



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO FOTOVOLTAICO”

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

P R E S E N T A :

JONATHAN SUMANO FUENTEVILLA

DIRECTOR:

M. C. JORGE LUIS BARAHONA ÁVALOS

ASESOR:

DR. ALBERTO ANTONIO GARCÍA

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA. MARZO DE 2012

**Tesis presentada el 29 Marzo del 2012
ante los siguientes sinodales:**

**Ing. Hugo Suárez Onofre
M. C. Arturo Pablo Sandoval García
Dr. Jesús Linares Flores**

Director de Tesis:

M.C Jorge Luis Barahona Ávalos

Asesor de Tesis:

Dr. Alberto Antonio García

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a mis padres que con todo su amor y esfuerzo me han ayudado a realizar mis metas, sueños y propósitos durante todos estos años. Con todo mi amor y cariño.

A MI MADRE:

Trinidad Fuentevilla Altamirano

A MI PADRE:

Abraham Francisco Sumano Díaz

Agradecimientos

No solo durante el desarrollo de mi tesis hubo personas que estuvieron conmigo apoyándome, dándome un buen consejo o un buen regaño cuando era necesario. También a mis amigos que me apoyaron durante mi desarrollo como profesionista, con los cuales compartí muchos alegres, tristes y raros momentos y anécdotas que nunca olvidaré, a todos ellos muchas gracias.

A Dios porque durante este tiempo lo conocí, aprendí a depender de Él, me ayudó a crecer, a madurar, a saber que no hay nada imposible y que las únicas barreras que hay en nuestras vidas son las que nos ponemos nosotros mismos. Y en los momentos de soledad me dijo “No estás solo, Yo soy estoy contigo sigue adelante”.

A mi mamá y mi papá que durante estos años me apoyaron incondicionalmente, siempre estuvieron al pendiente de mí a pesar de la distancia, cuando tenían la posibilidad de venir estaban conmigo aunque sea unas horas para saber cómo estaba y sentarse a platicar de mil y un cosas, dándome consejos, gracias también porque cualquier cosa que necesitaba o que me faltaba hacían un sacrificio por brindármelo y por sus visitas sorpresa. No hay palabras para agradecerles lo que hicieron por mí.

A mis hermanos Dalia y Fer que durante el tiempo que estuvieron en Huajuapán hicieron que el tiempo pasará más rápido y tenerlos cerca significo un gran apoyo. Y que cada fin de semana que llegaba pasábamos un buen rato a donde salíamos o en casa simplemente. Los quiero mucho.

A Daysi que desde el principio me brindó su amistad, estuvo conmigo en esas veladas largas hasta al amanecer en temporada de exámenes y de proyectos, que me apoyó no solo con palabras sabias, si no que con el simplemente hecho de estar presente pasábamos un rato agradable, por las tardes que nos la pasábamos platicando de muchas cosas y jugando. Nunca la olvidaré.

A mi tío Luis y su familia que estuvo al pendiente de como estaba, como iba, si me hacía falta algo, gracias por tu apoyo durante este tiempo y tus consejos. Los extrañare cuando tenga que partir.

A la primera generación de Mecatrónica que durante los 5 años permanecimos unidos, brindándonos palabras de ánimo, trabajando en equipo, por los convivios que realizábamos. Nunca olvidaré ese viaje a Monterrey.

Al grupo Mas Allá de tus Límites que hacían las noches más amenas y más largas, en las que pasábamos muy grandes momentos aprendiendo de lo que Dios ha hecho en cada una de nuestras vidas, cuando llegaban a “estudiar” a mi cuarto y a jugar Wii, gracias por sus experiencias, historias y por permitirme ser parte de su vida. A Daysi, Sam, Yoshio, Aby, Vero, Rey, Gerardo, Quique, Alma, Anibal, Amadeus, Adri, Zule, Kari, Lore, Eliut, Juan Carlos, Arely. A TODOS GRACIAS.

Al profesor Heriberto que me brindo su amistad, sus consejos académicos y personales, del cual aprendí muchas cosas que serán muy significativas en mi vida.

A los profesores me apoyaron a desarrollar y mejorar este trabajo mi director Jorge Luis Barahona, a mi asesor Alberto Antonio por sus ideas, y a mis sinodales Hugo, Linares y Arturo por su dedicación y tiempo.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	v
<i>Agradecimientos</i>	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Resumen	xv
Abstract.....	xvii
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del Problema	4
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos y metas	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	8
1.4.3. Metas	8
1.5. Organización del documento	8
Capítulo II. Marco Teórico.....	9
2.1. Paneles fotovoltaicos	9
2.2. Sistemas de seguimiento solar.....	10
2.3. Carta solar.....	10
2.3.1. Ecuación del tiempo	13
2.3.2. Ángulo horario ω	15
2.3.3. Altura α y Azimut Solar γ	15
2.4. Microcontroladores.....	16
2.4.1. Microcontroladores AVR de ATMEL®	17

2.4.2. Circuito conversor de niveles RS-232 a TTL.....	18
2.5. Diseño asistido por computadora (CAD)	19
2.5.1. SolidWorks®	19
2.6. Motores de CD	20
2.7. Sensores	22
2.7.1. Sensores de posición.....	23
2.8. Manejador de potencia de un motor de CD.....	24
2.9. Reductores de engranaje.....	25
Capítulo III. Sistema de Seguimiento Fotovoltaico	29
3.1. Sistemas de seguimiento solar que existen en el mercado	30
3.2. Diseño mecánico	30
3.2.1. Construcción del sistema mecánico.....	35
3.3. Diseño electrónico.....	43
3.3.1. Análisis de los requerimientos.....	43
3.3.2. Configuración de registros	44
3.3.3. Cuerpo del programa	44
3.3.4. Circuito electrónico de potencia.....	46
3.3.5. Circuito de interfaz serial	46
3.3.6. Sensores de posición.....	47
3.4. Diseño computacional	48
3.4.1. Diseño del programa.....	48
Capítulo IV. Resultados.....	55
4.1. Pruebas	55
Capítulo V: Conclusiones.....	65
5.1. Trabajos futuros.....	66
Bibliografía.....	67
Apéndice A. Código del microcontrolador	A-1
Apéndice B. Diagrama esquemático	B-1
Apéndice C. Costo de material empleado para el SSFA.....	C-1

Índice de Figuras

Figura 1.1 Irradiación solar media en otoño en México.	5
Figura 1.2 Irradiación solar del estado de Oaxaca.	6
Figura 1.3 Metodología de desarrollo.	6
Figura 2.1 Movimiento del sol a lo largo del día.	11
Figura 2.2 Muestra la latitud φ y longitud L.	11
Figura 2.3 Ejemplo de ángulo de declinación δ	12
Figura 2.4 Relaciones geométricas sol - tierra. (a) Movimiento de la tierra alrededor del sol; (b) Localización de los círculos ártico, antártico y los trópicos.	13
Figura 2.5 Ecuación del tiempo.	14
Figura 2.6 Ángulos de posición solar.	15
Figura 2.7 ATMega16 [®]	18
Figura 2.8 Dispositivo MAX-232.	18
Figura 2.9 Motor de una unidad de discos flexibles.	20
Figura 2.10 Rotor.	21
Figura 2.11 Estator del motor.	22
Figura 2.12 Diagrama esquemático de potenciómetro.	23
Figura 2.13 Arreglo de interruptores para un puente H.	24
Figura 2.14 Diagrama a bloques del LMD18200.	24
Figura 2.15 Distribución de los ejes de rotación y sus direcciones.	25
Figura 2.16 Tipos de engrane [35].	26
Figura 3.1 Gráfica de los ángulos de azimut y altura solar para el 26 de Enero del 2011.	29
Figura 3.2 a) Base del tripie, b) Soporte balancín, c) Perno, d) Estructra I para el panel solar, e) Base motor f) Soporte tripie.	31
Figura 3.3 a) Base sensor, b) Motor de CD, c) Cople, d) Soporte panel, e) Panel solar, f) Soportes sensor.	31
Figura 3.4 Ensamble final del SSFA en Solidworks.	32
Figura 3.5 Configuración de la fuerza de gravedad.	32
Figura 3.6 Configuración del motor.	33
Figura 3.7 Gráfica del torque necesario para el movimiento del panel fotovoltaico para el ángulo de altura solar.	33

Figura 3.8 Gráfica del torque necesario para el movimiento del panel fotovoltaico para el ángulo de azimut.	34
Figura 3.9 Fotografía del motor de CD.	34
Figura 3.10 Fabricación y ensamble del soporte para el panel fotovoltaico.	35
Figura 3.11 Piezas del balancín para el panel fotovoltaico.	35
Figura 3.12 Balancín.	36
Figura 3.13 Piezas para fijar los motores.	36
Figura 3.14 Balancín con el sujetador.	37
Figura 3.15 Fabricación del cople en el torno.	37
Figura 3.16 Coples finales.	38
Figura 3.17 Piezas a fabricar.	38
Figura 3.18 Piezas soldadas al soporte para el panel fotovoltaico.	38
Figura 3.19 Cople soldado a uno de los soportes del panel fotovoltaico.	39
Figura 3.20 Cople soldado al balancín.	39
Figura 3.21 Piezas de la base del sistema.	40
Figura 3.22 Base del sistema.	40
Figura 3.23 Base del prototipo.	40
Figura 3.24 Soporte para el motor (Angulo Azimut).	41
Figura 3.25 Base final.	41
Figura 3.26 Ensamble del motor con la base y el balancín.	41
Figura 3.27 Ensamble del motor al balancín.	42
Figura 3.28 Ensamble final del prototipo de SSFA.	42
Figura 3.29 Simulación del código del ATmega16.	45
Figura 3.30 Diagrama esquemático del LMD18200.	46
Figura 3.31 Diagrama esquemático del MAX-232.	46
Figura 3.32 Convertidor USB a Serie.	47
Figura 3.33 Sensores de posición.	47
Figura 3.34 Sistema electrónico de control.	48
Figura 3.35 Diagrama de Flujo del programa en LabVIEW®.	49
Figura 3.36 Diagrama a bloques para la calcular la fecha y hora.	51
Figura 3.37 Diagrama a bloques para calcular los ángulos de azimut y altura solar.	51
Figura 3.38 Comparación para el ángulo de azimut.	52
Figura 3.39 Integración de los datos.	52
Figura 3.40 Diagrama a bloques en LabVIEW.	53
Figura 4.1 Pantalla del GPS.	55
Figura 4.2 SSFA calibrado hacia el norte.	56
Figura 4.3 Parámetros configurados en LabVIEW.	56
Figura 4.4 Gráfica del voltaje del panel fotovoltaico.	57
Figura 4.5 Ganancias de sintonización en LabVIEW.	57
Figura 4.6 La interfaz en LabVIEW.	58
Figura 4.7 Gráfica del voltaje del panel fotovoltaico.	58
Figura 4.8 Comparación de la altura solar del SSFA.	59

Figura 4.9 Comparación del ángulo de azimut del SSFA.	59
Figura 4.10 Controlador de carga CX10-1.	60
Figura 4.11 Batería recargable para aplicaciones fotovoltaicas CALE.	60
Figura 4.12 Voltaje a la salida del controlador de carga.	61
Figura 4.13 Corriente a la salida del controlador de carga.	61
Figura 4.14 Comparación de la altura solar del SSFA.	62
Figura 4.15 Comparación del ángulo de azimut del SSFA.	62
Figura 4.16 Monitoreo del convertidor.	63
Figura 4.17 Potencia de entrada del convertidor.	63
Figura 4.18 Potencia en la carga del convertidor.	64

Resumen

Durante un año, el sol emite sobre la Tierra cuatro mil veces más energía de la que se consume a nivel global. A nivel local, una casa habitación bien aislada puede disponer de agua caliente y calefactores solares, con resultados que disminuyen considerablemente los costos de facturación. El uso de combustibles fósiles está generando grandes cambios climáticos en el planeta, como lo son el efecto invernadero, la precipitación ácida y el adelgazamiento de la capa de ozono. Por estas razones es necesario fomentar el uso de energías renovables.

Este trabajo de tesis está relacionado con el diseño y construcción de un prototipo de sistema fotovoltaico que sigue la trayectoria del sol sobre la bóveda celeste, mediante un algoritmo basado en una carta solar.

Como resultado se obtiene un sistema que se posiciona en forma automática en el punto de máxima irradiación solar a través del algoritmo que calcula los ángulos de azimut y de elevación necesario. Los ángulos así calculados y parámetros de ganancia de los controladores que permiten posicionar los motores de cada eje del sistema, son enviados a un microcontrolador ATmega16 mediante el puerto serie de una PC.

Abstract

In the space of a year, the sun emits four thousand times more energy to the Earth than the total energy consumption of the entire world. On a local level, a well insulated house can have hot water and solar heaters that considerably lower energy costs. The use of fossil fuels is creating significant climate change on the planet, such as the greenhouse effect, acid rain, and the thinning of the ozone layer. For these reasons it is necessary to encourage the use of renewable energy.

This thesis is related to the design and construction of a prototype photovoltaic system that tracks the sun in the sky, using an algorithm based on a solar chart.

The result is a system that automatically positions itself at the point of maximum solar irradiation through the algorithm which calculates the angles of azimuth and elevation necessary. The angles thus calculated and the control parameters of the drivers which allow the positioning of the motors of each axis of the system are sent to a ATmega16 microcontroller through the serial port of a PC.

Capítulo I. Introducción

La energía solar se presenta como una alternativa importante ante el aumento del consumo energético del planeta, debido a que, la cantidad de la energía del sol, que llega a la superficie de la tierra en un día, es diez veces más que la energía total consumida en nuestro planeta durante un año. A través del efecto fotovoltaico la energía contenida en la luz del sol puede ser convertida directamente en energía eléctrica [1].

Hay muchas aplicaciones para sistemas de energía solar, pero también hay muchas limitaciones a estas aplicaciones. El costo-beneficio es demasiado bajo para los sistemas de energía solar que se utilizan ampliamente para alimentar hogares, empresas, o incluso los productos individuales. Los sistemas de energía solar se utilizan como fuente principal de alimentación para una gran mayoría de los satélites que orbitan la Tierra. Sin embargo, el beneficio de utilizar la energía solar en el espacio es mucho mayor que el costo de implementación correspondiente [2].

Hay amplias gamas de productos disponibles para el consumidor que funcionan con energía solar, pero pueden ser costosos o poco prácticos debido a sus limitaciones. Los sistemas de energía solar no son competitivos en el mercado porque los consumidores están familiarizados con productos prácticos, más convenientes, que tienen fuentes de energía más comunes. Algunos productos de consumo son las radios, linternas, casas rodantes, sistemas de carga lenta, la iluminación solar al aire libre, los sistemas portátiles de carga, e incluso los sistemas caseros que pueden estar vinculados a la red eléctrica existente [3].

Existen algunas aplicaciones prácticas que se utilizan en lugares remotos, como cabañas o pequeñas comunidades que se encuentran alejadas de las redes eléctricas. Como resultado, el costo de instalar un sistema de energía solar es más barato que el costo de enviar las líneas de transmisión de la red eléctrica hasta esos lugares. Los sistemas solares como fuente de energía también son muy convenientes en pequeñas aplicaciones como lo son en calculadoras, alumbrado público e incluso semáforos [3].

El principal problema con la tecnología de paneles fotovoltaicos es que la eficiencia de los sistemas de energía solar sigue siendo pobre, y los costos por kilowatt/hora (KW/hr) no son competitivos, en la mayoría de los casos, contra fuentes de energía tradicionales (petróleo, geotermia, gas natural, carbón natural, etc.). Los paneles solares por sí solos son bastante

ineficientes en su capacidad para convertir la luz solar en energía eléctrica. Además, los reguladores de carga y otros dispositivos que conforman el sistema de energía solar también son algo ineficientes y costosos [4].

Esta tesis está enfocada al diseño y construcción de un sistema capaz de seguir la trayectoria del sol, posicionándose en el punto de máxima irradiación solar, usando una carta solar para calcular los ángulos de posicionamiento requeridos, y así mejorar la potencia eléctrica generada por un panel fotovoltaico.

1.1. Antecedentes

La protección del medio ambiente es compromiso de todos: gobiernos, personas e industrias. Hoy día se puede observar un gran crecimiento, tanto en la producción de paneles solares, cada vez más económicos, como en la implementación de grandes plantas solares conectadas a la red eléctrica [5]. En México, el Instituto Politécnico Nacional (IPN) ha sido pionero en el desarrollo fotovoltaico, desde hace más de 25 años, en la creación de una planta piloto que fabrica módulos fotovoltaicos con base en celdas de silicio cristalino. La tecnología utilizada es prácticamente artesanal y los elementos de producción son muy limitados, aun cuando se ha contado con el apoyo de diversas dependencias gubernamentales [6].

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel, cuyos estudios sobre el espectro solar, magnetismo, electricidad y óptica son el pilar científico de la energía fotovoltaica. En 1883, el inventor norteamericano Charles Fritts construyó la primera celda solar con base en un semiconductor de Selenio (Se) con una capa delgada de Oro (Au) obteniendo una eficiencia del 1%. En 1954, en los Laboratorios Bell se experimentaba con semiconductores y accidentalmente se encontró que el Silicio (Si) con algunas impurezas era muy sensitivo a la luz. Los resultados obtenidos contribuyeron a la producción comercial de paneles solares, lográndose una eficiencia del 6% [7].

En 1957, la ex-URSS lanzó su primer satélite espacial y un año después, en febrero de 1958, los EE. UU. hicieron lo mismo. La primera nave espacial que usó paneles solares fue el satélite norteamericano Explorer I, lanzado en febrero de 1958. Este evento generó un gran interés en la producción y lanzamiento de satélites geoestacionarios (GEO) para el desarrollo de las telecomunicaciones, en los que la energía provendría de un dispositivo de captación de la luz solar. Dicho desarrollo es de gran importancia ya que estimuló la investigación en la búsqueda de paneles cada vez más eficientes y motivó los avances tecnológicos dentro de la industria. El primer mercado de los paneles fotovoltaicos fue dirigido al sector aeroespacial. Los resultados positivos de la misión Explorer I marcaron una pauta en el desarrollo de las telecomunicaciones y de los paneles fotovoltaicos. La llegada de la celda de Silicio dio inicio al desarrollo de nuevas tecnologías, principalmente orientadas a la búsqueda de paneles solares más eficientes [8].

Actualmente, el caso más representativo del uso de los paneles fotovoltaicos, en el sector aeroespacial, es la Estación Espacial Internacional. La energía utilizada viene de 16 estructuras de 72 m de largo por 12 m. de ancho y 864 m² de paneles solares en cada una de ellas. Los módulos de alta eficiencia para uso aeroespacial proporcionan aproximadamente un 20% de eficiencia en

referencia a la radiación solar sobre la superficie terrestre, pues en el espacio exterior la eficiencia es mucho mayor. Cada una de las estructuras del sistema fotovoltaico mencionado, proporciona alrededor de 170 KW/hr y aproximadamente 2.7 MW/hr en conjunto [8].

Hasta septiembre de 2007, España tuvo un crecimiento vertiginoso de plantas fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica, sin embargo la actual normativa gubernamental, además de reducir el precio de compra, ha limitado la cantidad de Megawatts instalados por trimestre para la implementación de plantas solares fotovoltaicas. El motivo de esta reducción es la carencia de redes eléctricas.

El auto consumo fotovoltaico es una alternativa para la reducción del CO₂, sin embargo no existen suficientes regulaciones que apoyen a los productores de auto consumo. En este caso además de la protección del medio ambiente el beneficiario directo es el consumidor-usuario. Las instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo las implementan empresas del sector privado y sin ningún tipo de ayuda [9].

En México desde 1993 a 2003, la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos se incrementó de 7 a 15 MW, generando más de 8,000 MW/hr por año para electrificación rural, bombeo de agua y refrigeración. Se espera tener instalados 25 MW con tecnología fotovoltaica para 2013, y generar 14 GW/hr por año [10]. La CONAE considera que en el 2001, se contaba con pequeñas cargas distribuidas de más de 115 mil metros cuadrados en sistemas fotovoltaicos instalados en el país, que generaron cerca de 8.4 GWh/año. Al 2012 se esperan 30 MW instalados y 18 GWh/año de energía [11].

CFE cuenta con una planta híbrida en San Juanico, Baja California Sur, conformada por 17 KW fotovoltaico, 100 KW eólicos y motor generador diesel de 80 KW. Adicionalmente, se encuentra en proyecto la instalación de una planta híbrida de ciclo combinado al noroeste de México, con una capacidad renovable de 39 MW. El Instituto de Investigaciones Eléctricas ha instalado en el noroeste del país, pequeños sistemas fotovoltaicos de 1.5 a 2 KW con la finalidad de estudiar su efecto sobre la red de transmisión en la demanda del usuario [11].

Los costos asociados a sistemas fotovoltaicos se encuentran en el rango de 3,500 a 5,000 USD/KW instalado (dependiendo de la tecnología empleada y de su conexión a la red) y de 25 a 150 USD por KW/h generado. Datos del Instituto de investigaciones Eléctricas señalan que el potencial solar promedio en México, es aproximadamente de 5 KWh/m² por día [11].

Debido al tema de protección al medio ambiente y al rápido incremento del precio del petróleo, es un objetivo que se realicen esfuerzos universales e intentos de buscar fuentes alternativas de energía. Entre ellas, la energía solar es una fuente abundante de suministro y además libre de contaminación, por lo que la investigación sobre energía solar ha llamado mucho la atención. Taiwan se encuentra en la zona subtropical, con una gran cantidad de luz solar y las largas jornadas de sol. Por lo tanto, la energía solar debe ser el candidato más destacado para la energía verde [12]. Las universidades están desarrollando dispositivos que utilizan energía solar a través de los paneles solares, como pueden ser cargadores de baterías, vehículos que utilicen

motores eléctricos para hacer crecer la demanda de estos paneles fotovoltaicos e incrementar la demanda [13]. En la UTM se desarrolló un sistema fotovoltaico experimental para controlar la velocidad de un motor de CD a través de convertidores electrónicos de potencia. Con este sistema se desarrollan actualmente nuevas aplicaciones y generación de conocimiento [14] [15] [16].

1.2. Planteamiento del Problema

El creciente desarrollo industrial y de consumo ha traído como consecuencia un deterioro del medio ambiente a través de las emisiones de CO₂ y otros gases que además de destruir la capa de ozono afectan la salud del hombre. La energía solar fotovoltaica se plantea como una solución para la reducción de emisiones de CO₂, ya que cada KW/hr de energía solar generada deja de emitir 0,311 Kg de CO₂ a la atmósfera. Por este motivo los gobiernos están invirtiendo en el uso de energías renovables, y la que se ha desarrollado más rápidamente es la fotovoltaica [5].

