programar el algoritmo de Grena que presenta mayor complejidad en cuanto a las ecuaciones, constantes y variables que utiliza para realizar los cálculos y obtener los ángulos del vector solar, además de que presenta un error menor a los establecidos por otros autores, una tolerancia de 0.0027 grados respecto a los ángulos reales de la Tierra.

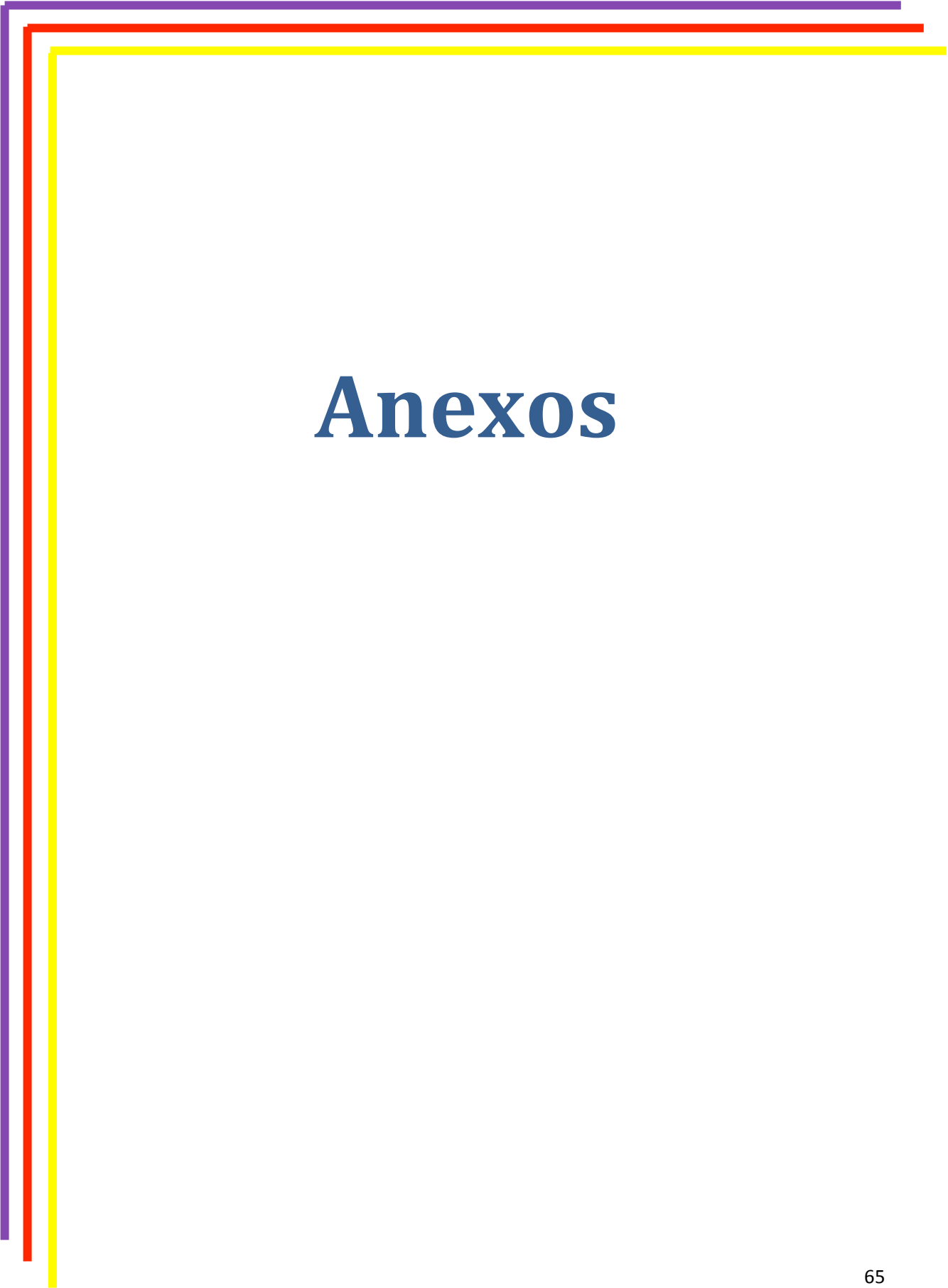
La lectura de la posición angular del helióstato se puede realizar a través de acelerómetros que presentan mayor ventaja respecto a los utilizados ya que estos pueden ser capaces de guardar la información de sus lecturas en todo momento, así se solucionaría el problema de pérdida de información de los sensores.

