



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

TESIS DE LICENCIATURA

SISTEMA AUTÓNOMO DE SEGUIMIENTO SOLAR

ASOCIADO A UN GPS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN

INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA:

JOSE DAVID MUÑOZ CASTRO

ASESORES:

DR. LUIS ARMANDO MORENO CORIA

DR. JOSÉ GUILLERMO PÉREZ LUNA

PUEBLA, PUEBLA

DICIEMBRE 2016

RESUMEN

En la India Conference del 2013 se plantearon las ventajas y necesidades de utilizar seguidores solares; entre las ventajas mencionadas se presentó el realizar el seguimiento solar sin importar la estación del año o la hora del día y tener un mejor aprovechamiento de la energía producida por medios fotovoltaicos. La importancia del aprovechamiento de la energía solar es muy grande debido a que puede ser implementada en la industria textil como decolorante, en la metalúrgica como fundición y en la médica para métodos de esterilización, entre muchos otros. El presente documento muestra el diseño, desarrollo y construcción de un sistema autónomo de seguimiento solar de dos grados de libertad que hace uso de las ecuaciones que definen la trayectoria aparente del sol. En este trabajo se muestra la teoría correspondiente al movimiento aparente del sol y la definición de las ecuaciones que describen este fenómeno. A su vez, se muestra la manera en que un microcontrolador procesa la información proveniente de Sistemas de Posicionamiento Global, Relojes en Tiempo Real y sensores de posición para obtener una función que es traducida en impulsos eléctricos que se convierten en movimiento mecánico por medio de motores eléctricos a fin de establecer la posición de enfoque de un prototipo de laboratorio solar, diseñado y construido a lo largo de este trabajo. En este documento se incluye también la implementación de la etapa de almacenamiento de la información proveniente de un sistema de caracterización de paneles fotovoltaicos que muestra las diferencias que existen en la generación de potencia eléctrica de un sistema estático y del sistema autónomo de seguimiento solar. Se explica la metodología empleada para la construcción de cada una de las etapas del desarrollo y cómo son integradas para lograr el seguimiento solar. Como punto final se da una interpretación de la información obtenida en la etapa experimental de pruebas, cuya finalidad es analizar el comportamiento del sistema. Se obtuvo un sistema funcional capaz de captar la atención de los estudiantes y profesionales del área con el fin de promover una motivación en la búsqueda y el estudio de tecnologías que busquen el aprovechamiento de recursos energéticos renovables.

NOMENCLATURA

Irradiación solar (SI): Cantidad de potencia por unidad de área recibida desde el Sol en forma de ondas electromagnéticas. Unidades: kWh/m²/día.

Declinación solar (δ): Angulo medido entre el ecuador y el plano formado entre el centro de la Tierra y el centro del Sol. Unidades: ° grados.

Hora Solar Local (HSL): Hora real de transito del Sol. Unidades: horas, minutos.

Hora Local (HL): Hora definida para cada punto sobre la tierra, varía dependiendo de la zona horaria y los ajustes de horario. Unidades: horas, minutos.

Meridiano Hora Local Estándar (MHLS): Referencia con respecto al meridiano de Greenwich de una zona en particular. Unidades: ° grados.

Ecuación del tiempo (ET): Ecuación que permite corregir la excentricidad entre la órbita de la Tierra y su ángulo de inclinación. Unidades: minutos.

Velocidad orbital angular (B): Factor de conversión de la velocidad de translación por cada día del año transcurrido. Unidades: ° grados.

Día del año (d): Variable entre 0 y 365 que indica el valor numérico de cualquier día del año a partir del inicio de éste. Unidades: días.

Corrección del tiempo (CT): Factor que contempla las variaciones de la hora solar local respecto a las variaciones en la longitud dentro de una zona horaria, incorpora a su vez a la ecuación del tiempo. Unidades: minutos.

Latitud (lat): Coordenada geográfica que indica la posición Norte-Sur de un punto sobre la superficie de la Tierra. Unidades: ° grados, ' minutos, " segundos.

Longitud (lon): Coordenada geográfica que indica la posición Este-Oeste de un punto sobre la superficie de la Tierra. Unidades: ° grados, ' minutos, " segundos.

Relación Ángulo-Hora (HRA): Factor de conversión de la hora solar local al número de grados que se mueve el Sol a través del cielo. Unidades: ° grados.

Elevación solar (α): Altura angular del Sol en el cielo respecto al plano Ecuatorial. Unidades: ° grados.

Ángulo zenit (z): Ángulo entre el Sol y la línea zenit, similar al ángulo de elevación, pero medido desde la vertical en lugar del plano ecuatorial. Unidades: ° grados.

Azimut solar (Φ): Posición angular del Sol respecto a los puntos cardinales, 180° para el Sur y 0° para el Norte. Unidades: ° grados.

Módulo (M): (engranes) Proporción que existe entre el diámetro de paso y el número de dientes. Unidades: sin unidades.

Diámetro de paso (Dp): Circulo teórico en que todos los cálculos de los engranes son basados. Unidades: milímetros (mm).

Ángulo de presión (PA): Ángulo formado entre la cara del diente y la tangente del diámetro de paso de un engrane. Son valores estándar 20° y 25° . Unidades: grados ($^\circ$)

Número de dientes (N): Cantidad de dientes que cubren la circunferencia de un engrane. Unidades: dientes.

Relación de transmisión (R): Proporción que existe en Unidades: sin unidades.

Velocidad angular (n): Ángulo girado por unidad de tiempo, en términos de frecuencia se puede expresar como cantidad de giros completos por unidad de tiempo. Unidades: revoluciones por minuto (rpm).

Torque (τ): Medición de la cantidad de energía aplicada en un objeto para que este tenga una rotación. Unidades: kgf/cm.