Derivado del hecho de que los paneles fotovoltaicos tienen una baja eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica, y debido a que la radiación solar captada por el panel varía con el tiempo si este esta fijo, este trabajo aborda el diseño y construcción de un prototipo capaz de posicionarse, en forma automática, en el punto de máxima irradiación solar durante el día.

Se propone desarrollar un prototipo de sistema de seguimiento solar que se instalará en el edificio del Instituto de Electrónica y Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM). La idea central, es que dicho prototipo pueda ser de utilidad a profesores y estudiantes con fines de enseñanza – aprendizaje y/o actividades de investigación. El presente trabajo consiste en desarrollar un sistema mecatrónico capaz de posicionar un panel fotovoltaico en dirección a los rayos del sol. Los parámetros de posicionamiento son calculados a través de una PC apoyados del software LabView[®]. Los datos así generados se envían por medio del puerto serie de la PC hacia un microcontrolador ATmega16[®], el cual se encarga de recibir la información, procesarla y controlar los motores de CD para el posicionamiento del mecanismo y orientar el panel solar a la dirección deseada. El sistema emplea sensores que permiten monitorea la posición de los motores para saber si estos han alcanzado el ángulos deseados.

1.3. Justificación

Es necesario fomentar el uso de energías renovables puesto que el uso de combustibles fósiles está generando grandes cambios climáticos en el planeta, como lo son el efecto invernadero, la precipitación ácida y el adelgazamiento de la capa de ozono. Durante un año, el sol emite sobre la Tierra cuatro mil veces más energía de la que se consume a nivel global. La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación. A nivel local, una casa habitación bien aislada puede disponer de agua caliente y calefactores solares, con resultados que disminuyen considerablemente los costos de facturación.

Dadas las condiciones ambientales actuales y la marginación en el estado de Oaxaca es necesario empezar a incursionar en la generación de energía o vapor de agua con tecnologías alternativas que sean ecológicas, y que puedan significar mayor desarrollo mediante la generación de tecnología propia (mexicana) para aprovechar el recurso presente en la región. Por tanto resulta importante tener un prototipo de canal parabólico, para caracterizar el recurso energético de la región, y poder fabricarlo con los recursos disponibles en la UTM, para así poder darle las aplicaciones que se requieren en la región, como es la generación de electricidad, la cual resulta bastante útil en lugares apartados en donde aún no se cuenta con el servicio, destilación de mezcal entre otras [17].

Una de las fuentes renovables para generar energía que puede ser aprovechada en nuestro país es la energía solar, ya que existen regiones con altos niveles de irradiación solar. En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo del mapa de irradiación solar del país, en el cual se observa que las regiones con los niveles más altos de irradiación solar son: la región noroeste y parte de la zona centro y sur. En el estado de Oaxaca, y en particular en la región mixteca Huajuapeña se cuenta con niveles aceptables de irradiación solar, como se muestra en la Figura 1.2 y en la Tabla 1.1. La región cuenta con 150 días soleados anuales, por tanto el aprovechamiento que tendrá el colector será de al menos la mitad del año y con una irradiación de 6.41KWh/m². Realmente se tienen mucha ventaja sobre varias regiones del país y no se ha aprovechado como debería. Por tanto este trabajo es una forma de incursionar en las posibles aplicaciones de esta tecnología [17].

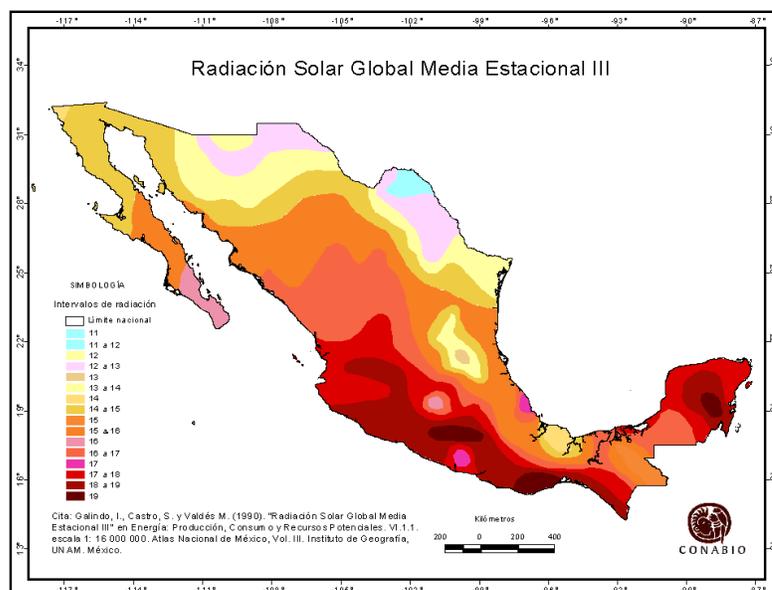


Figura 1.1 Irradiación solar media en otoño en México.

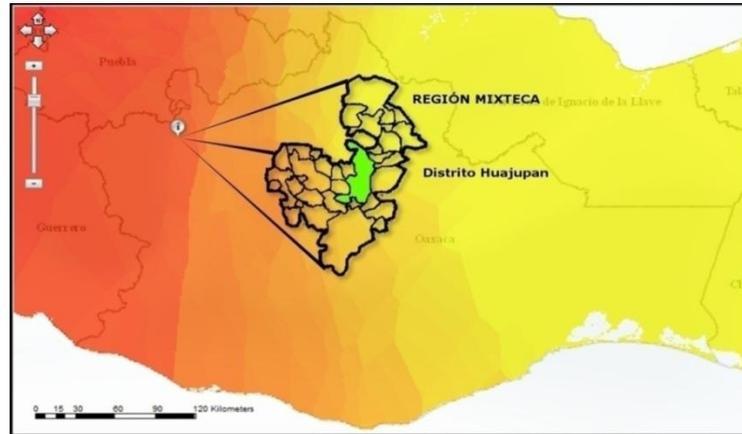


Figura 1.2 Irradiación solar del estado de Oaxaca.

Tabla 1.1 Datos anuales de Irradiación de Huajuapán de León.

Datos Anuales del Punto Seleccionado: 17.889,-97.766					
Área Urbana:		Densidad de potencia 80 m (W/m ²):	241	Velocidad 50 m (m/s):	4.96
Municipio:	Heroica Ciudad de Huajuapán de León	Densidad de potencia 50 m (W/m ²):	197	Irradiación Global KWh/m ² -día:	6.41
Estado:	Oaxaca	Velocidad 80 m (m/s):	5.31		

Para la realización del proyecto se tiene que llevar una serie de pasos que conllevarán hacia nuestros objetivos, para ello se utilizó la siguiente metodología.

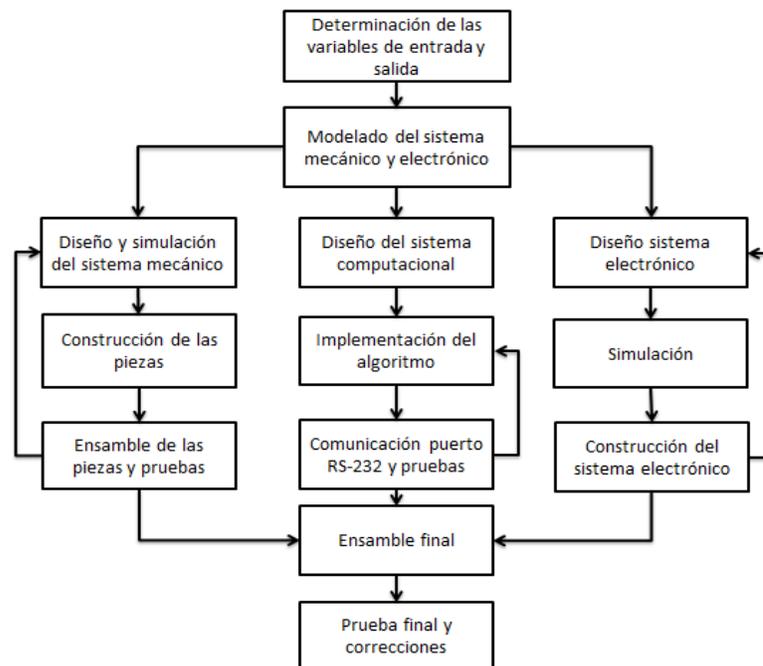


Figura 1.3 Metodología de desarrollo.

- **Determinación de las variables de entrada y salida:** Aquí se analizan los dispositivos, motores, sensores y necesarios para que el SSFA cumpla con los requerimientos.
- **Diseño y construcción del sistema mecánico.** Se analizará el tipo de movimiento del SSFA, así como los materiales a emplear para su construcción, diseño asistido por computadora (CAD) de cada una de las partes del prototipo.
- **Construcción de las piezas.** Se fabricarán cada uno de los componentes del SSFA para ensamblar el SSFA y obtener el movimiento deseado en base a las piezas diseñadas en CAD.
- **Diseño asistido por computadora.** Se analizarán el software, para implementar el algoritmo que permitirá que el SSFA siga el punto de máxima irradiación solar.
- **Implementación del algoritmo.** Se implementará el algoritmo de seguimiento de máxima irradiación solar en una PC con una interfaz agradable al usuario.
- **Comunicación puerto serie y pruebas.** Se desarrollará dentro de la PC un pseudocódigo que permita comunicación con el sistema electrónico.
- **Diseño y simulación del sistema electrónico.** Se analizará los componentes electrónicos para controlar los motores que permitirán posicionar el SSFA en el punto de máxima irradiación solar.
- **Simulación.** Se simulará los componentes electrónicos para comprobar si el comportamiento es el deseado.
- **Construcción del sistema electrónico.** Se ensamblarán cada uno de los dispositivos electrónicos así como pruebas de cada componente para comprobar su correcto funcionamiento.
- **Ensamble final.** Se unirán cada uno de las tres partes mecánicas, computacional y electrónica del SSFA.
- **Prueba final y correcciones.** Se realizarán pruebas del SSFA para comprobar que este siguiendo el punto de máxima irradiación solar y el comportamiento del todo sistema sea estable. Así como tomar acciones necesarias para corregir parámetros no deseados.

1.4. Objetivos y metas

1.4.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es diseñar y construir un prototipo mecatrónico para el posicionamiento de paneles solares monocristalinos, consistente en un seguidor solar a dos ejes para incrementar la irradiación solar captada por los paneles y así mejorar la conversión de energía solar a eléctrica durante el día.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir el seguidor a dos ejes para el sistema de seguimiento fotovoltaico automático (SSFA).
- Seleccionar entre los métodos existentes en la literatura, el más adecuado para determinar la posición del sol a determinada hora del día.
- Diseñar e implementar un sistema electrónico para SSFA.
- Seleccionar e implementar una técnica de control a fin de conseguir que el SSFA sea capaz de posicionarse en la trayectoria deseada en forma automática.

1.4.3. Metas

- Diseñar y simular a través de la herramienta SolidWorks[®], un sistema con dos grados de libertad para el posicionamiento de un panel fotovoltaico CONERMEX[®], y así calcular los torques mínimos necesarios de los motores a emplear para el movimiento continuo del sistema.
- Construir las partes del SSFA diseñado utilizando materiales de fácil adquisición.
- Ensamblar los componentes mecánicos y electrónicos.
- Implementar a través del software LabView[®] un algoritmo basado en una carta solar para calcular los ángulos de posicionamientos requeridos.
- Diseñar un circuito electrónico para la manipulación de los motores basados en la potencia de los motores.
- Implementar en un microcontrolador un algoritmo capaz de posicionarse en los ángulos deseados usando la circuitería de potencia necesaria para la manipulación de los motores y sensores de posicionamiento.
- Comunicar la PC y el microcontrolador ATmega16[®] vía puerto serie para el intercambio de datos.
- Realizar un control PID con retroalimentación para el posicionamiento del SSFA en el microcontrolador.

1.5. Organización del documento

Este documento está organizado de la siguiente manera. El Capítulo II trata conceptos básicos acerca del posicionamiento solar, paneles fotovoltaicos, software, etc, para la comprensión del documento. El Capítulo III abarca el desarrollo del prototipo respecto a la parte mecánica, electrónica y de software, así como el ensamble de todas las partes y la presentación del código para la manipulación de los motores y sensores. En el Capítulo IV se presentan las pruebas experimentales realizadas así como los resultados obtenidos y la presentación de la interfaz durante el funcionamiento del sistema. Finalmente se muestran algunas conclusiones y propuestas para trabajos futuros.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1. Paneles fotovoltaicos

Los paneles solares son dispositivos que se encargan de transformar parte de la radiación solar que incide en ellos en energía eléctrica y sus principales componentes son las celdas de silicio. Los paneles fotovoltaicos están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad, las cuales comúnmente son llamadas celdas fotovoltaicas y dependen del efecto fotovoltaico para transformar la energía del sol y hacer que una corriente pase entre dos placas con cargas eléctricas opuestas [18].

La conversión de las celdas fotovoltaicas oscila entre el 8% y el 29% de eficiencia. Pese a lo anterior, ha habido una tendencia en la disminución del precio de los sistemas modernos de electrónica de potencia y las celdas fotovoltaicas, lo que indica buenas promesas para las nuevas instalaciones. El rendimiento de un sistema fotovoltaico se ve influenciado por su potencia máxima, los cambios de temperatura, la intensidad solar y la carga conectada [19].

Los sistemas de generación de energía basados en energía solar son hoy en día la solución más prometedora para requerimientos de baja y mediana potencia con la finalidad de reducir el consumo de energía producida por el petróleo y el gas. Sin embargo, la relación costo-beneficio de las celdas solares basadas en silicio es aún elevado y su eficiencia es baja, en comparación con otras fuentes de energía. Independientemente de la elección del tipo de celda solar, los módulos fotovoltaicos deben estar conectados a un sistema de conversión de energía, con el fin de gestionar la energía producida y proporcionar una interfaz adecuada a la carga como lo son convertidores electrónicos no lineales que operan en modo de conmutación [20].

Existen tres tipos de paneles fotovoltaicos:

- Monocristalino.** Están formados en secciones con una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En algunos análisis desarrollados en laboratorios se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7%, a diferencia de los que actualmente existen en el mercado que alcanzan un 16% [21].

- Policristalino.** Los materiales son semejantes a los monocristalinos, sin embargo el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles policristalinos se basan en secciones

de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Son visualmente muy reconocibles por presentar su superficie un aspecto granulado. Su rendimiento es inferior al de los monocristalinos pero son de bajo costo alcanzando rendimientos comercialmente disponibles hasta de un 14% [21].

•**Amorfo.** Basados también en el silicio, pero a diferencia de los anteriores este material no sigue una estructura cristalina. Los paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos como calculadoras, relojes y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo ha sido del 13% y los de uso comercial sólo alcanzan el 8% [21].

2.2. Sistemas de seguimiento solar

Un sistema de seguimiento solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma perpendicular a los rayos solares para un mejor aprovechamiento de la radiación solar, ya sea siguiendo al sol desde el Este al amanecer hasta el Oeste en la puesta, o bien empleando el punto de máxima potencia [22].

Existen tres tipos de seguidores solares:

•**Estructuras Fijas.** Son las más robustas y flexibles del mercado y permiten adaptarse a cualquier tipo de terreno con desniveles superiores al 5% [22].

•**Seguidores de un Eje.** El seguidor solar estacional de un eje incrementa la producción de energía eléctrica en un 28% más respecto a una instalación fija [22].

•**Seguidores a dos Ejes.** Los seguidores a dos ejes permiten incrementar aproximadamente la eficiencia hasta un 35% la producción de energía eléctrica de los paneles solares fotovoltaicos [22].

2.3. Carta solar

Las cartas solares son instrumentos auxiliares de suma importancia para los arquitectos, ya que a través de ellas se puede saber qué sucede en términos de sol y de sombra en un determinado momento para una posición geográfica específica. Estas proyecciones exponen gráficamente el movimiento del sol en relación a un punto determinado de la tierra [23].

Cada día, el sol, para un observador situado en la tierra, sigue una trayectoria circular a través del firmamento alcanzando su punto más alto al mediodía. Por otra parte, esta trayectoria circular aparente se mueve hacia puntos más altos en el firmamento a medida que el invierno se acaba y llega el verano; estos desplazamientos se pueden observar en el esquema de la Figura 2.1. En este esquema, durante el verano, el amanecer acontece más temprano, y el atardecer más tarde.

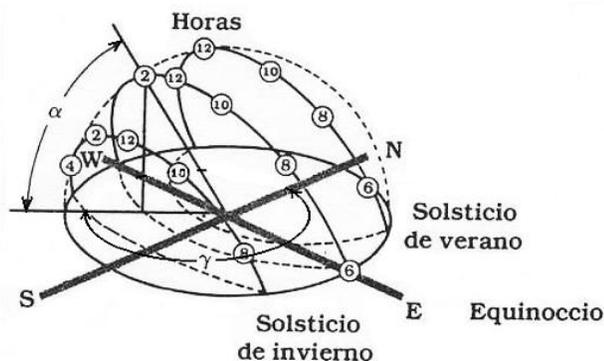


Figura 2.1 Movimiento del sol a lo largo del día.

De la misma manera que para determinar la posición de un punto cualquiera sobre un plano se utiliza un sistema de coordenadas cartesianas, para localizar con exactitud cualquier punto de la superficie terrestre, se emplea el sistema de coordenadas geométricas expresadas mediante una pareja de números denominados latitud y longitud, los cuales expresan mediciones angulares sobre la superficie de una esfera. La tierra tiene forma de esfera y como tal, lo mismo que los ángulos o los círculos, sus dimensiones se pueden medir en grados; así, representada como mapa, la tierra se divide en 360° . La ventaja que tiene emplear expresiones angulares, es que, el ángulo formado por dos rectas es independiente de la longitud de estas. Por ejemplo, en navegación astronómica no importa la distancia a que se encuentren los astros de referencia, importa el ángulo que forman respecto al lugar de observación.

Cualquier lugar de la tierra puede ser situado exactamente por la intersección de dos coordenadas que representan la latitud y la longitud de ese lugar, indicando cada número la cantidad de grados norte o sur desde el ecuador (latitud) y este u oeste desde el meridiano 0° (longitud). Así pues, latitud y longitud son expresiones angulares, indicadas en grados, minutos y segundos. En la Figura 2.2 se muestra dos esquemas representativos de los ángulos de latitud ϕ y longitud L [23].

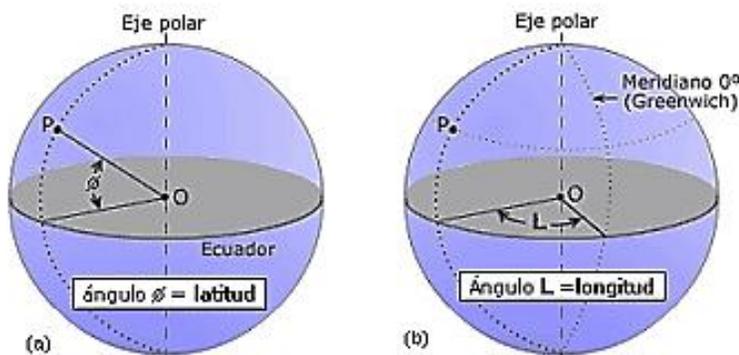


Figura 2.2 Muestra la latitud ϕ y longitud L .

Ángulo de declinación δ . La declinación 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 ecuatorial; en la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de ángulo de declinación solar hacia el norte.

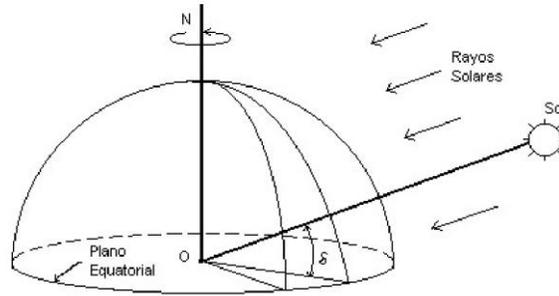


Figura 2.3 Ejemplo de ángulo de declinación δ .

La declinación es un índice del alejamiento que experimenta el sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador. Este parámetro, depende del día y del año, y puede calcularse con la expresión:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.1)$$

donde n es el día del año. Cada grado (indicado por el símbolo $^{\circ}$) se divide en 60 minutos (indicados por una comilla simple) y cada minuto en 60 segundos (simbolizados por una comilla doble).

Posición solar en relación a la tierra. La órbita de la tierra alrededor del sol es elíptica, el eje de rotación de la tierra (eje polar) está siempre inclinado un ángulo de 23.45° en relación con el eje elíptico, el cual es normal al plano elíptico. Mientras la tierra hace su rotación diaria y revolución anual, el sol también rota aproximadamente una vez en su propio eje cada mes terrestre.

Los círculos ártico y antártico y los trópicos de cáncer y capricornio en relación al sol en las cuatro estaciones se muestran gráficamente en la Figura 2.4. En el solsticio invernal (aproximadamente el 21 de diciembre), el polo norte está inclinado 23.5° fuera del sol; de esta manera todos los puntos sobre la superficie de la tierra al norte del círculo polar ártico están en completa oscuridad, considerando que todos los puntos al sur del círculo polar antártico reciban continuamente la luz del sol. En el solsticio de verano (aproximadamente el 21 de junio) y en los equinoccios de primavera y otoño (aproximadamente el 21 de marzo y el 21 de septiembre, respectivamente), el polo norte y sur son equidistantes del sol; así todos los puntos en la superficie de la tierra tienen 12 horas de luz del día y 12 horas de oscuridad.

Además, con esta expresión se puede generar una aproximación de la gráfica de la Figura 2.5 y de los valores indicados por la Tabla 2.1.

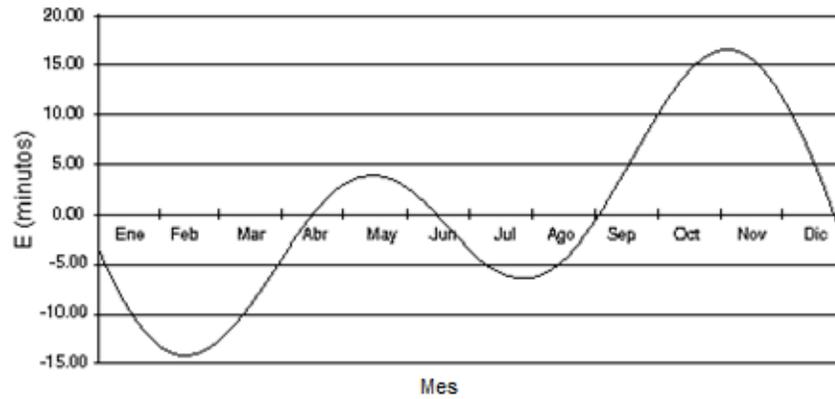


Figura 2.5 Ecuación del tiempo.