Para lograr la autonomía del sistema de control respecto al suministro de energía se puede diseñar un arreglo fotovoltaico que sea capaz de inyectar los 24V en corriente directa para la alimentación de la etapa de potencia, posteriormente aplicar un diseño electrónico para reducir el voltaje a los deseados para la etapa de control. De este modo se lograría un diseño más robusto del sistema de control, presentando un ahorro de energía considerable y amigable con el medio ambiente.

Bibliografía

- [1] Marroquín, D. (2011). *Sistema de control para un conjunto de helióstatos*, IER-UNAM, Temixco, Morelos MX.
- [2] Arancibia, C., Peña, M., Marroquín, D., Canabillas, R., Pérez, C., Riveros, D., Hinojosa, J., Estrada, C. (2011). *Heliostat testing at a new facility in Sonora, México, Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar: Memorias de Congresos, Sonora, México*. Recuperado desde: <http://lacyqs.cie.unam.mx/es/index.php/publicaciones/memorias-de-congresos>
- [3] Estrada Gasca C. A., Islas Samperio J. (Coordinadores), 2010. *Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México*. Academia Mexicana de Ciencias, México, Creativa Impresiones, México D.F. pp 137.
- [4] Méndez, Javier & Cuervo, Rafael. (2007). *Energía Solar Térmica*. Madrid, España: FC Editorial.
- [5] Ochoa, L. (2012). *Análisis y Evaluación de Parámetros característicos en la Alineación de Helióstatos planos para hornos solares de Altos Flujos Radiativos*. UNAM: Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada. Juriquilla, Querétaro.
- [6] Arancibia Bulnes, C., & Best Brown, R. (2010). Energía del Sol. Ciencia "Revista de la academia de ciencias", 10-17.
- [7] Romeo Álvarez Manuel. *Energía Solar Termoeléctrica*. CIEMAT.
- [8] Duffie, J.A. y W.A. Beckman, (1991). *Solar Engineering of Thermal Process*, 2a edición, 11-12. John Wiley & Sons, Wisconsin, USA.
- [9] Villeda, G., Castañeda, A., Vega, J., Pineda, J. (2011). *Seguidor Solar de Dos Ejes para un Horno Solar*. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Querétaro.
Recuperado de: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000200011
- [10] García, G. y Egea, A , (2000). *El Helióstató Autónomo, Plataforma Solar de Almería*. Madrid, España,

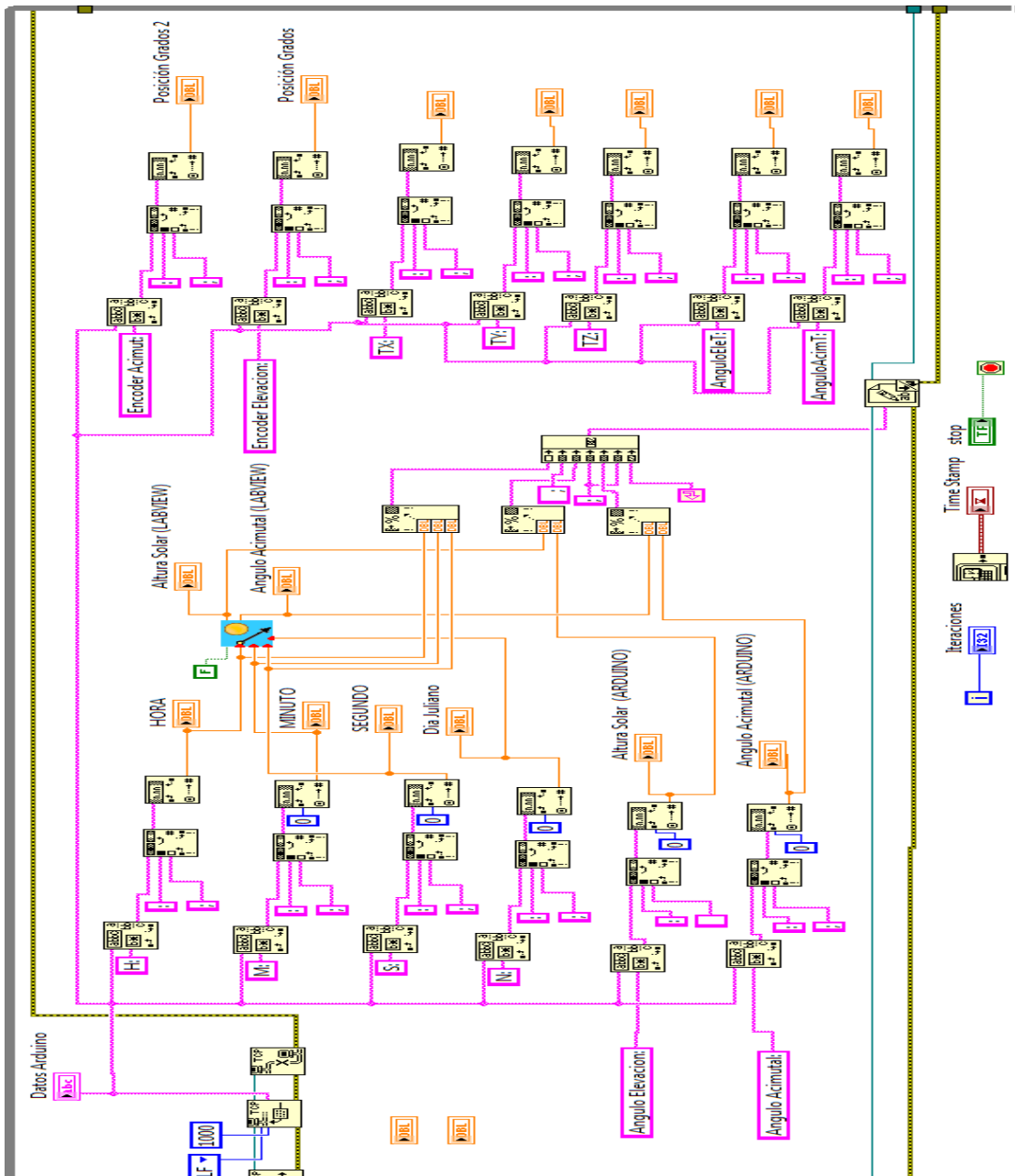
- [11] Antunez, Z., Benítez, V. Una propuesta de control para helióstatos de lazo cerrado. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora (UNISON), Sonora, México.
- [12] Blanco Muriel, M., Alarcón Padilla, D. C., López Moratalla, T., & Lara Coira, M. (2001). Computing the solar vector. *Solar Energy* Vol. 70 No. 5, 431-441.
- [13] Guo, M., Wang, Z., Zhang, J., Sun, F., & Zhang, X. (2011). Accurate altitude azimuth tracking angle formulas for a heliostat with mirror-pivot offset and other fixed geometrical errors. *Solar Energy*.



Anexos

Anexo 1

Programa .vi desarrollado en LabVIEW de la interfaz y análisis de las variables enviadas en Arduino.