Tabla 2.1 Valores de E para distintos días del año.

Fecha		Corrección de tiempo		Fecha		Corrección de tiempo	
		min	seg			min	seg
Enero	1	-3	22	Julio	1	-3	23
	8	-4	4		8	-4	33
	15	-9	12		15	-5	28
	22	-11	28		22	-6	2
	29	-13	7		29	-6	11
Febrero	1	-13	38	Agosto	1	-6	7
	8	-14	23		8	-5	37
	15	-14	27		15	-4	38
	22	-13	54		22	-3	12
					29	-1	21
Marzo	1	-12	47	Septiembre	1	0	27
	8	-11	12		8	2	7
	15	-9	16		15	4	20
	22	-7	7		22	6	54
	29	-4	53		29	9	23
Abril	1	-3	57	Octubre	1	10	4
	8	-2	8		8	12	17
	15	0	13		15	14	8
	22	1	23		22	15	30
	29	2	35		29	16	16
Mayo	1	2	58	Noviembre	1	16	25
	8	3	32		8	16	15
	15	3	39		15	15	25
	22	3	20		22	13	54
	29	2	37		29	11	47
Junio	1	2	13	Diciembre	1	11	5
	8	1	5		8	8	19
	15	0	14		15	5	12
	22	-1	38		22	1	53
	29	-3	0		29	1	29

2.3.2. Ángulo horario ω

Por otra parte, el ángulo horario es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes, así $\omega=30^\circ$ a las 10:30 y $\omega=-15^\circ$ a las 13:00.

Una forma de calcular el ángulo horario ω , considerando que a las 6:00, 12:00 y 18:00 horas se tiene 90° , 0° y -90° respectivamente, es por medio de la siguiente expresión:

$$\omega = -(15^\circ/\text{hr}) \cdot (\text{hora solar}) + 180^\circ \quad (2.4)$$

2.3.3. Altura α y Azimut Solar γ

Dado que los movimientos de la tierra y el sol son relativos entre sí, en este análisis se supondrá que la tierra está fija en el espacio, que el sol describe un movimiento virtual alrededor de ésta, y que el origen del sistema de coordenadas se localiza en el lugar de interés situado en la tierra. Desde este punto de vista tolemeico, el sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste. En consecuencia, su posición en el firmamento queda descrita mediante dos variables angulares: la altura solar α y el azimut solar γ . Estos dos parámetros son muy importantes ya que estos definen los movimientos que realizará el seguidor solar de dos grados de libertad. Como se desprende de la Figura 2.6, la primera de estas variables define el ángulo que la visual al sol forma con el horizonte, en tanto que la segunda define la desviación que tienen los rayos del sol con respecto al norte verdadero. El cálculo preciso de estas variables depende fundamentalmente de tres parámetros: la latitud del lugar φ , la declinación δ y el ángulo horario ω [24].

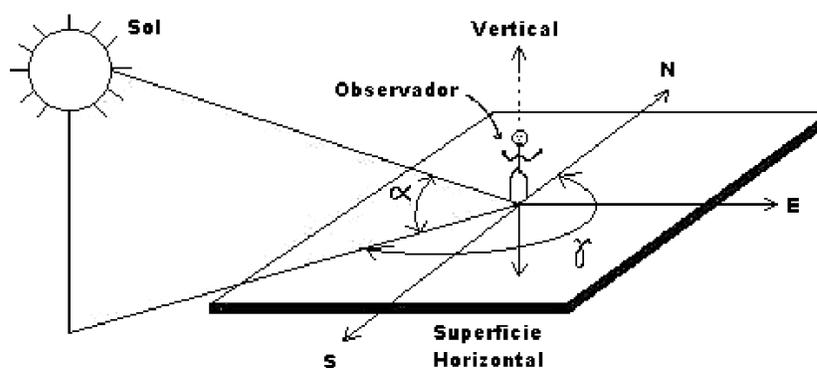


Figura 2.6 Ángulos de posición solar.

Una vez determinada la latitud del lugar φ , la declinación δ y el ángulo horario ω , la altura solar α y el azimut solar γ , se pueden calcular por medio de las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\sin \alpha = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (2.5)$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (2.6)$$

Finalmente, debe aplicarse una función inversa cuando el ángulo azimut es mayor a 90° , lo cual ocurre cuando la posición del sol rebasa el eje o plano vertical este-oeste, bajo el siguiente razonamiento:

$$\text{si } \cos \omega < \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \Rightarrow \gamma = \sin^{-1} \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}, \quad (2.7)$$

en caso contrario,

$$\cos \omega > \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \Rightarrow \gamma = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}, \quad (2.8)$$

por otro lado,

$$\gamma < 0, \Rightarrow \gamma = 360^\circ + \gamma \quad (2.9)$$

2.4. Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado con muy alta escala de integración (VSLI, Very Long Scale Integration) que internamente contiene una unidad central de procesos (CPU, Central Process Unit), memoria para código, memoria para datos, temporizadores, fuentes de interrupción y otros recursos necesarios para el desarrollo de aplicaciones, por lo general con un propósito específico [25].

Aunque un microcontrolador prácticamente incluye los elementos necesarios para ser considerado como una computadora en un circuito integrado, frecuentemente no es tratado como tal, ya que su uso típico consiste en el desempeño de funciones de “control” interactuando con el “mundo real” para monitorear condiciones (a través de sensores) y en respuesta a ello, encender o apagar dispositivos (por medio de actuadores) [25].

Los microcontroladores están enfocados a sistemas de propósito específico, sistemas que se crean con una funcionalidad única, la cual no cambia durante su vida útil, por ejemplo: las cajas registradoras, hornos de microondas, sistemas de control de tráfico, videojuegos, equipos de sonido, etc. [25].

2.4.1. Microcontroladores AVR de ATMEL®

Los microcontroladores AVR se basan en un núcleo cuya arquitectura fue diseñada por Alf-Egil Bogen y Vegard Wollan, estudiantes del Norwegian Institute of Technology, arquitectura que posteriormente fue refinada y desarrollada por la firma Atmel®.

El núcleo es compartido por más de 50 miembros de la familia, proporcionando una amplia escalabilidad entre elementos con diferentes recursos. Para la realización de esta tesis se empleará el dispositivo ATMega16®, cuyas principales características técnicas son [25]:

- **Memoria de código:** 16 kilobytes de memoria flash.
- **Memoria de datos:** 1 kilobyte de SRAM y 512 bytes de EEPROM.
- **Terminales para entrada/salida:** 32.
- **Frecuencia máxima de trabajo:** 16 MHz.
- **Voltaje de alimentación:** 2.7 a 5.5 Volts.
- **Temporizadores:** Dos de 8 bits y uno de 16 bits.
- **Canales PWM:** Cuatro.
- **Fuentes de interrupción:** Veintiuno.
- **Interrupciones externas:** Tres.
- **Canales de conversión Analógico/Digital:** Ocho de 10 bits.
- Reloj de tiempo Real
- Interfaz SPI Maestro/Esclavo.
- Transmisor/Receptor Universal Síncrono/Asíncrono (USART).
- Interfaz serial de dos hilos.
- Programación “In System”.
- Oscilador interno configurable.
- Watchdog timer.

El ATMega16® incluye 4 puertos de 8 bits cada uno. Como se observa en la Figura 2.7, en la mayoría de las terminales se incluyen una doble o triple función, esto significa que además de utilizarse como entrada o salida de propósito general, las terminales pueden emplearse con un propósito específico, relacionado con alguno de los recursos del microcontrolador [26].

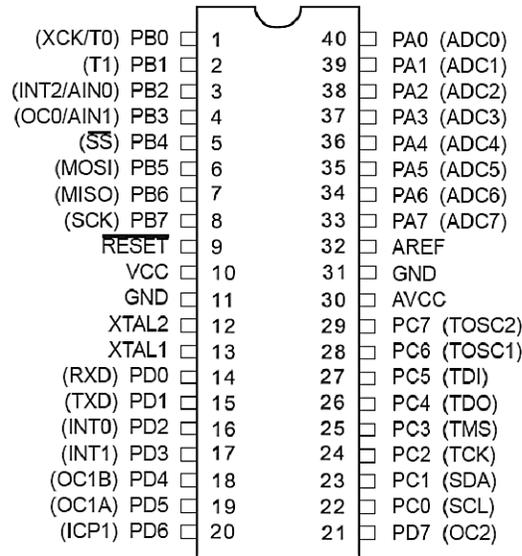


Figura 2.7 ATMega16®.

2.4.2. Circuito conversor de niveles RS-232 a TTL

Para transmitir a la computadora la información ya digitalizada se emplea la terminal TXD las características de la transmisión se especifican por programación. Los detalles de la programación y el protocolo que permiten la comunicación vía puerto serial con la computadora. Para desarrollar una interfaz serial, es necesario el uso de un dispositivo MAX-232 para la conversión de los niveles de voltaje TTL del microcontrolador a RS-232 de la PC.

El MAX232 dispone internamente de cuatro conversores de niveles TTL al bus standard RS-232 y viceversa, para comunicación serie como los usados en las computadoras. El circuito integrado lleva internamente dos conversores de nivel de TTL a RS-232 y otros dos de RS-232 a TTL con lo que en total podremos manejar cuatro señales del puerto serie del PC, por lo general las más usadas son; TX, RX, RTS, CTS, estas dos últimas son las usadas para el protocolo handshaking pero no es imprescindible su uso [27].

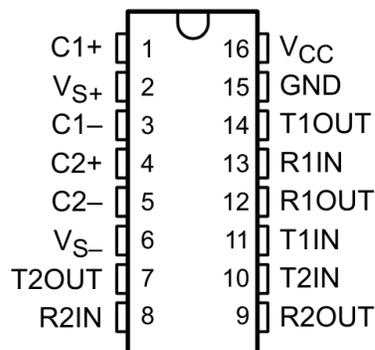


Figura 2.8 Dispositivo MAX-232.

2.5. Diseño asistido por computadora (CAD)

El software CAD puede ser usado de dos maneras generales, a través de “lenguajes de programación” y de “paquetes aplicativos”. El desarrollo a través de lenguajes de programación abiertos implica un amplio dominio, conocimiento de las tecnologías de exhibición, manejo del análisis matemático, geométrico y vectorial; en cambio el uso de paquetes aplicativos debido a su amplio desarrollo acelerado, su especialización en los diferentes campos de aplicación, su diseño de arquitectura abierta y su facilidad de uso han permitido su rápida aceptación y adopción [28].

El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto aún antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño [28]. Las características generales que deben tener el software CAD son:

- Simulaciones dinámicas con características especiales de visualización de procesos y resultados (representaciones foto realistas, tabulaciones, diagramas, giros, sonido, etc.).
- Capacidad del software de generar soluciones óptimas según los tipos de aplicación.
- Desarrollo de sistemas virtuales dentro de un entorno, permitiendo en muchos casos eliminar los prototipos físicos.
- Ingeniería concurrente On-Line.
- Arquitectura abierta del software (posibilidad de personalizar y generar programas complementarios).
- Ingeniería inversa (obtener un modelo CAD a partir del escaneado tridimensional de una pieza real).
- Intercambio estandarizado de formatos de archivos para el trabajo multiplataforma.
- Pantalla de trabajo (Workspace) compartidos con diferentes aplicaciones y programas adicionales (Plugins) [28].

2.5.1. SolidWorks®

El software SolidWorks® integra una amplia gama de herramientas de CAD mecánico, validación de diseños, gestión de datos de productos, comunicación de diseños y productividad de CAD en un único paquete fácil de utilizar. La construcción de un modelo de SolidWorks® por lo general comienza con un dibujo en 2D. El dibujo se compone de geometría como puntos, líneas, arcos, cónicas, etc. Las dimensiones se agregan al dibujo para definir el tamaño y la ubicación de la geometría. Las relaciones se utilizan para definir los atributos, tales como la tangente, el paralelismo, perpendicularidad y concetricidad. Las dimensiones en el dibujo se pueden controlar de forma independiente, o por las relaciones con otros parámetros dentro o fuera del dibujo. Los dibujos pueden ser creados a partir de piezas o conjuntos. Las vistas son generadas automáticamente a partir del modelo sólido, dimensiones y tolerancias pueden ser fácilmente añadidas a la elaboración, según sea necesario [29].

Para el modelado de piezas, dispone de la manera más fácil y rápida de crear y modificar la geometría de piezas en 3D llamada Instant3D. Con sólo hacer clic y arrastrar, puede crear y cambiar el tamaño de determinadas características de manera precisa, incluso las entidades de secciones. Mientras prepara el diseño para su producción, puede utilizar DimXpert para crear dibujos precisos en 2D (o datos sin dibujos) y asegurarse de que las piezas encajen una vez fabricadas [30].

SolidWorks proporciona las herramientas para crear ensamblajes a nivel CAD; a su vez ahorrar tiempo y el costo de los procesos de creación de prototipos físicos y refabricación. Puede acoplar componentes al seleccionar superficies, aristas, curvas y vértices individuales; crear relaciones mecánicas entre diversos componentes; llevar a cabo pruebas de interferencia, colisión y alineación de barrenos; y vincular el movimiento de poleas y ruedas de engranajes. También puede automatizar el ensamblaje de componentes de uso frecuente, el hardware adecuado y las funciones requeridas; y usar MateXpert para solucionar conflictos, como la restricción excesiva de un componente [30].

SolidWorks genera automáticamente una lista de materiales (LDM) completa a partir de su diseño. La lista de materiales es asociativa: cuando usted modifica el diseño, la LDM se actualiza de modo automático, y viceversa. Además, puede exportar los datos de la LDM a Excel, Intuitive ERP® y otras aplicaciones [30].

2.6. Motores de CD

Los motores de CD constan de un rotor y de un estator. Este último está compuesto generalmente de un imán permanente mientras que el rotor es un bobinado. El motor tiene dos contactos, los cuales al ser polarizados provocan el giro de este. La dirección del giro depende de la polaridad de la tensión y la velocidad depende de la magnitud de la tensión [31].



Figura 2.9 Motor de una unidad de discos flexibles.

El motor está formado por dos piezas fundamentales el rotor y el estator pero estas a su vez están constituidas por otras partes:

- **El rotor.** Constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga, está formado por:
- **Eje.** Formado por una barra de acero fresada. Imparte la rotación al núcleo, devanado y al colector.
- **Núcleo.** Se localiza sobre el eje. Fabricado con capas laminadas de acero, su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule.
- **Devanado.** Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura. Estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado.
- **Colector.** Está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas.
- **Estator.** Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio.
- **Armazón.** Tiene dos funciones primordiales servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente, para completar el circuito magnético.
- **Imán permanente:** Compuesto de material ferromagnético, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator. Su función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor, de modo que interactúe con el campo formado por el embobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos magnéticos [31].

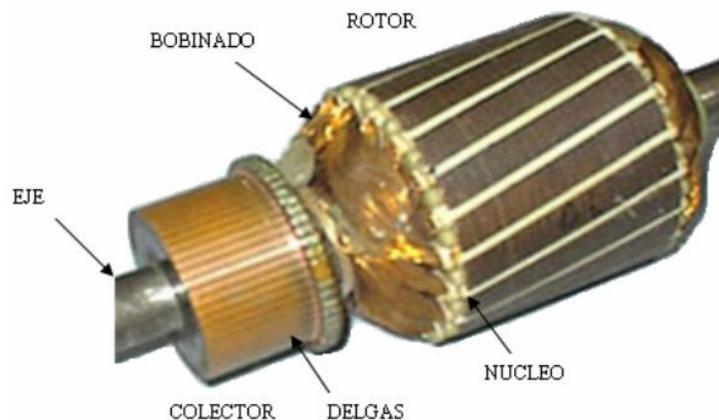


Figura 2.10 Rotor.

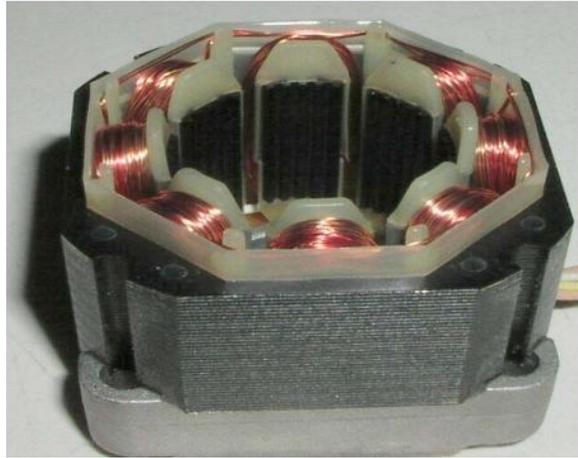


Figura 2.11 Estator del motor.

Un motor de CD es básicamente un transductor de par que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Algunas aplicaciones para los motores de CD:

- **Robots móviles.** Son máquinas dotadas de un sistema computacional que les permite percibir el entorno e interactuar con el mismo, en función de un programa que introducimos, que podemos modificar según nuestras necesidades.
- **Vehículos electrónicos.** Es una alternativa viable para el transporte de personas y bienes, estos vehículos obtienen su capacidad de movimiento por la energía eléctrica liberada por unas baterías o bien por una célula de combustible de hidrógeno.
- **Bomba hidráulica.** Es un sistema mecánico que puede formar parte de un sistema hidráulico el cual aprovecha la energía mecánica generada en energía hidráulica para elevar o mover el agua.
- **Ventiladores.** Es un dispositivo para agitar o mover aire o gas. Básicamente crea una corriente de aire moviendo unas aspas [32].

2.7. Sensores

Un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte magnitudes físicas como lo son la luz, magnetismo, presión, etc. en una señal eléctrica. Esto se realiza en tres fases:

- Un fenómeno físico a ser medido es captado por un sensor, y muestra en su salida una señal eléctrica dependiente del valor de la variable física.
- La señal eléctrica es modificada por un sistema de acondicionamiento de señal, cuya salida es un voltaje.
- El sensor dispone de una circuitería que transforma y/o amplifica la tensión de salida, la cual pasa a un conversor A/D, conectado a un PC. El convertidor A/D transforma la señal de tensión continua en una señal discreta [33].

Algunos de los parámetros a considerar en las mediciones cuando se utilizan sensores son:

- **Rango:** Valores máximos y mínimos para las variables de entrada y salida de un sensor.
- **Exactitud:** La desviación de la lectura de un sistema de medida respecto a una entrada conocida. El mayor error esperado entre las señales medida e ideal.
- **Repetitividad:** La capacidad de reproducir una lectura con una precisión dada.
- **Reproducibilidad:** Tiene el mismo sentido que la repetitividad excepto que se utiliza cuando se toman medidas distintas bajo condiciones diferentes.
- **Resolución:** La cantidad de medida más pequeña que se pueda detectar.
- **Error:** Es la diferencia entre el valor medido y el valor real.
- **No linealidades:** La desviación de la medida de su valor real, supuesto que la respuesta del sensor es lineal. Las no linealidades que se presentan típicamente son saturación, zona muerta e histéresis.
- **Sensibilidad:** es la razón de cambio de la salida frente a cambios en la entrada.
- **Excitación:** Es la cantidad de corriente o voltaje requerida para el funcionamiento del sensor.
- **Estabilidad:** Es una medida de la posibilidad de un sensor de mostrar la misma salida en un rango en que la entrada permanece constante.
- **Ruido** [33].

2.7.1. Sensores de posición

Se usan para la determinación de desplazamientos lineales o angulares. Eléctricamente se cumple la relación:

$$\frac{V_{BC}}{V_{AC}} = \frac{R_{BC}}{R_{AC}} \quad (2.11)$$

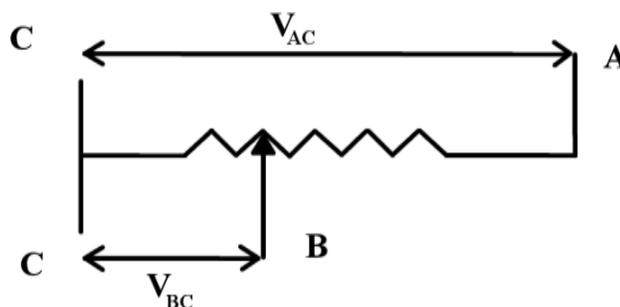


Figura 2.12 Diagrama esquemático de potenciómetro.

Este potencial puede medirse y disponer de un sistema de calibrado de manera que por cada potencial se obtenga proporcionalmente una distancia de desplazamiento, una ventaja es su fácil uso y precio, su desventaja es que deben estar fijados al dispositivo cuyo desplazamiento se quiere medir y precisión limitada [33].

2.8. Manejador de potencia de un motor de CD

El manejador de potencia es un sistema integrado también llamado puente H, que es básicamente un arreglo de cuatro interruptores acomodados de la siguiente manera:

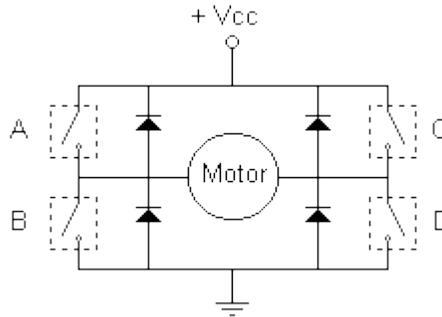


Figura 2.13 Arreglo de interruptores para un puente H.

Entre las aplicaciones típicas de un puente H, incluye manejo de cargas inductivas como solenoides, elevadores, motores de corriente directa y motores a pasos, emplea internamente los transistores de potencia y utiliza un buffer para señales de bajo nivel [31].

El LMD18200 es un puente H diseñado para aplicaciones de control de movimiento. El dispositivo se construye utilizando un proceso que combina bipolar y circuitos CMOS de control con dispositivos DMOS de potencia en la misma estructura monolítica. Ideal para la conducción de corriente continua y motores a pasos, la capacidad para LMD18200 corrientes de pico de salida de hasta 6A. Un circuito innovador que facilita la detección de baja pérdida de la corriente de salida se ha implementado [34].