Anexo 2

**Programa en Processing desarrollado en el software de Arduino del
cálculo del vector Solar.**

```
#include <Wire.h> // Incluye la librería Wire
#include "RTCLib.h" // Incluye la librería RTCLib
#include <Encoder.h>

Encoder myEnc(18, 24);
Encoder myEnc1(19, 22);
RTC_DS1307 RTC; // Crea el objeto RTC
int INAEle = 7;
int INBEle= 5;
int PWMELE = 6;
int INAacim = 4;
int INBacim= 2;
int PWMACIM = 3;
float B,E,Acimn,Acimt,Acim,a,b,D,W,Hss,Stseg,Tseg,DT,St,Hsr,Fi,Alfa,GradosEle,GradosEle;
float oldPosition;
float oldPosition1;

///LATITUD LOCAL///
float GradosLat =18;
float MinutosLat =51;

///LONGITUD LOCAL///
float GradosLong =99;
float MinutosLong =13;

///ORIENTACION (ESTE =1 / OESTE = -1)///
int O = 1;

///LATITUD SOLAR LS=90///
int LS= 90;

//HORARIO DE VERANO SI, HV=60; NO, HV=0;
int HV=0;
```

```

void setup ()
{
  Wire.begin(); // Establece la velocidad de datos del bus I2C
  RTC.begin(); // Establece la velocidad de datos del RTC
  Serial.begin (9600);

  pinMode(PWMELE, OUTPUT);
  pinMode(INAEle, OUTPUT);
  pinMode(INBEle, OUTPUT);
  pinMode(PWMACIM, OUTPUT);
  pinMode(INAacim, OUTPUT);
  pinMode(INBacim, OUTPUT);
  //RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
}

void loop ()
{
  float pi=3.1416;
  float LL = ((MinutosLong/60)+ GradosLong);
  //Serial.println(LL);
  float Lat= ((MinutosLat/60)+ GradosLat);
  //Serial.println(Lat);

  ////////////////////////////////////SE OBTIENEN VARIABLES H,M,S Y N (Hora 'H', Minuto 'M', Segundo
  'S', y Dia Juliano 'N'.)////////////////////////////////

  DateTime now = RTC.now(); // Obtiene la fecha y hora del RTC
  int N=0;
  int H =(now.hour());
  Serial.print("HORA: ");
  Serial.println(H);
  int M =(now.minute());
  Serial.print("MINUTO: ");
  Serial.println(M);
  int S =(now.second());
  Serial.print("SEGUNDO: ");
  Serial.println(S);

  int MES = (now.month());

```

```

switch(MES)
{
    case 1:
        N=(now.day());
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N);
        break;
    case 2:
        N=(now.day()+31);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N);
        break;
    case 3:
        N=(now.day()+59);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N);
        break;
    case 4:
        N=(now.day()+90);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N);
        break;
    case 5:
        N=(now.day()+120);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N);
        break;
    case 6:
        N=(now.day()+150);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N);
        break;
    case 7:
        N=(now.day()+180);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N); Serial.print("LUN");
        break;
    case 8:
        N=(now.day()+212);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N); Serial.print("LUN");
        break;
    case 9:
        N=(now.day()+243);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N); Serial.print("LUN");
        break;
    case 10:
        N=(now.day()+273);
        Serial.print("DIA JULIANO:");
        Serial.println(N); Serial.print("LUN");
        break;
}

```

```

case 11:
    N=(now.day()+304);
    Serial.print("DIA JULIANO:");
    Serial.println(N); Serial.print("LUN");
    break;
case 12:
    N=(now.day()+334);
    Serial.print("DIA JULIANO:");
    Serial.println(N); Serial.print("LUN");
    break;
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////

//////////////////////////////////////////////////////////////// Ecuaciones de Apuntamiento para obtener los angulos Acimutal y
Elevación////////////////////////////////////////////////////////////////

    B=((N-1)*360/365)*pi/180;
    E=229.2*(0.000075+0.001868*cos(B)-0.032077*sin(B)-0.014615*cos(2*B)-0.04089*sin(2*B));
    D=23.45*sin((360*(284+N)/365)*pi/180);
    St=4*O*(LS-LL)+E+(H*60+M+S/60)-HV;
    Stseg=St*60;
    Tseg=H*3600+M*60+S;
    DT=Tseg-Stseg;
    Hss=12+DT/3600+1/15*(acos(-tan(Lat*pi/180)*tan(D*pi/180))*180/pi);
    Hsr=12+DT/3600-1/15*(acos(-tan(Lat*pi/180)*tan(D*pi/180))*180/pi);
    St=4*O*(LS-LL)+E+(H*60+M+S/60)-HV;
    Stseg=St*3600;
    Tseg=H*3600+M*60+S;
    DT=Tseg-Stseg;
    W=(St/60-12)*15;
    Fi=acos(sin(Lat*pi/180)*sin(D*pi/180)+cos(Lat*pi/180)*cos(D*pi/180)*cos(W*pi/180))*180/pi;
    Alfa=90-Fi;
    Acimn=asin((cos(D*pi/180)*sin(W*pi/180))/sin(Fi*pi/180))*180/pi;
    a=cos(W*pi/180);
    b=tan(D*pi/180)/tan(Lat*pi/180);

    if (cos(W*pi/180) <= tan(D*pi/180)/tan(Lat*pi/180))
    {
        Acimt=Acimn;
        if (Acimt>0)
        {
            Acim=(180-Acimt);
        }
        else
        {
            Acim=(-180-Acimt);
        }
    }