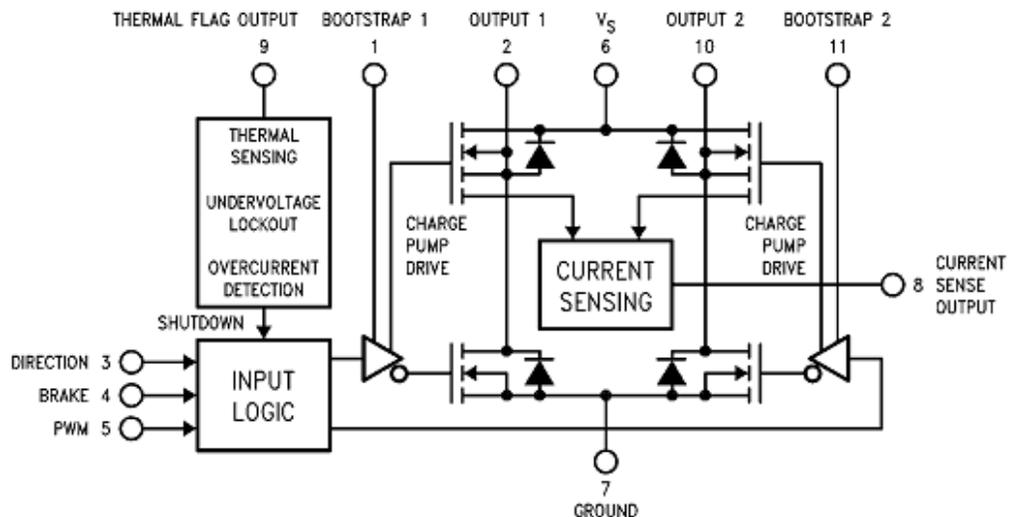


Figura 2.14 Diagrama a bloques del LMD18200.

2.9. Reductores de engranaje

Los engranajes tienen la función de transmitir una rotación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constante. Se denomina Relación de Transmisión (i) al cociente entre la velocidad angular de salida (velocidad de la rueda conducida) y la de entrada ω_1 (velocidad de la rueda conductora):

$$i = \omega_2 / \omega_1, \quad (2.10)$$

dicha relación puede tener signo positivo si los ejes giran en el mismo sentido o signo negativo - si los giros son de sentido contrario-. Del mismo modo, si la relación de transmisión es mayor que 1 ($i > 1$) se supondrá el empleo de un mecanismo multiplicador, y si es menor que 1 ($i < 1$) que suele resultar lo más habitual, supondrá el empleo de un mecanismo reductor, o simplemente de un reductor. Es claro que la obtención de una relación de transmisión de carga entre dos ejes, no es algo exclusivo de los engranajes, ya que lo mismo puede obtenerse con poleas o cadenas [35].

Los engranajes, por otro lado, poseen varias ventajas competitivas que los hacen óptimos para transmitir movimiento rotatorio entre dos ejes con una relación de transmisión constante, tales como su relativa sencillez de fabricación, su capacidad para transmitir grandes potencias, la gran variedad de opciones constructivas, etc. [35].

Los engranajes pueden clasificarse de diferentes maneras dependiendo de:

- La distribución espacial de los ejes de rotación.
- La forma de dentado.
- La curva generatriz de dientes.

Una forma común de clasificar a los engranajes es a partir de la distribución espacial de los ejes de rotación, también denominados axoides. En la Figura 2.15 se puede apreciar un esquema muy general de distribución de axoides de rotación y sus respectivas direcciones. Dadas las direcciones x_1 y x_2 se puede trazar el vector opuesto a ω_1 , o sea $-\omega_1$ de manera que el sistema queda trabado con un movimiento resultante $\omega_2 - \omega_1$, cuyo eje instantáneo de rotación y deslizamiento dará el tipo de movimiento entre los dos ejes [35].

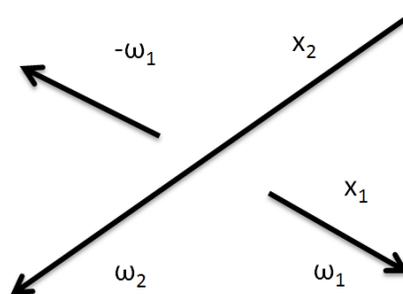


Figura 2.15 Distribución de los ejes de rotación y sus direcciones.

Según que los ejes sean paralelos o se corten o se crucen corresponderán a las siguientes subclases de engranajes Cilíndricos, Cónicos o Hiperbólicos, respectivamente:



Figura 2.16 Tipos de engrane [35].

Engranajes Cilíndricos:

- Dientes Rectos Exteriores (Figura 2.16 a)
- Dientes Rectos Interiores (Figura 2.16 b)
- Dientes Helicoidales Exteriores (Figura 2.16 c)
- Dientes Helicoidales Interiores (Figura 2.16 d)
- Dientes Rectos con cremallera (Figura 2.16 e)

Engranajes Cónicos:

- Dientes Rectos (Figura 2.16 f)
- Dientes Helicoidales (Figura 2.16 g)

Engranajes Hiperbólicos:

- Sin Fin-Corona (Figura 2.16 h)

- Hipoidales (Figura 2.16 i)
- De dientes helicoidales y ejes cruzados (Figura 2.16 j)

Engranajes no circulares:

- Ruedas dentadas para fines específicos similares a los de las levas o los de ciertos mecanismos (Figura 2.16 k)

Capítulo III. Sistema de Seguimiento Fotovoltaico

Como se especificó anteriormente en la sección 2.2. un sistema de seguimiento solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma perpendicular a los rayos solares para un mejor aprovechamiento de la radiación solar. Para ello hay tres tipos de sistemas: los fijos, con un grado de libertad y con dos grados de libertad. Estos últimos son los que permiten incrementar la eficiencia energética hasta en un 35%.

Durante el día los ángulos de posicionamiento (azimut y altura solar) van variando, por lo que optar por un sistema de seguimiento a un eje no resulta óptimo ya que los rayos solares no llegarían al panel fotovoltaico de forma perpendicular y la energía eléctrica generada sería menor. En la sitio web “Sun path chart programa” se desarrolló una software el cual permite calcular el desplazamiento de los ángulos de altura solar y azimut durante el día que se desee, así, como la hora en la que se encontrará el punto de máxima irradiación solar como se muestra en la Figura 3.1 [36].

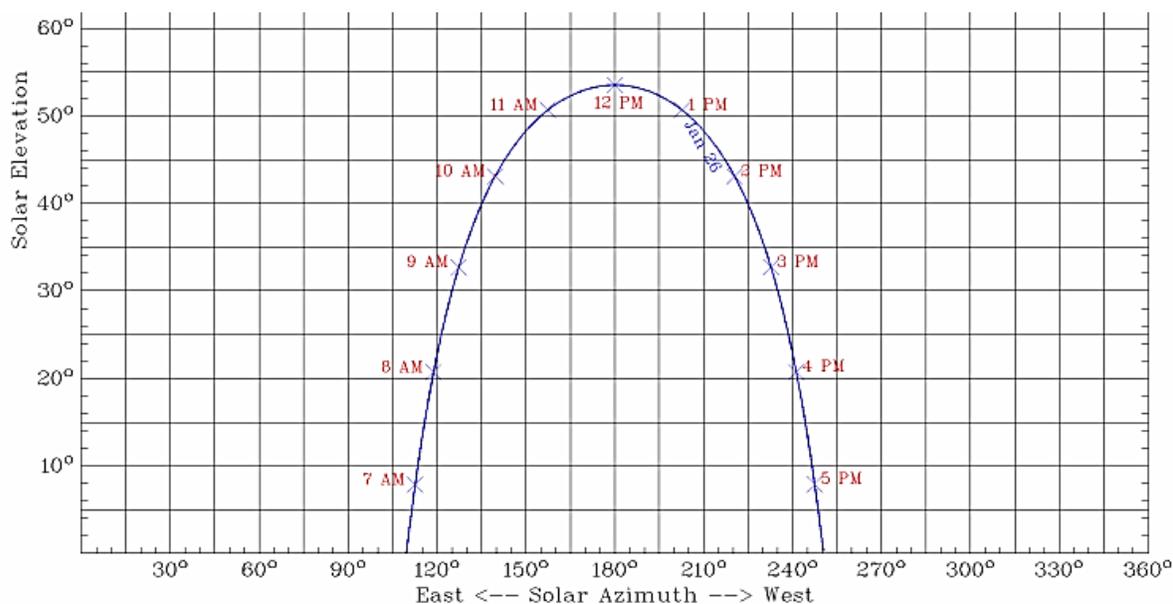


Figura 3.1 Gráfica de los ángulos de azimut y altura solar para el 26 de Enero del 2011.

Es por estas razones y a que el desplazamiento de los ángulos va variando durante el día se decide fabricar un SSFA a dos ejes.

3.1. Sistemas de seguimiento solar que existen en el mercado

Actualmente existen diferentes sistemas de seguimiento solar, ya que mejoran la energía solar captada por un panel durante el día que a su vez permite mayor conversión de energía solar a eléctrica. En la Tabla 3.1 se muestran algunos sistemas que se muestran en el mercado.

Tabla 3.1 Ejemplos de sistemas de seguimiento solar en el mercado.

Empresa	Descripción	Figura
WATTSUN	Sistema de seguimiento con un grado de libertad, soporta hasta 6 módulos fotovoltaicos (no incluidos). Precio: \$6,250.00 USD.	 AZ-225
SAT CONTROL	Sistema de seguimiento a dos ejes, soporta dos módulos fotovoltaicos (no incluidos), software y hardware limitados. Interfaz USB. Precio: 511.00 €	
ALIBABA	Sistema de seguimiento a dos ejes, soporta dos módulos fotovoltaicos (no incluidos). Fuente de 24V 3ª DC. Interfaz RS485 Precio: \$2,500.00 USD	
EBAY	Sistema de seguimiento a dos ejes incluye dos módulos de 125 W c/u Precio: \$8,900.00 USD	

3.2. Diseño mecánico

En lo que se refiere a la estructura mecánica del sistema, se emplea el software SolidWorks 2010[®], principalmente para la elaboración del diseño y el análisis de fuerzas del SSFA. Para ello se realiza el diseño de cada una de las partes de forma independiente con base en

las medidas de croquis bidimensionales, además del peso y dimensiones del panel fotovoltaico y de los motores de CD como se puede apreciar en las Figura 3.2 y Figura 3.3.

En la Figura 3.4 se muestra la forma en la que se ensamblaron todas las piezas que conforman el sistema mecánico. Lo anterior a fin de poder realizar las simulaciones necesarias para el cálculo del torque de los motores.

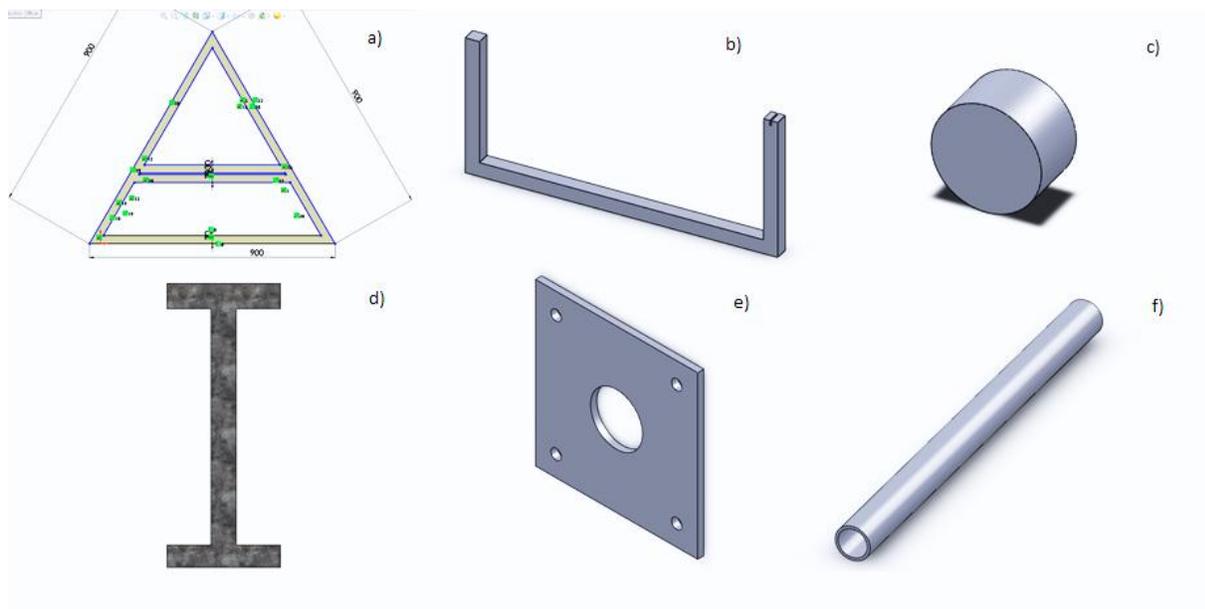


Figura 3.2 a) Base del tripie, b) Soporte balancín, c) Perno, d) Estructra I para el panel solar, e) Base motor f) Soporte tripie.

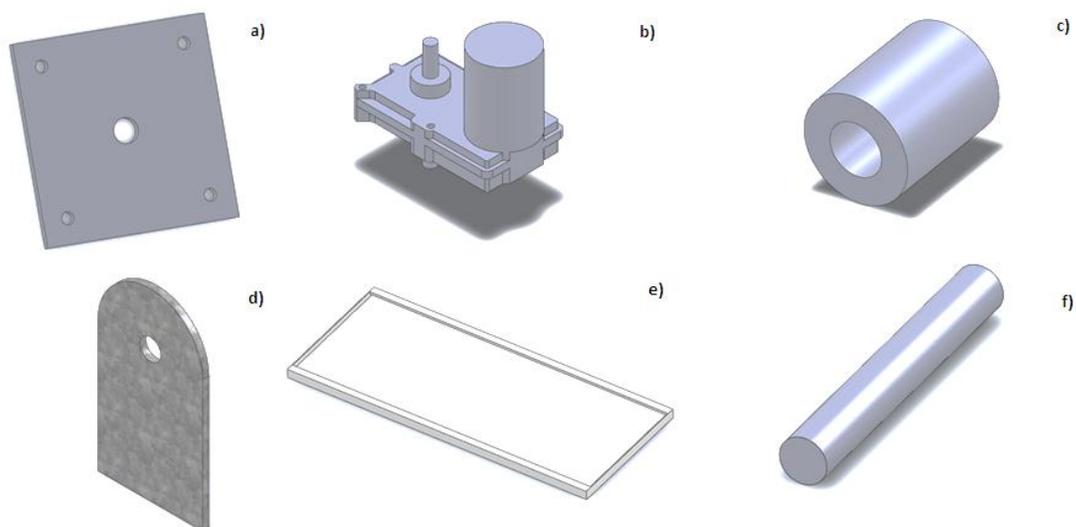


Figura 3.3 a)Base sensor, b) Motor de CD, c) Cople, d) Soporte panel, e) Panel solar, f) Soportes sensor.



Figura 3.4 Ensamble final del SSFA en Solidworks

Una vez realizado ensamble de las partes del SSFA en SolidWorks[®], se procedió a la simulación para calcular el torque requerido para el movimiento de los dos ejes del sistema. Para ello se emplea la herramienta SolidWorks Motion[®] la cual calcula el torque necesario para realizar el movimiento deseado, con base en los parámetros de movimiento tales como: la velocidad (rpm), el tiempo de simulación (seg) y el lugar donde se aplicará la fuerza para que el motor realice el movimiento del panel fotovoltaico. A fin de obtener resultados de simulación adecuados se configuró el software como se muestran en las Figura 3.5 y Figura 3.6, con respecto al eje que corresponde al ángulo de altura solar.

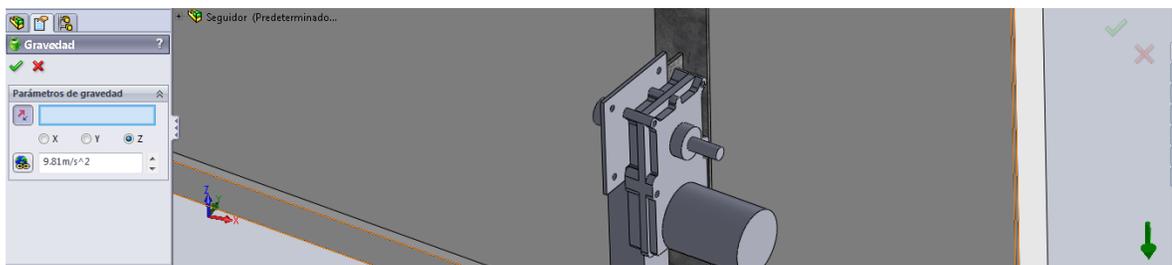


Figura 3.5 Configuración de la fuerza de gravedad.

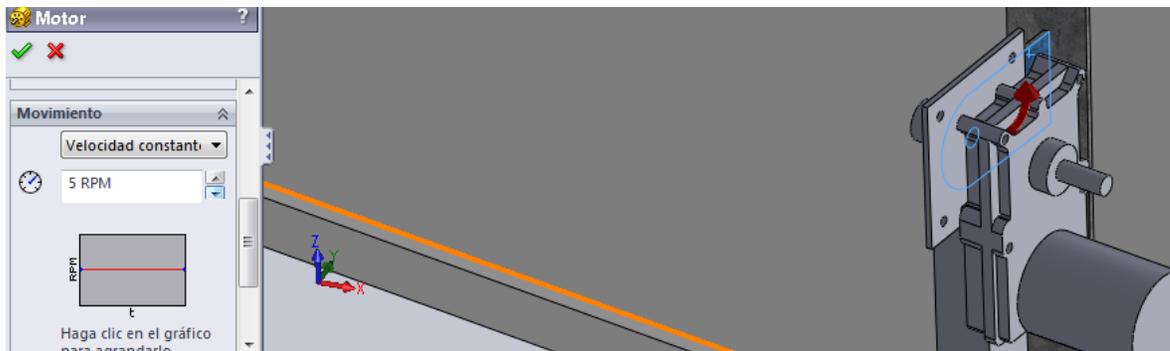


Figura 3.6 Configuración del motor.

Después de configurar los parámetros necesarios se procede a simular el movimiento y los datos que se obtienen son los presentados en la Figura 3.7. En dicha figura puede apreciarse el torque necesario en unidades de N-m.

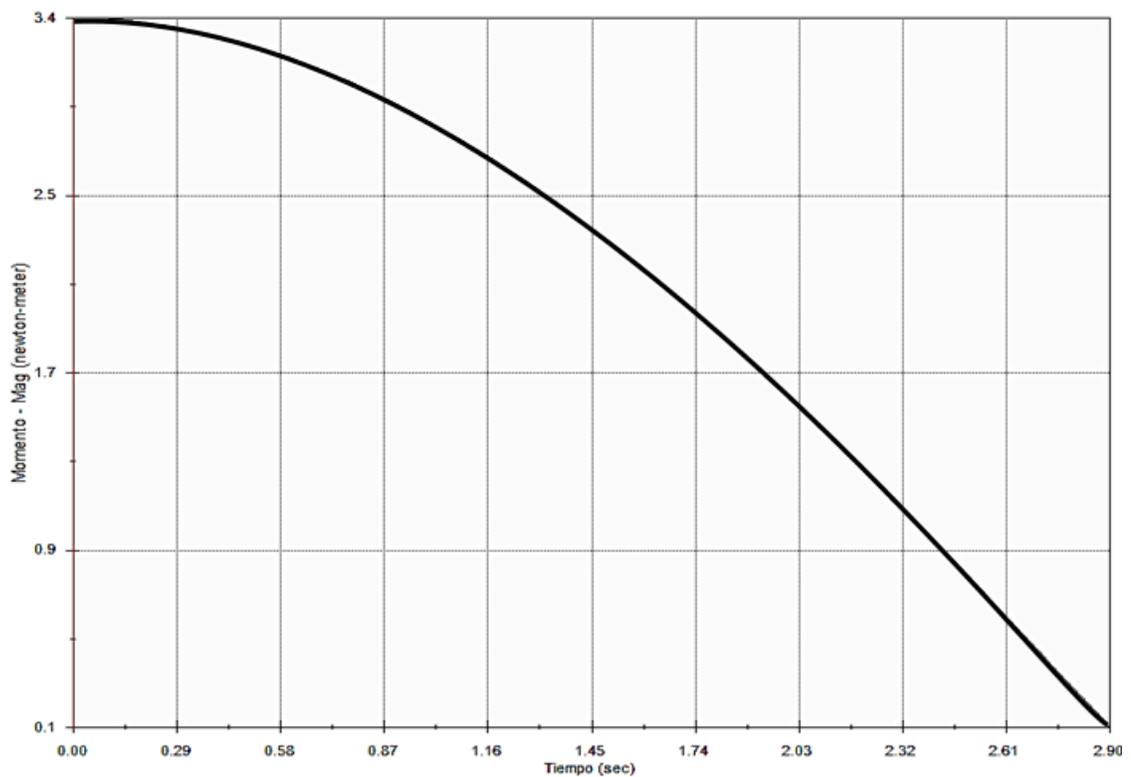


Figura 3.7 Gráfica del torque necesario para el movimiento del panel fotovoltaico para el ángulo de altura solar.

Siguiendo un procedimiento similar al anterior, en la Figura 3.8 se muestra el torque requerido para el eje que corresponde al ángulo de azimut.

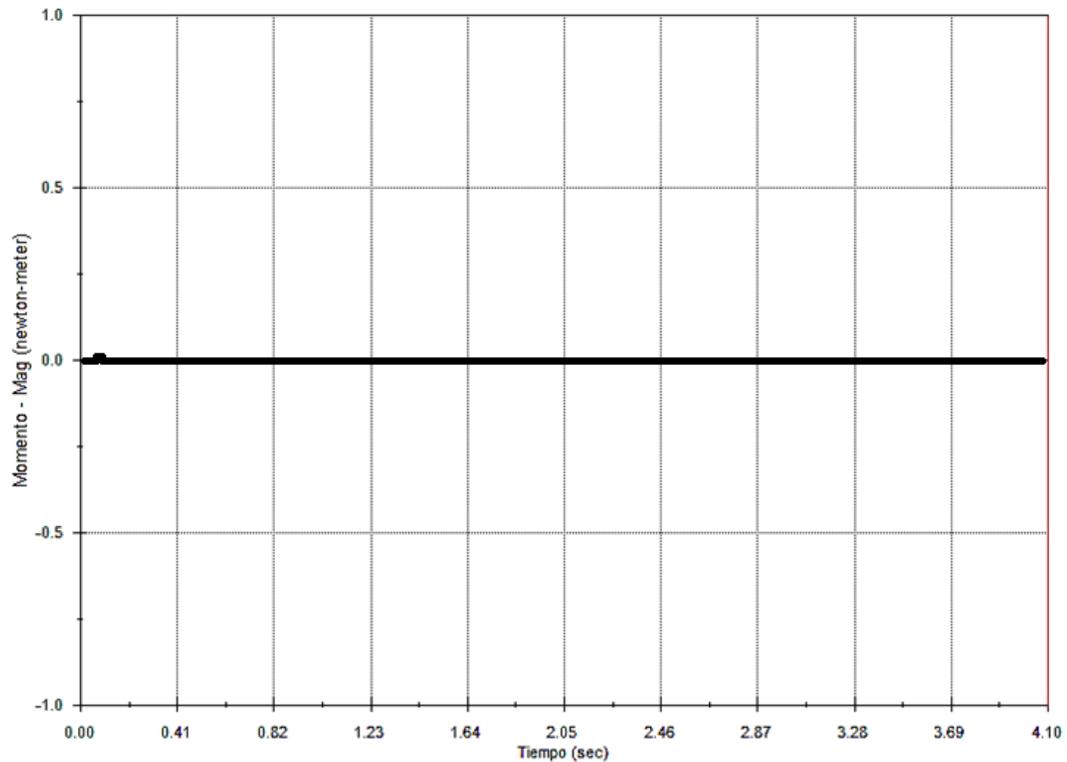


Figura 3.8 Gráfica del torque necesario para el movimiento del panel fotovoltaico para el ángulo de azimut.

Con base a ambos resultados se seleccionaron los motores necesarios para producir el movimiento deseado. Para ello se consultaron los catálogos diversos fabricantes de motores. Las características de los motores elegidos se muestran en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.9 puede apreciarse una imagen de dichos motores.

Tabla 3.2 Especificaciones del motor de CD.

	Requerida	Motor
Fuerza	3.4 N-m	5.649 N-m
Velocidad	S/E	6.5 rpm
Voltaje	S/E	24 V
Corriente	< 1 A	580 mA



Figura 3.9 Fotografía del motor de CD.

3.2.1. Construcción del sistema mecánico.

La construcción de las partes mecánicas se realizó en el taller de metal-mecánica de la UTM. Como primer paso se fabrican las piezas para el soporte del panel fotovoltaico como se muestra en la Figura 3.10, las cuales se unen con soldadura eléctrica debido a que será el soporte para el panel y el grosor de la solera impide que haya una deformación en las piezas.



Figura 3.10 Fabricación y ensamble del soporte para el panel fotovoltaico.

Una vez terminados los soportes del panel, se procede con el balancín que permite que el panel fotovoltaico se posicione en un ángulo desde 0° hasta los 180° dependiendo de los parámetros calculados como se muestra en la Figura 3.11 las partes fabricadas y el ensamble del balancín en la Figura 3.12.



Figura 3.11 Piezas del balancín para el panel fotovoltaico.



Figura 3.12 Balancín.

Para fijar los motores y permitir el movimiento necesario para el prototipo se cortan y perforan tres piezas como se muestra en la Figura 3.13, donde se colocarán y atornillarán los motores que permitirán girar el panel fotovoltaico en el ángulo deseado.



Figura 3.13 Piezas para fijar los motores.

Una vez cortadas las piezas, se procede a soldar una de las piezas al balancín como se puede apreciar en la Figura 3.14, lo cual permitirá colocar el motor y atornillar para que el eje del motor sea ensamblado con los soportes del panel y este permita el movimiento del panel fotovoltaico de los 0° hasta los 180° .



Figura 3.14 Balancín con el sujetador.

Para la realización de los coples se utilizó el torno con tubo de acero galvanizado como se muestra en la Figura 3.15. Es necesario fabricar cuatro coples, debido a que su función principal es unir los ejes de los motores a los sensores de posición, para conocer la posición actual del SSFA. En la Figura 3.16 se puede apreciar los coples terminados.



Figura 3.15 Fabricación del cople en el torno.



Figura 3.16 Coples finales.

Se fabrican las piezas mostradas en la Figura 3.17 que serán soldadas a los soportes del panel fotovoltaico como se muestra en la Figura 3.18. Posteriormente uno de los coples será unido a uno de los soportes del panel para permitir el movimiento del panel fotovoltaico como se muestra en la Figura 3.19.

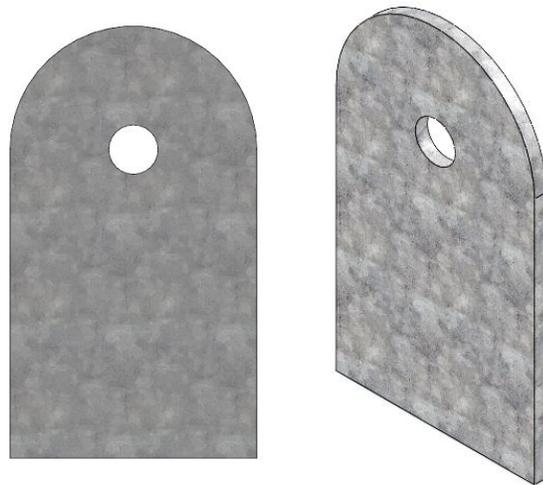


Figura 3.17 Piezas a fabricar



Figura 3.18 Piezas soldadas al soporte para el panel fotovoltaico.



Figura 3.19 Cople soldado a uno de los soportes del panel fotovoltaico.

Uno de los coples es soldado en el centro de gravedad, ubicado en la parte baja del balancín, para que el motor mueva el panel fotovoltaico junto con el balancín y permita posicionarse en uno de los ángulos deseados como se muestra en la Figura 3.20.



Figura 3.20 Cople soldado al balancín.

Para la realización de la base del prototipo se cortaron cinco piezas de las mismas dimensiones, como se muestra en la Figura 3.21, y se soldaron como se aprecia en la Figura 3.22. Debido a que su principal función es mantener rígido el sistema durante las pruebas, una vez unidas se soldó un tubo de un metro de largo y 7.5 cm de diámetro para que el sistema tuviera la altura necesaria para su fácil instalación, manipulación de sensores, motores, cableado y colocación del panel fotovoltaico como se aprecia en la Figura 3.23.



Figura 3.21 Piezas de la base del sistema

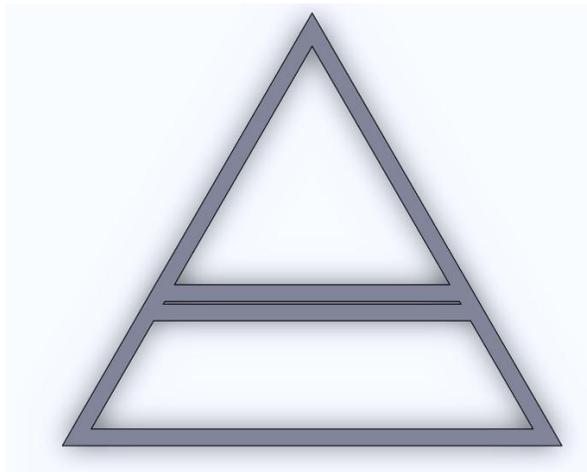


Figura 3.22 Base del sistema.



Figura 3.23 Base del prototipo.

Se utilizaron las piezas de la Figura 3.13 para soldarlas a la base del prototipo; y sujetar uno de los motores a la base del prototipo y este pueda colocar el sistema en el ángulo de azimut, acoplar el sensor con el motor y al final unirlo con el balancín antes mencionado. En la Figura 3.24 y Figura 3.25 se muestra la base final donde se fijara al motor.



Figura 3.24 Soporte para el motor (Angulo Azimut).



Figura 3.25 Base final.

Una vez construidas y ensambladas las partes del sistema se procede a colocar los motores, el primero en la base del sistema junto con uno de los coples y un sensor que nos permitirá conocer el ángulo actual del sistema. Una vez sujetado el motor se acopla el balancín en el eje del motor como se muestra en la Figura 3.26 y le permitirá posicionarse en el ángulo de azimut calculado.



Figura 3.26 Ensamble del motor con la base y el balancín.

Para el segundo motor se atornilló al balancín soldado con una pieza de metal que sujeta a uno de los motores como se muestra en la Figura 3.14, en uno de los extremos del eje del motor se le colocó un cople para unir un sensor y en el otro extremo el soporte de panel que se unió un cople para el movimiento del ángulo de altura α como se muestra en la Figura 3.27.



Figura 3.27 Ensamble del motor al balancín.

Como paso final se sujeta el panel fotovoltaico a los soportes, atornillándolos a la estructura del panel, para que el último motor ensamblado controle el movimiento del panel en el ángulo necesario. El ensamble final es el mostrado en la Figura 3.28.



Figura 3.28 Ensamble final del prototipo de SSFA.

3.3. Diseño electrónico.

3.3.1. Análisis de los requerimientos

Para realizar la codificación adecuada en el ATmega16 es necesario tener en cuenta las necesidades que deberá cubrir el SSFA, así, el código a desarrollar en el microcontrolador debe cumplir con las siguientes características:

- Configurar los convertidores análogo/digital para leer las señales de los sensores.
- Definir una conversión analógica/digital en el modo de Carrera Libre, tal que la conversión se esté llevando a cabo en todo momento automáticamente.
- Configurar la USART que posee el microcontrolador ATmega16 para implementar el protocolo de comunicación RS-232, y a su vez estas señales sean enviadas desde el microcontrolador a la PC y viceversa.
- Interpretar los datos enviados desde la PC para los nuevos ángulos de posicionamiento del SSFA.
- Implementar un controlador PID digital para posicionamiento de los motores.
- Generar dos señales PWM para controlar la velocidad de los motores, así como un bit de salida para el sentido de giro de los motores.

El primer requerimiento plantea el hecho de utilizar el convertidor analógico/digital que posee el microcontrolador ATmega16. Para poder utilizar este convertidor es necesario configurar los registros ADMUX y ADCSRA. El ADMUX es el registro de selección del multiplexor del ADC el cual deberá ir cambiando entre las tres señales que se estarán monitoreando continuamente, que son el voltaje de los dos sensores y del panel fotovoltaico.

El segundo punto se refiere al hecho de definir la conversión analógica/digital continua, lo cual es necesario para que en todo momento el sistema se encuentre leyendo la señal proveniente del SSFA, la conversión sea disparada por un evento de otro recurso del microcontrolador al finalizar uno de los convertidores análogo/digital.

Para el tercer punto la transmisión inicia cuando se escribe en el registro UDR. Al finalizar la transmisión se pone en alto al bit TXC (Bit 6 del registro UCSRA). Este bit puede monitorearse por software o configurar al recurso para generar una interrupción. La recepción debe habilitarse para que en cualquier momento pueda recibirse un dato, el cual será alojado en el registro UDR. Cuando esto ocurra, será puesto en alto el bit RXC. Al configurar la USART es necesario definir si la comunicación a implementar será síncrona o asíncrona. En este trabajo el protocolo es configurado con los siguientes parámetros:

- Velocidad (bits por segundo).
- Número de bits de datos: 5, 6, 7, 8 o 9.
- Bit de paridad: Par o impar.
- Número de bits de paro.
- Paridad.

Para el cuarto punto la señal será codificada de un mapa de bits para caracteres predefinidos en el ATMega16 en código ASCII para la DDRAM. En el quinto punto se implementará un PID basándose en un historial de los valores obtenidos durante el posicionamiento de uno de los ángulos, las ganancias del compensador serán enviadas a través de la PC para su fácil sintonización. En el punto seis las señales PWM se generan con los modos de operación de los temporizadores, en sus respectivas terminales OCX. La frecuencia de la señal de salida se puede cambiar al usar el pre-escalador. La modulación del ancho de pulso se realiza al modificar el valor del registro OCRX. Para el punto siete se pondrán en alto dos de los pines de salida del puerto C para controlar el giro del motor según se requiera.

3.3.2. Configuración de registros

El programa se realiza en lenguaje C y la forma de configurar los registros es asignándole a cada uno cierto valor en formato hexadecimal, de acuerdo a los parámetros que se vayan a utilizar, los recursos y las necesidades del sistema. Cada registro es de 8 bits, y cada bit indica una acción o una característica que deberá tener el recurso empleado. Para cada puerto del ATMega16 se manejan los siguientes registros:

- Un registro de escritura, conectado a la terminal del puerto (PORTx). En este se escribe, cuando el puerto está configurado como salida.
- Un registro de lectura/escritura que define la dirección del puerto (DDRx). Las direcciones pueden configurarse de manera independiente, para cada terminal: 1 para salida y 0 para entrada.
- Un registro para las señales PWM para controlar la velocidad de los motores.
- Un registro que deberá ir cambiando durante la conversión de los puertos análogo/digital.
- Un registro para las interrupciones para que el sistema cuente con un sistema de arranque y uno de paro de emergencia.

3.3.3. Cuerpo del programa

- El cuerpo principal del programa está en un ciclo infinito esperando a que se active la señal que dé inicio al sistema, una vez recibida la señal de arranque el sistema está esperando una señal del puerto RS-232 con los ángulos de posicionamiento y las ganancias de sintonización, un vez que recibe esos datos el programa procede a interpretarlos para su manipulación dentro del microcontrolador, y así actualizar los nuevos ángulos en los que se posicionará el SSFA.
- Una vez leídos los datos nuevos mandados desde la PC, el microcontrolador genera la señal PWM para el primer motor y el bit de sentido de giro para posicionar el SSFA en el ángulo de azimut. Una vez finalizado el primer ángulo el sistema se posiciona en el ángulo de altura α , generando una segunda señal PWM y otro bit para el sentido de giro del segundo motor.

- Durante el posicionamiento de los motores se configuran los convertidores analógico/digital que van monitoreando que el ángulo deseado sea alcanzado además del voltaje generado por el panel fotovoltaico.
- Para mejorar el posicionamiento del SSFA se implementa una función PID. En el apéndice A se muestra el código a utilizar.

El funcionamiento del código implementado se simula en el software Proteus, este software permite implementar el ATmega16, cargar el código, así como otros dispositivos electrónicos, para esta simulación en particular se usaron potenciómetros que simularon la posición del SSFA, osciloscopio, VIRTUAL TERMINAL simuló la comunicación del puerto serie de la PC con el microcontrolador, LOGICPROBE los switch de inicio y el paro de emergencia como se muestra en la Figura 3.29.

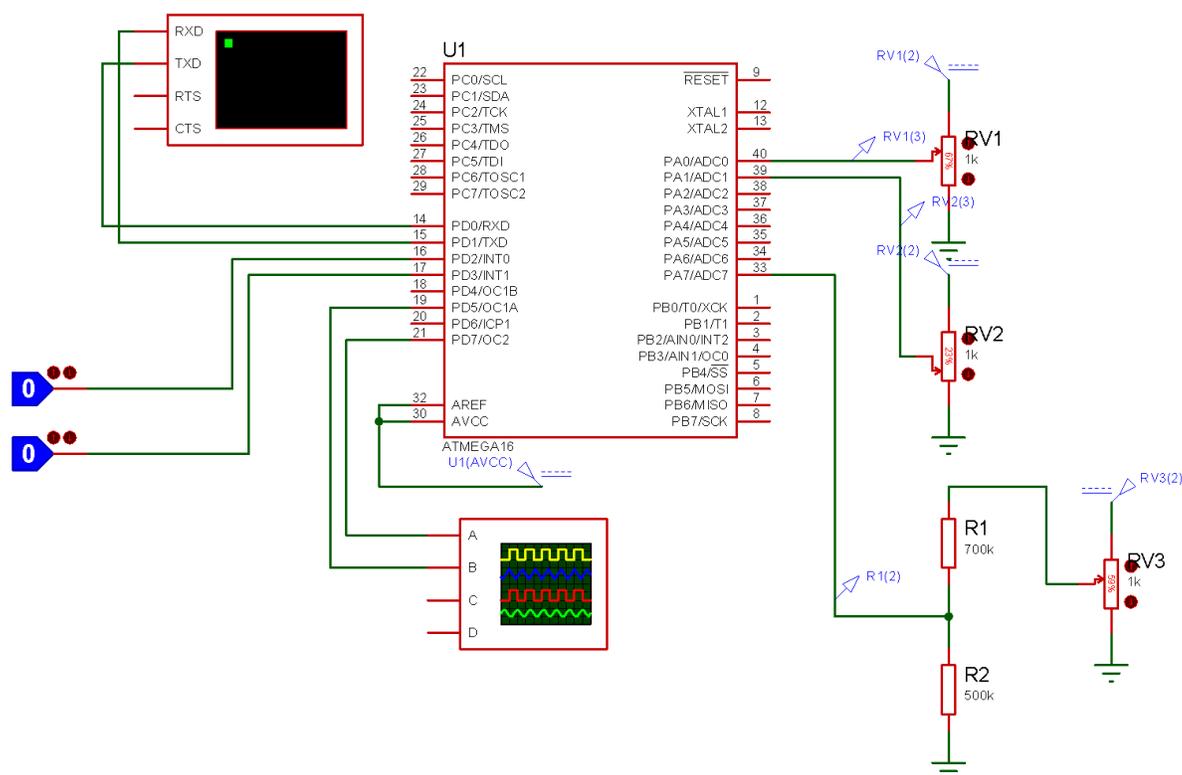


Figura 3.29 Simulación del código del ATmega16.

3.3.4. Circuito electrónico de potencia

Para el manejo de la potencia de los motores, se decide emplear dos puentes H LMD18200 para controlar el sentido de giro y la velocidad del motor, debido a que este dispositivo soporta hasta una corriente de 3 amperes, un amplio rango de voltaje y contiene una protección contra cortocircuitos; para su configuración se emplea el diagrama esquemático mostrado en la Figura 3.30.

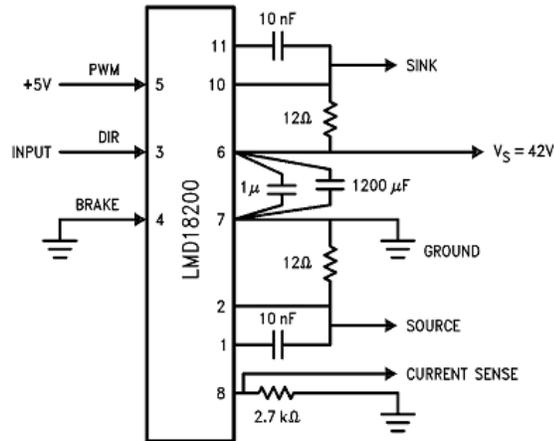


Figura 3.30 Diagrama esquemático del LMD18200.

3.3.5. Circuito de interfaz serial

Para que el MAX-232 funcione correctamente deberemos de colocar unos capacitores externos, todo esto lo podemos ver en la Figura 3.31 en la que solo se han cableado las líneas TX y RX que van conectados a la entrada del puerto RS-232.

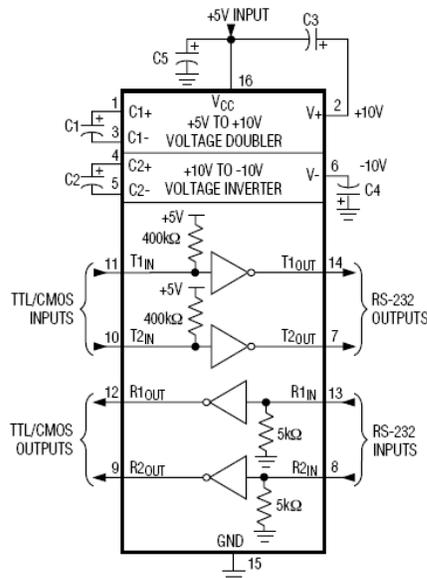


Figura 3.31 Diagrama esquemático del MAX-232.

Para la comunicación del microcontrolador con la PC, se utiliza un cable convertidor USB a Serial debido a la a que los equipos nuevos ya no incluyen el puerto RS-232.



Figura 3.32 Convertidor USB a Serie.

3.3.6. Sensores de posición

Los sensores para monitorear la posición del SSFA son los potenciómetros de precisión 6187R10KL1.OST. Estos potenciómetros presentan un comportamiento lineal y con un fin de carrera de 320 grados, lo cual simplifica el cálculo del ángulo teniendo como referencia el voltaje de salida de éstos.



Figura 3.33 Sensores de posición.

El ensamble final es mostrado en el Apéndice B el cual muestra cada uno de los componentes electrónicos que van conectados a la PC por medio del puerto RS-232, para controlar el movimiento del SSFA.

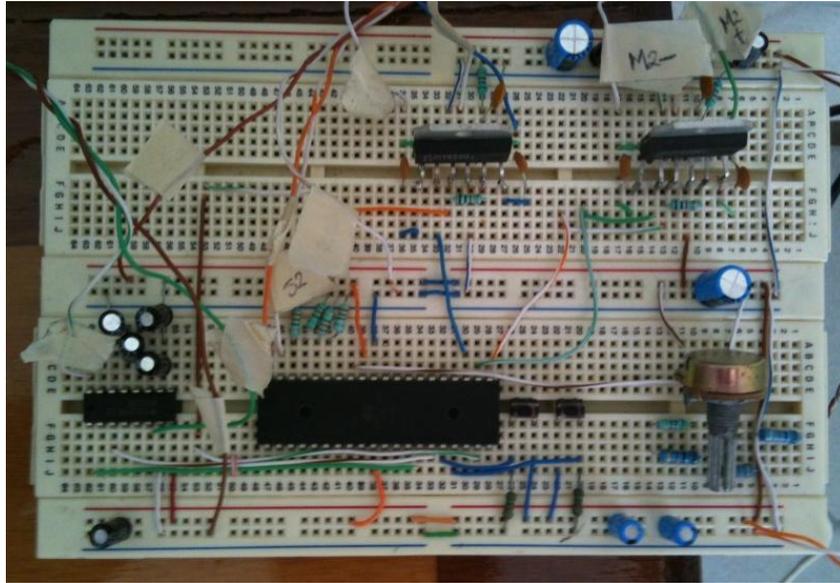


Figura 3.34 Sistema electrónico de control.