```

```

        else
        {
            Acim=Acimn;

        }
        Serial.println ("Angulos del Vector Solar:");

        Serial.print("Angulo Acimutal: ");
        Serial.println(Acim);

        Serial.print("Angulo Elevacion: ");
        Serial.println(Alfa);

        Serial.print("Angulo Zenit: ");
        Serial.println(90-Alfa);
        //////////////////////////////////////
        //////////////////////////////////////
        delay(1000); // La información se actualiza cada 1 seg.
        Serial.println(" ");

```

Anexo 3

Programa en Processing desarrollado en el software de Arduino para la Adquisición de datos de los Encoders

```
#include <Encoder.h>
Encoder myEnc(19, 21);
Encoder myEnc1(19, 22);
int INAEle = 7;
int INBEle= 5;
int PWMELE = 6;
int INAcim = 4;
int INBacim= 2;
int PWMACIM = 3;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Lectura Encoder Altura:");
  Serial.print(" ");
  //Serial.println("Lectura Encoder Acimut:");
}
float PosicionEnc1;
float PosicionEnc2;
void loop()
{
  float NuevaPosicionE1 = myEnc.read();
  if (NuevaPosicionE1!= PosicionEnc1)
  {
    PosicionEnc1 = NuevaPosicionE1;
    float VueltasEle = 10021984/NuevaPosicionE1;
    float GradosEle = 90.000000/VueltasEle;
    Serial.println(GradosEle,8);
  }
  float NuevaPosicionE2 = myEnc1.read();
  if (NuevaPosicionE2 != PosicionEnc1)
  {
    PosicionEnc1 = NuevaPosicionE2;
    float VueltasAcim = 20000000/ NuevaPosicionE2;
    float GradosAcim = 90.000000/VueltasAcim;
    Serial.print(" ");
    Serial.println(GradosAcim,8);
  }
}
```

Anexo 4

Programa en Processing desarrollado en el software de Arduino para enviar datos a través de una dirección IP desde el controlador principal.

```
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>
//Se asignan direccion MAC e IP para arduino
byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };
IPAddress ip(172,16,3,211);
//Se inicializa la libreria Ethernet con el puerto de default
EthernetServer server(8000);
void setup()
{
  // Inicia la conexion Ethernet con el servidor
  Serial.begin(9600);
  Ethernet.begin(mac, ip);
  server.begin();
  pinMode(2,OUTPUT);
  digitalWrite(2,LOW);
}
void loop()
{
  // Busqueda de clientes disponibles
  EthernetClient client = server.available();
  if (client)
  {while (client.connected())
  {
    if (client.available())
    {
      char PINLED = client.read();
      if (PINLED == 'A') digitalWrite(2,HIGH);
      if (PINLED== 'a') digitalWrite(2,LOW);
    }
    server.println(analogRead(0));
    Serial.println(analogRead(0));
    delay(100);
  }
  //Se cierra la conexion
  client.stop();
}
}
```