3.4. Diseño computacional

El principal objetivo del programa desarrollado en LabVIEW[®] es que funcione como una interfaz gráfica de usuario, la cual permite ingresar los datos necesarios, para que el SSFA se posicione en el punto de máxima irradiación solar, y a su vez poder monitorear los ángulos deseados y el voltaje del panel fotovoltaico. Todo esto mediante una interfaz agradable para el usuario. Los requerimientos que debe cumplir este software son:

- Permitir ingresar los parámetros necesarios para el posicionamiento del SSFA que son: Latitud, longitud, la dirección del archivo donde se guardaran los datos, las ganancias de sintonización para el control PID del motor 1 y para el motor 2.
- Calcular los ángulos de azimut y de altura solar.
- Mandar los ángulos calculados y las ganancias de sintonización por puerto serie al ATmega16[®].
- Recibir los datos del ATmega16[®] e interpretarlos para mostrarlos en la interfaz del usuario.
- Obtener los datos del SSFA actuales como: ángulos de posicionamiento reales y voltaje del panel.
- Guardar los datos de las mediciones en un archivo de textos para poder tener acceso, para su fácil manipulación o presentación de resultados.

3.4.1. Diseño del programa

En base a los requerimientos se plantea diseñar una estructura general del programa. Dentro del diseño se tiene contemplada la interfaz de usuario, ya que una interfaz sencilla y agradable para el usuario le facilitará el uso y manipulación del software implementado. Para presentar la interfaz se hará uso de una herramienta llama Tab Control, el cual permite mediante pestañas visualizar el sistema con un presentación o portada, y después la solicitud de los datos

para que sean calculados los ángulos y el SSFA se posicione. El usuario simplemente colocará la posición global del prototipo dentro de la interfaz a desarrollar. En la Figura 3.35 se muestra el proceso para empezar a diseñar el programa a implementar.

Para el desarrollo del software se emplea LabVIEW® debido a que la interfaz es más agradable para el usuario final y la programación a bloques es de lo más sencilla para alguna mejora futura.

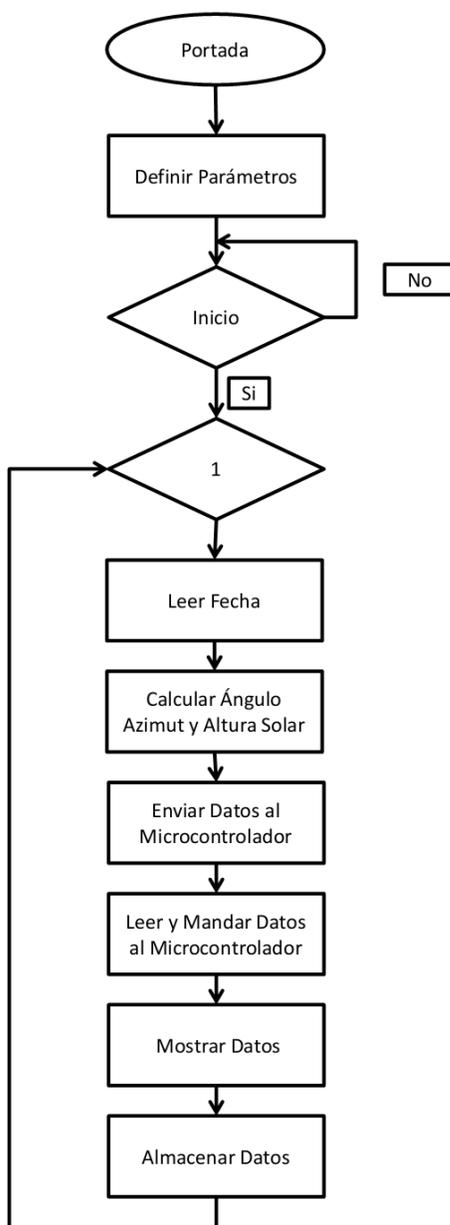


Figura 3.35 Diagrama de Flujo del programa en LabVIEW®.

- **Portada.** Corresponde a la presentación, donde se muestra los datos principales de este trabajo de tesis.
- **Definir Parámetros.** En esta parte el usuario escribirá la ruta del archivo donde se guardaran los datos y la posición global en la que se encuentra colocado el SSFA.
- **Inicio.** Una vez definido los parámetros se procede a iniciar el programa en un ciclo repetitivo hasta que el usuario decida detener el programa.
- **Leer Fecha.** El programa leerá la fecha y hora de la PC, esta parte es fundamental para la implementación del algoritmo debido a que si nuestro equipo no se encuentra configurado con la fecha actual y hora, las mediciones y cálculos no serán las correctas.
- **Calcular Ángulo de Azimut y Altura Solar.** Mediante el algoritmo mostrado en el capítulo 2.3. se calculan dichos ángulos dependiendo de la hora y fecha en la que se encuentre el SSFA.
- **Enviar y Leer Datos al Microcontrolador.** Se envían los datos calculados y las ganancias de sintonización PID de los motores vía puerto serie al ATmega16[®] y se leen los datos que nos proporciona información de la posición de los motores y el voltaje del panel fotovoltaico. Los parámetros de configuración son los siguientes:
 - Baud Rate (Velocidad de transmisión): 9600
 - Bits de datos: 8
 - Paridad: No
 - Bits de paro: 1
 - Control de flujo: No
- **Mostrar Datos.** Se codifica la señal enviada por el microcontrolador para que sea mostrada en la interfaz del usuario y comprobar que el sistema esté funcionando adecuadamente.
- **Almacenar Datos.** Los datos recibidos del microcontrolador y generados por el algoritmo son almacenados en un archivo de texto para después ver si el SSFA se posicionó en el punto de máxima irradiación solar, hacer una comparación de los ángulos calculados y en los que se posiciona el sistema.

En la Figura 3.36 se muestra una herramienta Elapse Time mostrada como “Hora” obtiene los datos de la fecha y hora de la PC en donde se esté ejecutando el programa. Después ese es desglosado para obtener el número del día del año, el mes, los minutos y hora en formato de 24 horas.

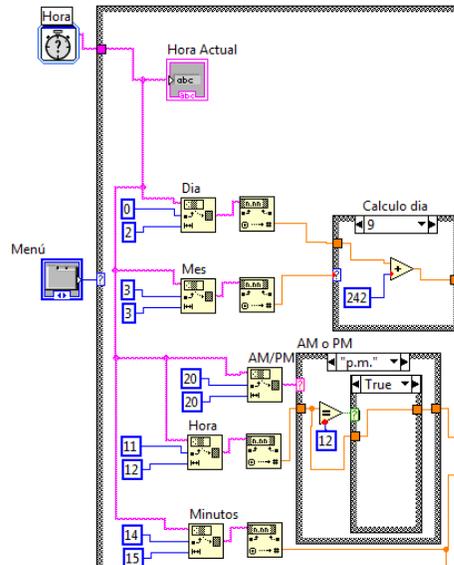


Figura 3.36 Diagrama a bloques para la calcular la fecha y hora

En esta parte del programa, mostrado en la Figura 3.37 se implementa el algoritmo para el seguimiento de máxima irradiación solar, para utilizar las funciones matemáticas se tiene apoyo de las herramientas “Formula” de LabVIEW y conforme a cada variable que se va calculando que permite conectar al otro bloque para calcular el siguiente parámetro.

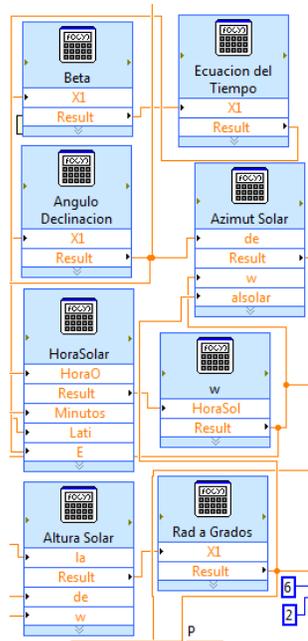


Figura 3.37 Diagrama a bloques para calcular los ángulos de azimut y altura solar.

Se realiza una corrección para el ángulo de azimut para obtener el valor correcto, cuando la posición del sol rebasa el eje o plano vertical este-oeste, bajo las formulas 2.7, 2.8 y 2.9.

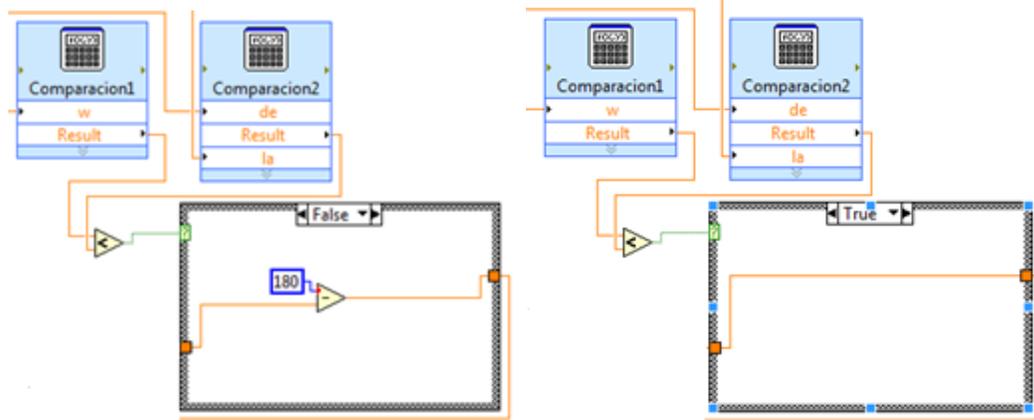


Figura 3.38 Comparación para el ángulo de azimut.

Los parámetros calculados y las ganancias de sintonización son almacenados en una sola cadena de caracteres, que son enviados por comunicación vía puerto serie al microcontrolador para su manipulación dentro del mismo para ello se sigue la configuración mostrada en la Figura 3.39.

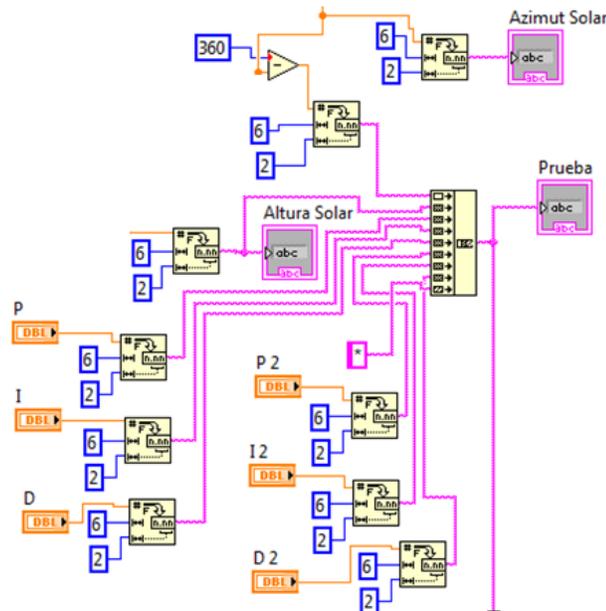


Figura 3.39 Integración de los datos.

El diagrama final que se empleó es el mostrado en la Figura 3.40 para la comunicación puerto serie con el microcontrolador, el almacenamiento de datos y calcular los ángulos de azimut y de altura solar.

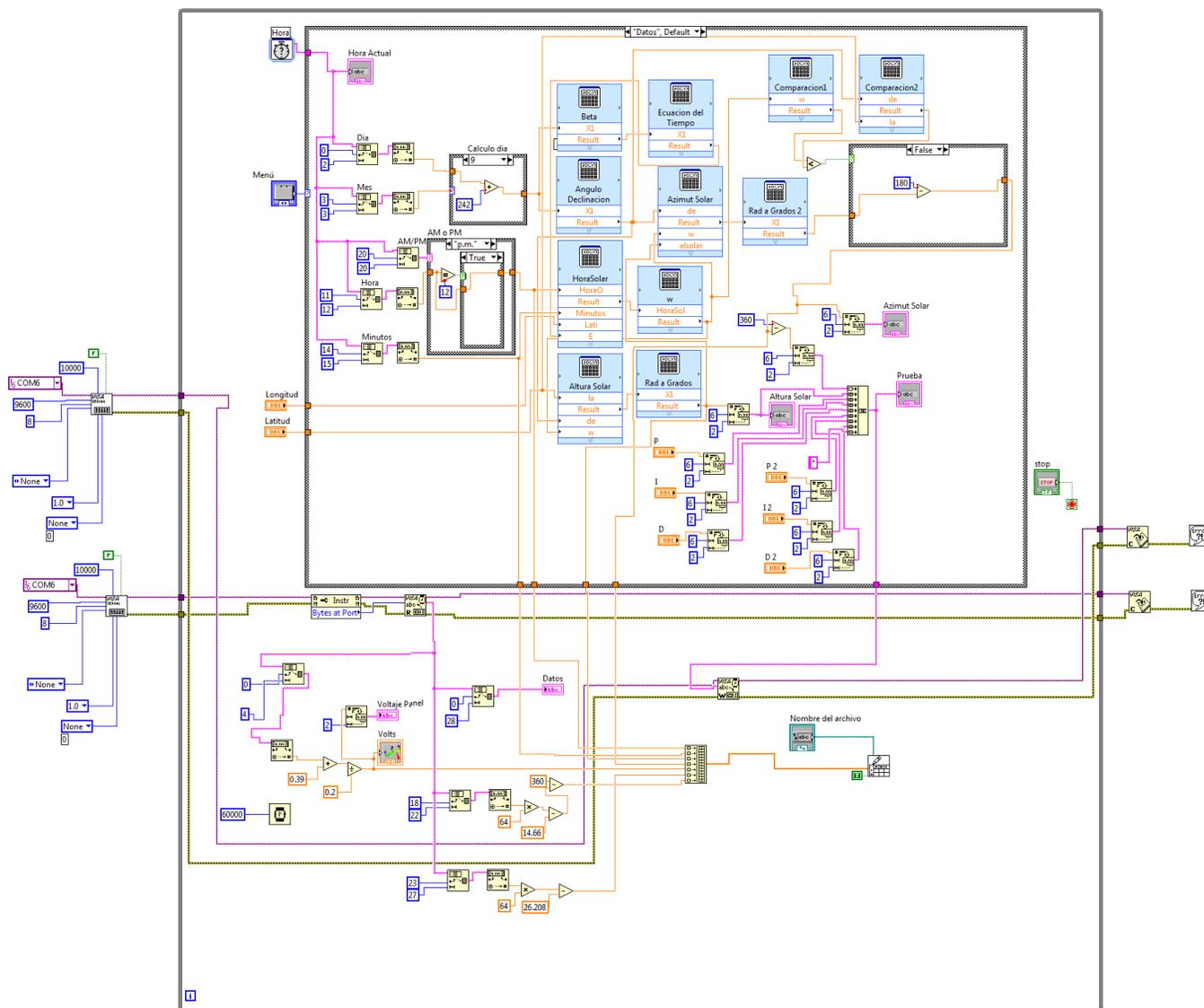


Figura 3.40 Diagrama a bloques en LabVIEW.

Una vez construido cada una de las partes mecánica, electrónica y computacional se procede a realizar pruebas del SSFA en las afueras del Instituto de Mecatrónica y Electrónica, ubicado dentro de la UTM.

Para colocar el prototipo debe de estar ubicado en un lugar que sin importar la hora pueda recibir la luz del sol durante el día, y no exista algún objeto que impida que el SSFA no reciba la radiación solar óptima. También se debe tomar en cuenta que el algoritmo utilizado está basado en una carta solar, por lo tanto debe de colocarse el sistema apuntando hacia el norte, para ello se hace el apoyo de una brújula o un GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

Capítulo IV. Resultados

4.1. Pruebas

Para colocar el SSFA se hace uso de una brújula o un GPS, debido a que el prototipo debe apuntar hacia el norte, para que el punto de máxima irradiación solar a posicionarse sea el correcto. En la Figura 4.1 se muestra los datos obtenidos de un GPS el cual se utiliza para calibrar el SSFA. En la Figura 4.2 se puede apreciar el sistema posicionado.



Figura 4.1 Pantalla del GPS.



Figura 4.2 SSFA calibrado hacia el norte.

Una vez colocado el SSFA se procede a configurar la latitud y longitud en donde se encuentre posicionado el prototipo, para conocer las coordenadas de la UTM se utiliza los datos obtenidos anteriormente del GPS, el cual permite conocer la latitud y longitud que se ingresaran en el software desarrollado en LabVIEW como se muestra en la Figura 4.3.

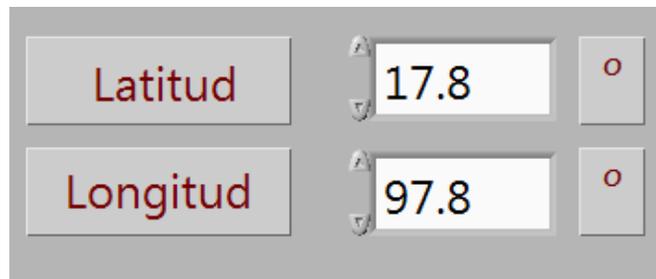


Figura 4.3 Parámetros configurados en LabVIEW.

Esta prueba se realizó el 4 de diciembre del 2011 durante las 11:30 am y las 5:00 pm sin aplicar un control PID para los motores, el método de control es un ON/OFF. Los datos obtenidos del voltaje generado del panel fotovoltaico se muestran en la Figura 4.4.

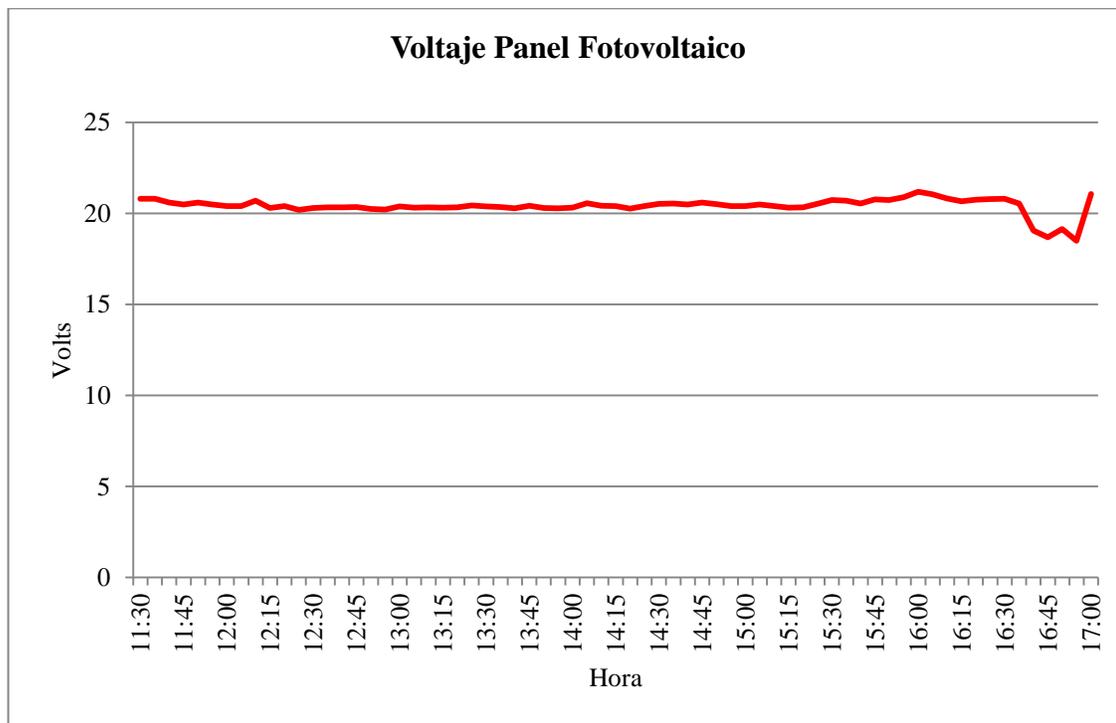


Figura 4.4 Gráfica del voltaje del panel fotovoltaico.

Se observa que a lo largo del día, el voltaje tiene mínimas variaciones mientras el SSFA se encuentra funcional. Durante las 16:30 y 17:00 horas se observa una pequeña caída de voltaje, esto es debido a que durante este tiempo estuvo nublado, pero la variación bajo solo 1.5 volts. El sistema durante ese día presentó un voltaje promedio del panel fotovoltaico de 20.41 volts con una desviación estándar de 0.456 volts, un voltaje máximo de 21.2 volts y un mínimo de 18.5 volts.

Para la siguiente prueba se implementa un control PID dentro del microcontrolador para cada uno de los motores, permitiendo modificar sus ganancias de sintonización desde la interfaz en LabVIEW mostrado en la Figura 4.5.

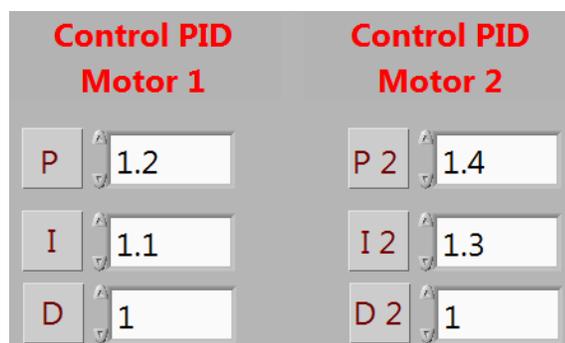


Figura 4.5 Ganancias de sintonización en LabVIEW.

La interfaz permite apreciar el voltaje generado por panel, la hora, fecha, el archivo donde se almacenará la información y los datos recibidos por el microcontrolador cada minuto.

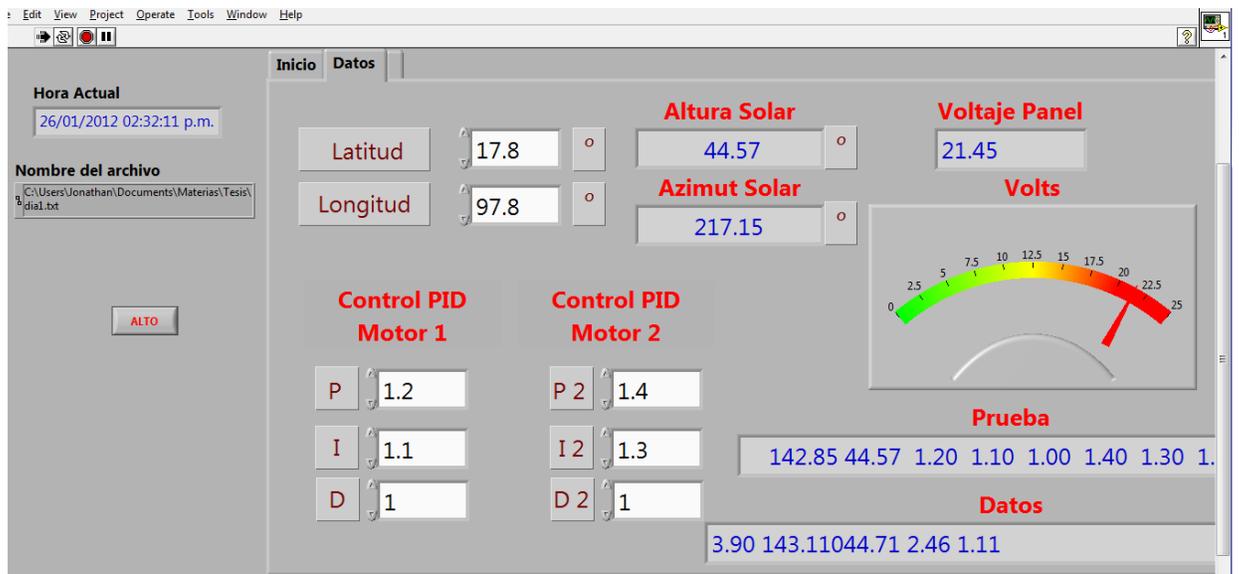


Figura 4.6 La interfaz en LabVIEW.

Para esta prueba el sistema se colocó el día 27 de enero del 2012 en las afueras del Instituto de Mecatrónica y Electrónica entre las 12:15 y 15:08 horas. El voltaje del panel fotovoltaico generado durante ese día se muestra en la interfaz de LabVIEW como se aprecia en la Figura 4.7.

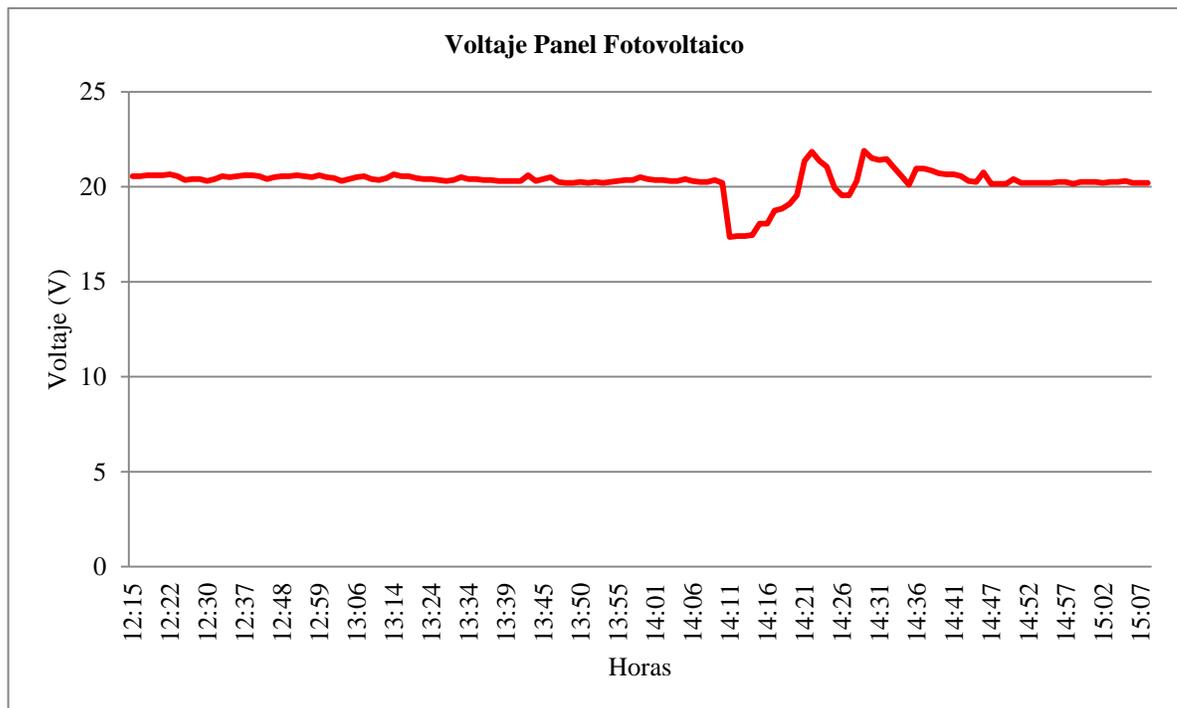


Figura 4.7 Gráfica del voltaje del panel fotovoltaico.

Durante la prueba el SSFA presentó menos movimiento debido a la implementación del PID en el código del ATmega16. Como se muestra en la gráfica el voltaje se mantuvo constante

a lo largo del día a excepción entre las 14:00 y 14:36 horas debido a que se presentó nubosidad durante ese periodo de tiempo. El voltaje promedio durante esta prueba fue de 20.28 volts.

En la Figura 4.8 puede apreciarse una comparación de los datos obtenidos de la altura solar, de forma similar se puede apreciar en la Figura 4.9 el ángulo de azimut.

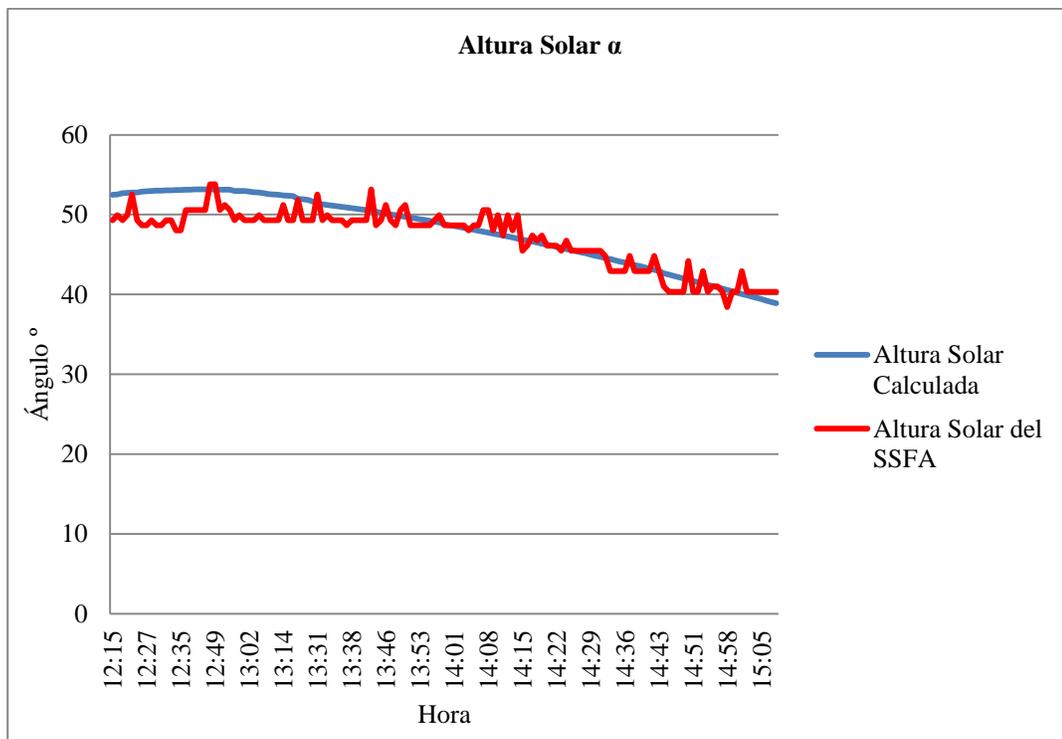


Figura 4.8 Comparación de la altura solar del SSFA.

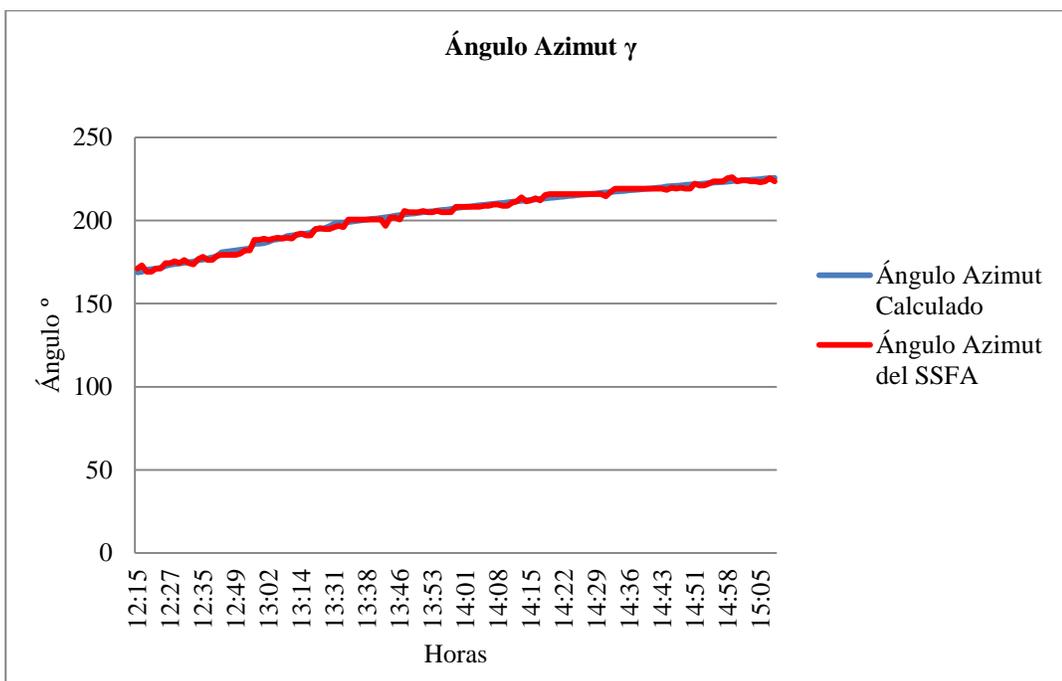


Figura 4.9 Comparación del ángulo de azimut del SSFA.

La tercera prueba se realizó el día 31 de enero del 2012 durante las 11:35 y las 17:36 hrs. El propósito de esta prueba fue cargar la batería para aplicaciones fotovoltaicas de la Figura 4.11 que se adquirió a través de la empresa CONERMEX, para ello se utilizó el controlador de carga CX10-1 de la Figura 4.10. Su principal función es mantener un voltaje fijo en este caso de 12 volts y una corriente fija que mandara a la batería a recargar, también brinda una protección electrónica en caso de sobrecargas, un indicador que muestra el porcentaje aproximado de carga total de la batería e incluye la función para sistemas automáticos de iluminación.



Figura 4.10 Controlador de carga CX10-1.



Figura 4.11 Batería recargable para aplicaciones fotovoltaicas CALE.

Durante la prueba se observó que el voltaje que recibía la batería era de 12.75 volts y una corriente de 1.44 amperes como se aprecia en las Figura 4.12 y Figura 4.13, el periodo que tardó en cargarse completamente fue de 5 horas aproximadamente.



Figura 4.12 Voltaje a la salida del controlador de carga.



Figura 4.13 Corriente a la salida del controlador de carga.

Durante esta prueba se monitoreo los ángulos de altura y azimut calculados para después hacer una comparación con los ángulos generados por el algoritmo implementado en LabVIEW y los ángulos que se posiciona el SSFA como se muestran en la. Figura 4.14 y Figura 4.15.

En el apéndice C se observa una tabla con los precios de los materiales y dispositivos empleados en este prototipo.

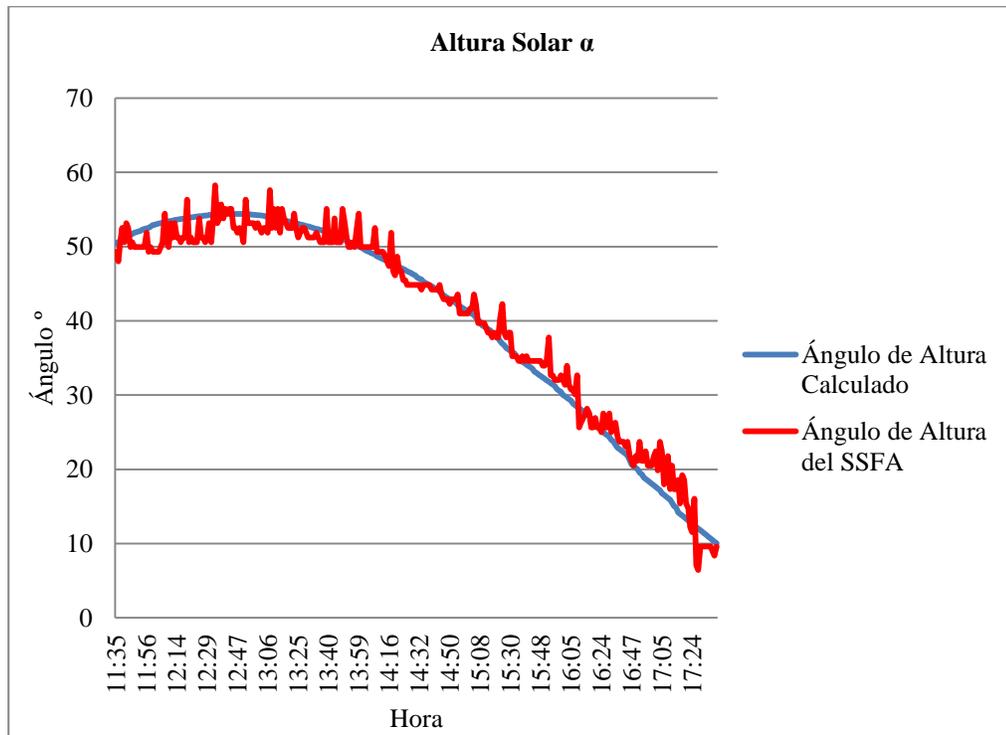


Figura 4.14 Comparación de la altura solar del SSFA.

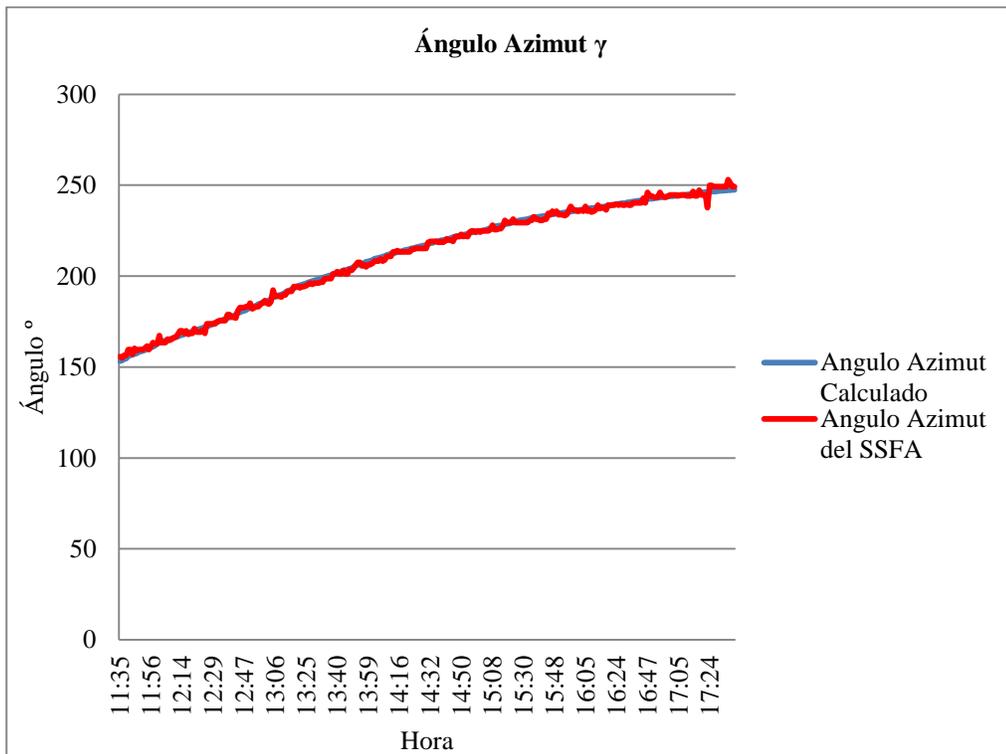


Figura 4.15 Comparación del ángulo de azimut del SSFA.

En esta prueba que se realizó el 21 de Marzo del 2012 durante las 14:10 y 17:10 horas, se conectó un convertidor CD/CD tipo elevador en la salida de voltaje del panel fotovoltaico como se muestra en la Figura 4.16, con el propósito de monitorear la potencia tanto en el sistema en modo fijo como en modo seguidor.

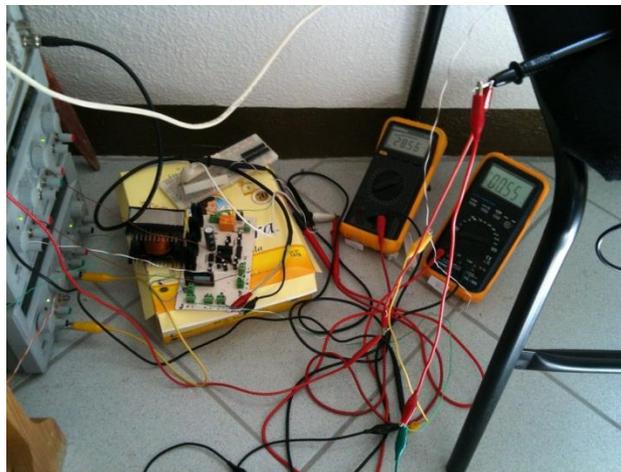


Figura 4.16 Monitoreo del convertidor.

Durante esta prueba se observaron las potencias de entrada (panel) y salida (en la carga), para comparar la potencia durante en el panel fijo y el SSFA, mostrados en las Figura 4.17 y Figura 4.18.

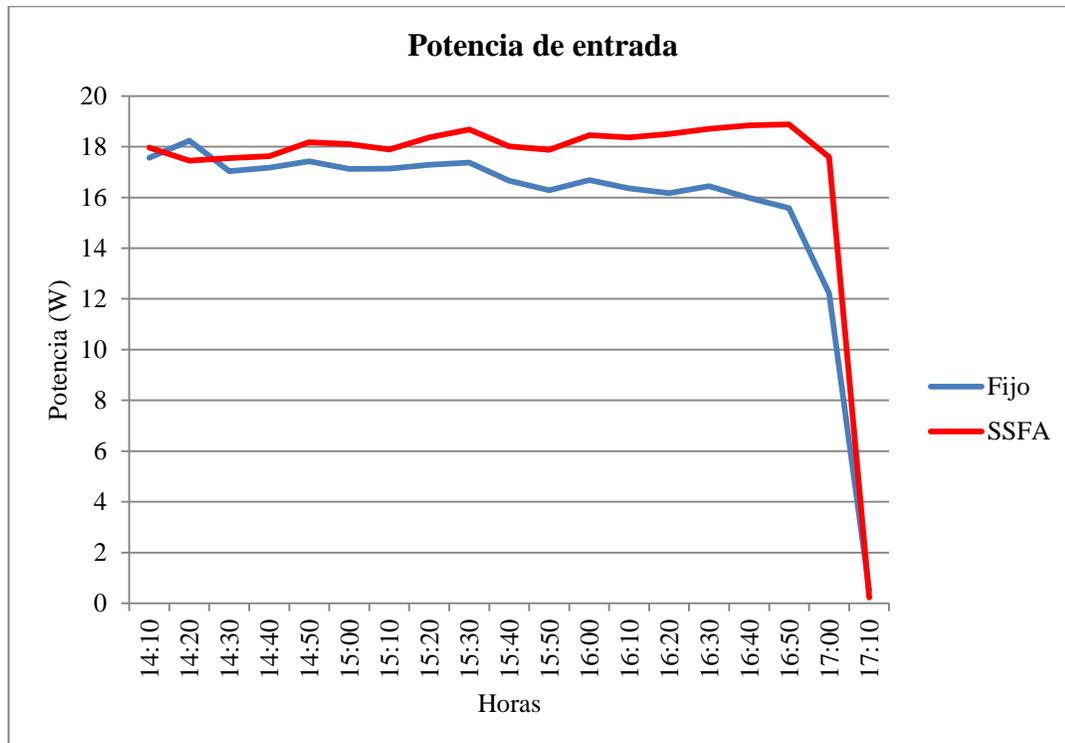


Figura 4.17 Potencia de entrada del convertidor.

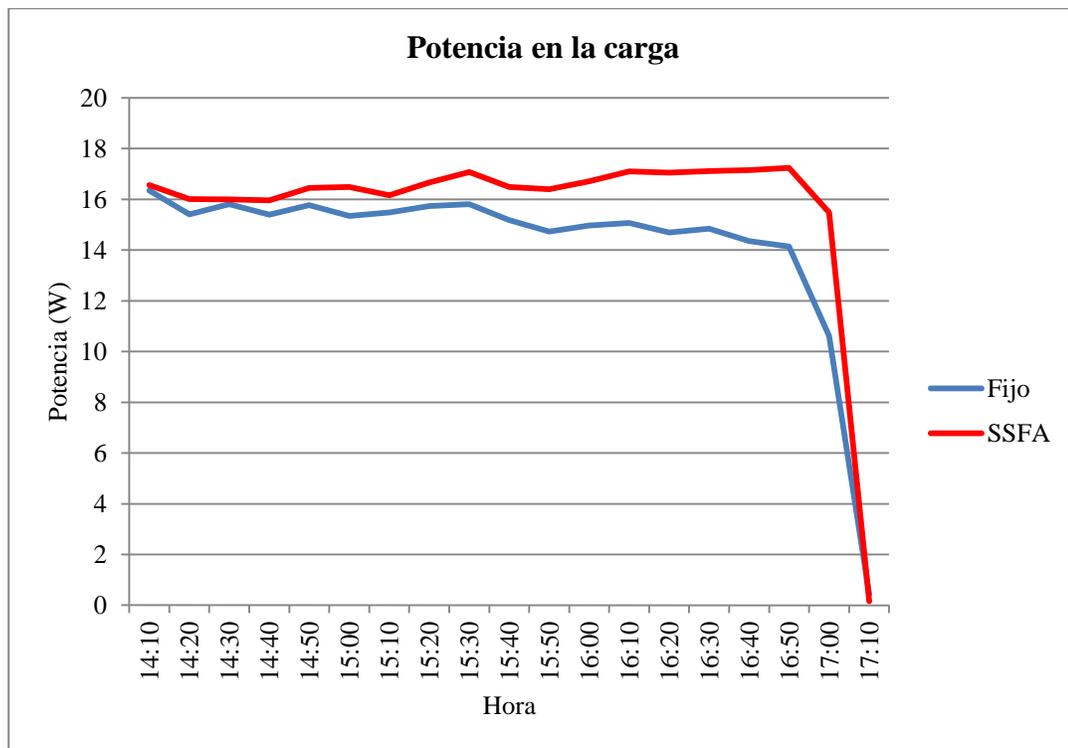


Figura 4.18 Potencia en la carga del convertidor.

Capítulo V: Conclusiones

En primer lugar se diseñó el sistema con dos grados de libertad para el posicionamiento del panel fotovoltaico CONERMEX[®] utilizando la herramienta SolidWorks[®]; una vez obtenido el diseño se realizó la simulación con la misma herramienta para calcular los torques mínimos necesarios de los motores a emplear para el movimiento continuo del sistema, como se describe en el subcapítulo 3.2.

A continuación se construyeron las partes mecánicas del SSFA diseñadas en la fase anterior, para ello se contó con el apoyo del Taller Metal-Mecánica de la Universidad. Esta fase se describe en el subcapítulo 3.2.1. Para probar el funcionamiento correcto de la parte mecánica del sistema se ensamblaron las partes antes mencionadas y se utilizó los motores de CD alimentados a una fuente para comprobar que el movimiento sea el deseado.

Una vez construida la parte mecánica se implementó un algoritmo en LabVIEW como se describe en el subcapítulo 3.3.3. 3.2. para calcular los ángulos de azimut y la altura solar durante el transcurso del día, para posicionar el SSFA en el punto de máxima irradiación solar, que a su vez manda los parámetros calculados al microcontrolador por medio del puerto RS-232 y recibe los datos del SSFA.

Para el control de los motores se implementó código en un microcontrolador ATMega16[®] como se describe en el subcapítulo 3.3.3. El cual realiza las funciones de recibir los nuevos parámetros de posicionamiento y ganancia para el controlador PID digital, leer los datos de los sensores y el voltaje del panel fotovoltaico, mandar los datos actuales del SSFA por el puerto RS-232, posicionar el SSFA en los nuevos parámetros mandados por la PC, controlar la velocidad y sentido de giro de los motores. Para esto se implementaron circuitos integrados externos al ATMega16[®] que permitieran el control de los motores y la comunicación con el microcontrolador y la PC como se describe en el subcapítulo 3.3.4.

Como se observó en las Figura 4.8 y Figura 4.14 el ángulo solar del SSFA presenta algunas variaciones en comparación del ángulo calculado por el algoritmo y esto se debe a que el eje del motor está colocado en la parte central del panel lo cual le exige un torque mayor, también por los vientos en el sistema se presenten algunos cambios en su posición, a diferencia del ángulo de azimut del SSFA y el calculado por el algoritmo como se aprecian en las Figura 4.9 y Figura

4.15 son casi idénticos durante las pruebas, esto se debe a que el torque es menor para hacer girar el prototipo, ya que el peso influye de manera mínima en el par del motor.

Durante el monitoreo del panel fotovoltaico se observó que el voltaje generado se mantenía en 20 volts con mínimas variaciones a lo largo del día, como se observó durante la carga de la batería el voltaje y la corriente que recibía eran constantes lo cual permitió que la batería se cargara durante un periodo de 5 horas aproximadamente y ésta no dejara de cargarse durante algún determinado tiempo o cuando aún se presentara irradiación solar.

En la última prueba mencionada, se observa que la potencia del sistema fijo es menor en comparación que la potencia del SSFA, tanto en la carga como en la entrada del convertidor, esto es debido a la implementación de un sistema de seguimiento, por consiguiente la energía solar que incide sobre el panel es mayor durante el día que teniendo un panel fijo.

5.1. Trabajos futuros

Puede implementarse este prototipo con otros sistemas en los cuales se tenga que posicionar en un sistema de máxima irradiación solar como un calentador solar, en sistemas de generación de energía eléctrica, unir éste SSFA con el sistema con control de velocidad de un motor de CD en un arreglo en cascada SEPIC ya desarrollado en ésta institución. Diseñar un mecanismos de cuatro barras para mejorar el posicionamiento del ángulo de altura α del SSFA.

Otro trabajo a futuro, es desarrollar una interfaz implementada a través de un dispositivo Android o iOS, que están teniendo un uso comercial en todo el mundo como los Smartphone, iPod, Tabletas o PDA. Para controlar y monitorear el dispositivo de manera remota

Bibliografía

- [1] D. C. Martins, «Usage of the solar energy from the photovoltaic panels for the generation of electrical energy,» *Telecommunications Energy Conference*, p. 17.3, 1999.
- [2] E. M. S., «PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR SUPPLY PUBLIC ILLUMINATION IN ELECTRICAL ENERGY DEMAND PEAK,» *Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE*, pp. 1501 - 1506 Vol.3, 2004.
- [3] E. Anderson, «Solar Panel Peak Power Tracking System,» WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2003.
- [4] J. Merrill, «Solar thermal power system concepts for high power satellites,» *Aerospace Conference Proceedings IEEE*, pp. 69-74 Vol.4 , 2000.
- [5] «Cambio climático,» [En línea]. Available: <http://www.cambio-climatico.com/protocolo-de-kyoto>. [Último acceso: 2010 Marzo 08].
- [6] J. A. Díaz, «Tecnología Fotovoltaica,» *Boletín IEE*, pp. 58-63, 2008.
- [7] C. d. E. d. I. E. Solar, «Censolar,» [En línea]. Available: <http://www.censolar.es/>. [Último acceso: 9 Febrero 2010].
- [8] T. Peterson, J. Rice y V. Jeff, Solar Tracker, ECE 476, 2005.
- [9] «Energía Solar Fotovoltaica,» [En línea]. Available: <http://www.energia-solar-fotovoltaica.info/>. [Último acceso: 2010 Febrero 15].
- [10] R. M. J. Olmos, «Energía Solar: Estado actual en México. Programas de la Conae,» SENER, Monterrey, 2007.
- [11] L. F. C. Hinojosa, «Energías Renovables,» Instituto Nacional de Ecología, Distrito Federal,

- 2003.
- [12] C. Ying-Chun, «Design and Implementation of Battery Charger with Zero-Voltage-Switching Resonant Converter for Photovoltaic Arrays,» *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference IEEE*, pp. 1-6, 2006.
- [13] P. S. y. E. Renovables, «Paneles Solares y Energías Renovables,» 11 Febrero 2010. [En línea]. Available: <http://panelessolares.com.mx/>.
- [14] E. F. Cuevas, CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CD A TRAVÉS DE UN ARREGLO DE UN ARREGLO EN CASCADA SEPIC - PUENTE COMPLETO ALIMENTADO CON UN PANEL SOLAR, Huajuapán de León, Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca. Tesis de Licenciatura., 2010.
- [15] J. Linares-Flores, H. Sira Ramirez, E. F. Cuevas López y M. A. Contreras Ordaz, «Sensorless Passivity Based Control of a DC Motor via a Solar Powered Sepic Converter-Full Bridge Combination,» *JPE-Journal of Power Electronics*, vol. XI, n° 5, pp. 743-750, 2011.
- [16] J. Duncan, A Global Maximum Power Point Tracking DC-DC Converter, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [17] T. G. V. Mejía, Construcción de un prototipo de colector solar tipo canal parabólico para la generación de vapor y su validación, Huajuapán de León: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2011.
- [18] L. L. López, «Portal Solar,» [En línea]. Available: www.portalsolar.com/energia-solar-paneles-solares.html. [Último acceso: 10 Febrero 2010].
- [19] G. Simoes, «A RISC-microcontroller based photovoltaic system for illumination applications,» *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1151 - 1156 Vol.2, 2000.
- [20] S. Bifaretti, «Effects of power converters on dye-sensitized solar cells,» *Clean Electrical Power*, pp. 346 - 351, 2007.
- [21] «Sito Solar,» [En línea]. Available: <http://www.sitosolar.com/paneles%20fotovoltaicas.htm>. [Último acceso: 10 Febrero 2010].
- [22] PROINSO, «Mecasolar,» [En línea]. Available: http://www.mecasolar.com/_bin/index.php. [Último acceso: 11 Febrero 2010].
- [23] D. G. Reyes, «Arqhys Architects Site,» [En línea]. Available: <http://www.arqhys.com/contenidos/solar-carta.html>. [Último acceso: 11 Febrero 2010].

- [24] M. A. R. Barrientos, DISEÑO DE UN SEGUIDOR SOLAR DE ALTA PRESICIÓN MEDIANTE UN DSP, PUEBLA: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Tesis de Maestría, 2004.
- [25] Atmel, «Atmel,» 6 Septiembre 2011. [En línea]. Available: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf.
- [26] F. S. Espinosa, LOS MICROCONTROLADORES AVR DE ATMEL, Huajuapán de León, 2010.
- [27] J. V. Guzmán, Identificación del Módulo de Elasticidad de Aluminio 6061 por Medio de la Medición de Deformación con Galgas Extensiométricas, Huajuapán de León: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA, 2011.
- [28] O. R. Lazo, «Diseño asistido por computador,» vol. I, 2006.
- [29] D. SolidWorks, «Web de DS SolidWorks,» [En línea]. Available: <http://www.solidworks.es/>. [Último acceso: 23 Noviembre 2010].
- [30] SolidWorks, «SolidWorks,» Dassault Systèmes SolidWorks Corp, Diciembre 1993. [En línea]. Available: <http://www.solidworks.com.mx/>. [Último acceso: 22 Febrero 2012].
- [31] D. A. Possani, Principios de la Mecatrónica, Distrito Federal: Instituto Tecnológico Autónomo de México, 2011.
- [32] H. V. M. Martínez, Análisis, modelado y simulación en computadora del motor de corriente directa tipo serie, Huajuapán de León: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2009.
- [33] M. J. d. I. Fuente, *Sensores*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2005.
- [34] T. Instruments, *LMD18200*, Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2011.
- [35] D. I. M. T. Piovan, Elementos de Máquinas, Bahía Blanca: Universidad Tecnológica Nacional, 2004.
- [36] S. R. M. Laboratory, «Sun path chart program,» University of Oregon, 5 Marzo 2007. [En línea]. Available: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>. [Último acceso: 2012 Enero 26].
- [37] J. Rzedowski, Vegetación de México, México: Limusa, S. A., 2006.

Apéndice A. Código del microcontrolador

```

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/delay.h>
#include <math.h>
#define F_CPU 1000000UL
#define tecla 300

volatile char string[64]="186.66 21.61 1.00 1.00
1.00 1.00 1.00 1.00*";
volatile char almacena[64];
volatile char panelstring[64];
volatile int contador,k,h,j;
volatile float val1, val2;

int start, motor, grados2,grados1,
pwm1,pwm2,error1,error2,panel;
long int ang1,ang2;
float angulo=.3125;
float tolerancia;
int tolemayor1,tolemenor1;
int tolemayor2,tolemenor2;
int dif1,dif2;
//---PID---MOTOR 1---//
float P1,I1,D1;
int PID1;
float KP1,KI1,KD1;
float
error1_act,error1_ant1,error1_ant2,error1_ant3,sumainte
1;

int inimotor1;
//---PID---MOTOR 2---//
float P2,I2,D2;
int PID2;
float KP2,KI2,KD2;
float
error2_act,error2_ant1,error2_ant2,error2_ant3,sumainte
2;

int inimotor2;

ISR (INT0_vect)
{
    if (start==0)
    {
        start=1;
        motor=1;
    }
    else
    {
        start=0;
        motor=0;
    }
    _delay_ms(tecla);

    KP1=1.5;
    KI1=1.1;
    KD1=1.4;
    KP2=1;
    KI2=0.3;
    KD2=0.2;
}

ISR (INT1_vect)
{
    start=0;
    motor=0;
    _delay_ms(tecla);
}

ISR (USART_RXC_vect)
{
    almacena[contador]=UDR;
    if (almacena[contador]!=0x2A)
    {
        for (k=0; k< 64;k++)
            string[k]=almacena[k];
        contador=0;
    }
    else
        contador++;

    motor=1;
}

void leersensores (void)
{
    ang1=ang2=panel=0;
    for (k=0; k< 3;k++)
    {
        ADMUX=0x00;
        ACSR=0x80;
        ADCSRA=ADCSRA | 0x40;
        while(!(ADCSRA&0x10));
        ADCSRA |=0x01;
        ang1=ADCW+ang1;
        ACSR=0x00;
        asm("nop");

        ACSR=0x80;
        ADMUX=0x01;
        ADCSRA=ADCSRA | 0x40;
        while(!(ADCSRA&0x10));
        ADCSRA |=0x01;
        ang2=ADCW+ang2;
        ACSR=0x00;
        asm("nop");

        ACSR=0x80;
    }
}

```

```

        ADMUX=0x07;
        ADCSRA=ADCSRA | 0x40;
        while(!(ADCSRA&0x10));
        ADCSRA |=0x01;
        panel=ADCW+panel;
        ACSR=0x00;
        asm("nop");
    }
    ang1=ang1/3;
    ang2=ang2/3;
    panel=panel/3;
    //_delay_ms(500);
}

void conf_usart()
{
    UBRR1=12;
    UBRRH=0;
    UCSRA=0x02;
    UCSRB=0x98;
    UCSRC=0x86;
}

void arregla()
{
    h=0;
    while (string[h]!=42)
    {
        if (string[h]==32)
            string[h]=48;
        h++;
    }
}

void conversion (void)
{
    int cent, dec, unid;
    float decim, cente;
    cent =(string[0]-48)*100;
    dec =(string[1]-48)*10;
    unid =(string[2]-48);
    decim=(string[4]-48)*.1;
    cente=(string[5]-48)*.01;
    val1=cent+dec+unid+decim+cente;

    cent =(string[6]-48)*100;
    dec =(string[7]-48)*10;
    unid =(string[8]-48);
    decim=(string[10]-48)*.1;
    cente=(string[11]-48)*.01;
    val2=cent+dec+unid+decim+cente;

    /////GANANCIAS PID1/////
    cent =(string[12]-48)*100;
    dec =(string[13]-48)*10;
    unid =(string[14]-48);
    decim=(string[16]-48)*.1;
    cente=(string[17]-48)*.01;
    KP1=cent+dec+unid+decim+cente;

    cent =(string[18]-48)*100;
    dec =(string[19]-48)*10;
    unid =(string[20]-48);
    decim=(string[22]-48)*.1;
    cente=(string[23]-48)*.01;
    KI1=cent+dec+unid+decim+cente;

    cent =(string[24]-48)*100;
    dec =(string[25]-48)*10;
    unid =(string[26]-48);
    decim=(string[28]-48)*.1;
    cente=(string[29]-48)*.01;
    KD1=cent+dec+unid+decim+cente;

    /////GANANCIAS PID1/////
    cent =(string[30]-48)*100;
    dec =(string[31]-48)*10;
    unid =(string[32]-48);
    decim=(string[34]-48)*.1;
    cente=(string[35]-48)*.01;
    KP2=cent+dec+unid+decim+cente;

    cent =(string[36]-48)*100;
    dec =(string[37]-48)*10;
    unid =(string[38]-48);
    decim=(string[40]-48)*.1;
    cente=(string[41]-48)*.01;
    KI2=cent+dec+unid+decim+cente;

    cent =(string[42]-48)*100;
    dec =(string[43]-48)*10;
    unid =(string[44]-48);
    decim=(string[46]-48)*.1;
    cente=(string[47]-48)*.01;
    KD2=cent+dec+unid+decim+cente;
}

mandarpanel()
{
    if (start==1)
    cambiarpanel();
    {
        for (j=0; j< 28;j++)
        {
            while (!(UCSRA & 1 << UDRE));
            UDR=panelstring[j];
        }
    }

    cambiarpanel()
    {
        volatile int ent1;
        volatile float dec1, fra1, panel1;
        volatile unsigned char dig1, dig2, dig3;

        panel1=panel*.004828125;
        ent1=panel1;
        dig2=(panel1-ent1)*10;
        fra1=(panel1-ent1)*10;
        ent1=fra1;
        dec1=(fra1-ent1)*10;
        dig1=panel1;
        dig3=dec1;

        panelstring[0]=dig1+0x30;
        panelstring[1]=0x2E;
        panelstring[2]=dig2+0x30;
        panelstring[3]=dig3+0x30;
        //Espacio
        panelstring[4]=0x20;
        //Datos Sensores
        panelstring[5]=string[0];
        panelstring[6]=string[1];
        panelstring[7]=string[2];
        panelstring[8]=string[3];
        panelstring[9]=string[4];
    }
}

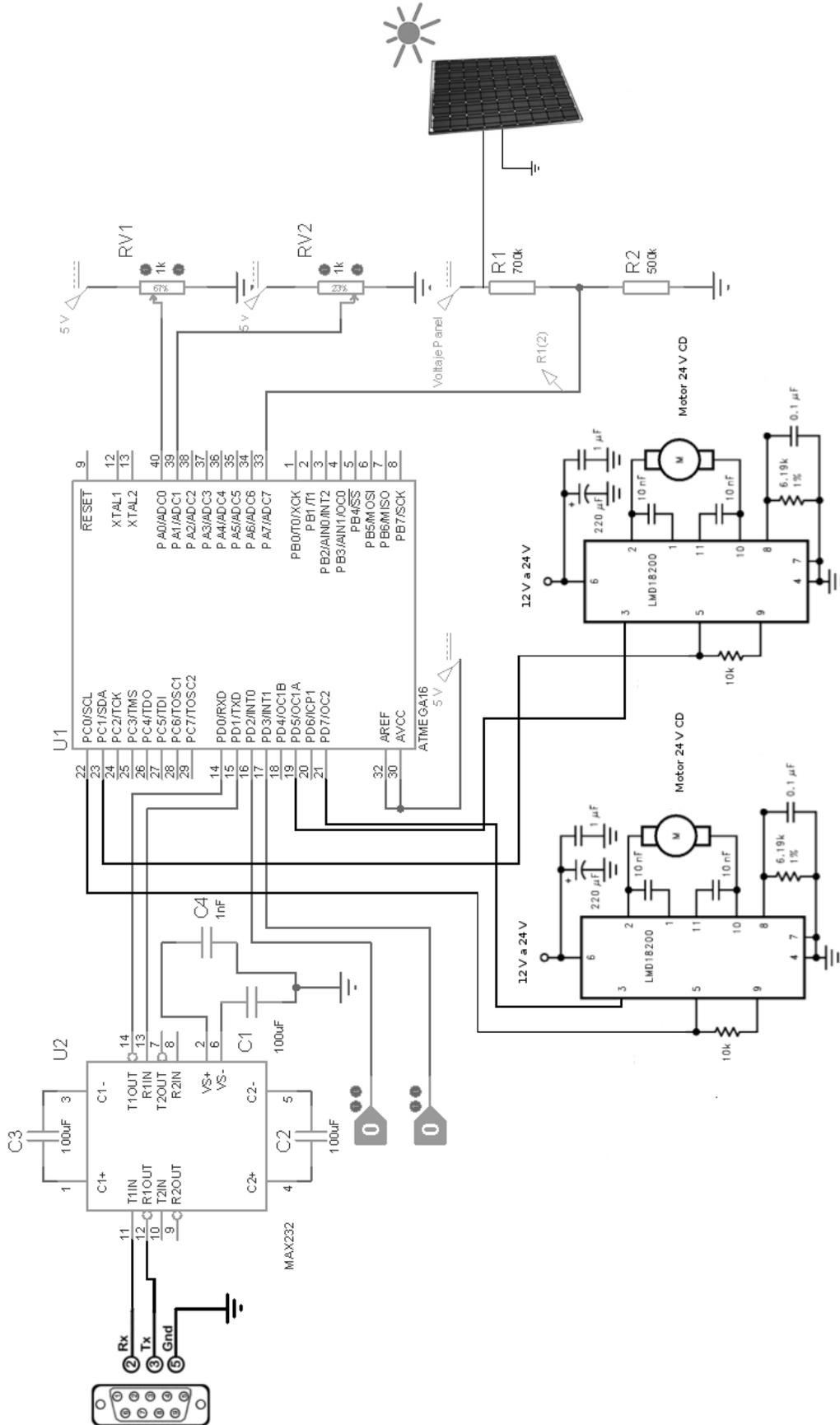
```



```
else if ((val2<tolemayor2) && (-1<val2) )
    {
        control2();
        OCR2=0;
        OCR1A=pwm2;
        PORTC=0x00;
    }
else
    {
        PORTC=0x00;
        OCR2 = 0;
        OCR1A= 0;
    }
}

////////////////////////////////////
}
else
{
    PORTC=0x00;
    OCR2=0;
    OCR1A=0;
}
}
```


Apéndice B. Diagrama esquemático



Apéndice C. Costo de material empleado para el SSFA

Tabla C.1 Costos de materiales

Cantidad	Descripción	Precio	Subtotal
1	Panel Fotovoltaico Policristalino de 50 W	\$ 1,474.24	\$ 1,474.24
1	Batería aplicaciones fotovoltaicas 12 V 125 Ah	\$ 1,242.65	\$ 1,242.65
1	Controlador de carga CX10-1 de 10 A	\$ 598.56	\$ 598.56
2	Motores de CD de 24 Volts	\$ 442.00	\$ 884.00
1	Tramo de solera de 2 1/2 pulgadas de ancho	\$ 150.00	\$ 150.00
1	Cuadrado de 1 1/2 pulgadas	\$ 250.00	\$ 250.00
1	Soldadura eléctrica (1 Kg)	\$ 50.00	\$ 50.00
1	Microcontrolador ATMega16	\$ 120.00	\$ 120.00
2	Puente H. LMD18200	\$ 144.00	\$ 288.00
2	Potenciómetros de precisión	\$ 350.00	\$ 700.00
2	Push-boton	\$ 7.00	\$ 14.00
6	Tornillos con tuerca	\$ 2.50	\$ 15.00
1	Pintura color crema (1 Litro)	\$ 90.00	\$ 90.00
1	Botella de thinner (960 ml)	\$ 60.00	\$ 60.00
10	Cable UTP (1 m)	\$ 5.00	\$ 50.00
1	Max-232	\$ 22.50	\$ 22.50
1	Convertidor USB a RS-232	\$ 170.00	\$ 170.00
6	Capacitores 100 μ F	\$ 2.50	\$ 15.00
2	Capacitores 1 μ F	\$ 3.00	\$ 6.00
2	Capacitores 0.1 μ F	\$ 3.00	\$ 6.00
2	Capacitores 220 μ F	\$ 3.00	\$ 6.00
2	Resistencia de 330 Ω	\$ 1.00	\$ 2.00
1	Conector RS-232	\$ 15.00	\$ 15.00
		Total	\$ 6,228.95