Potencia eléctrica: Relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo. Unidades: Watts (W).

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
NOMENCLATURA	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES	4
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	7
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	8
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	10
2.1 LOS ÁNGULOS DEL SEGUIMIENTO SOLAR	15
2.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	18
2.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN I2C	21
2.4 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SERIAL	23
2.5 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SPI	24
2.6 RELOJES EN TIEMPO REAL	25
2.7 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL	26
2.8 MEMORIAS DE SEGURIDAD DIGITAL	28
2.9 ACCELERÓMETRO	29
2.10 MAGNETÓMETRO	31
2.11 SISTEMA DE TRANSMISIÓN POR ENGRANES	31
2.12 CONTROL EN LAZO CERRADO	35
CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL	37
3.1 PROTOTIPO DE LABORATORIO SOLAR	44
3.2 FUNCIÓN DE CONTROL	47
3.3 SISTEMA DE TRANSMISIÓN	51
3.4 VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN	55

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS	56
CONCLUSIONES	71
TRABAJO A FUTURO	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
GLOSARIO.....	76
APÉNDICE A: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO ARDUINO MEGA 2560.....	I
APÉNDICE B: RTC DS3231.....	II
APÉNDICE C: GPS U-BLOX 6.....	III
APÉNDICE D: ACELERÓMETRO MMA7361L	IV
APÉNDICE E: MAGNETÓMETRO HMC5883L	V
APÉNDICE F: SKETCH DEL SASS PARA ARDUINO	VI
APÉNDICE G: DIBUJOS TÉCNICOS DEL LABORATORIO SOLAR	XVII
APÉNDICE H: MOTOR DC POLOLU 131:1	XXIV
APÉNDICE I: CÓDIGO ECUACIONES MATLAB	XXV
APÉNDICE J: CÓDIGO ECUACIONES ARDUINO	XXVII

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. IRRADIACIÓN SOLAR EN EL MUNDO	1
FIGURA 2. DESEMPEÑO DE DIFERENTES SEGUIDORES SOLARES ALREDEDOR DEL MUNDO	2
FIGURA 3. IRRADIACIÓN NORMAL DIRECTA EN MÉXICO ANUAL	5
FIGURA 4. COMPORTAMIENTO DE LA INCIDENCIA SOLAR EN DIFERENTES ETAPAS DEL AÑO.	10
FIGURA 5. MOVIMIENTO DE LA TIERRA ALREDEDOR DEL SOL A LO LARGO DE UN AÑO.	11
FIGURA 6. ANALEMA SOLAR OBSERVADO EN FIGUERES, ESPAÑA.	12
FIGURA 7. ECUACIÓN DEL TIEMPO A LO LARGO DEL AÑO GRAFICADO EN MATLAB	13
FIGURA 8. VARIACIÓN DE LA DECLINACIÓN SOLAR A LO LARGO DEL AÑO GRAFICADO EN MATLAB.	15
FIGURA 9. TRAYECTORIA APARENTE DEL SOL Y DEFINICIÓN DEL ÁNGULO CENITAL SOLAR Z , ÁNGULO DE ELEVACIÓN SOLAR A Y ÁNGULO DE AZIMUT SOLAR Φ	16
FIGURA 10. DEFINICIÓN DE LATITUD L , HORA ANGULAR H , Y LA DECLINACIÓN SOLAR Δ	16
FIGURA 11. ESQUEMA DE INTERPRETACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE ELEVACIÓN (α) Y ZENIT (z).	17
FIGURA 12. ANALOGÍA GRÁFICA DEL ÁNGULO DE AZIMUT SOLAR CON RELACIÓN A UN COMPÁS.	18
FIGURA 13. TARJETA DE DESARROLLO ARDUINO MEGA 2560.....	19
FIGURA 14. AMBIENTE DE DESARROLLO DE ARDUINO EN UN SISTEMA OPERATIVO EN PLATAFORMA WINDOWS.	20
FIGURA 15. ESQUEMA DE CONEXIÓN DE UN BUS I2C CON UN MAESTRO Y VARIOS ESCLAVOS.....	22
FIGURA 16. ENVÍO DE INFORMACIÓN POR EL BUS I2C.	22
FIGURA 17. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE LA COMUNICACIÓN SERIAL ENTRE UN MICROCONTROLADOR Y UNA COMPUTADORA.	23
FIGURA 18. DIAGRAMA DE CONEXIÓN MAESTRO-ESCLAVO DEL BUS SPI.....	25
FIGURA 19. MÓDULO RTC DS3231 CON PROTOCOLO I2C.	26
FIGURA 20. SEGMENTO ESPACIAL DEL SISTEMA GPS.....	27
FIGURA 21. TRES SATÉLITES GPS DETERMINANDO LA POSICIÓN RELATIVA.	27
FIGURA 22. INCÓGNITAS A RESOLVER; POSICIÓN (X, Y, Z) Y TIEMPO DE VIAJE DE LA SEÑAL.....	28
FIGURA 23. DESCRIPCIÓN DE LAS CONEXIONES DE LAS MEMORIAS SD Y MICROSD.	29
FIGURA 24. ESQUEMA INTERNO DE UN ACELERÓMETRO CAPACITIVO.....	30
FIGURA 25. ACELERÓMETRO ANALÓGICO QUE OPERA CON MICROCONTROLADORES.	30
FIGURA 26. MAGNETÓMETRO DIGITAL QUE HACE USO DEL PROTOCOLO I2C.....	31
FIGURA 27. ESQUEMA DE RELACIÓN ENTRE ENGRANES DE DIENTES RECTOS.	32
FIGURA 28. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE LAZO CERRADO.	35
FIGURA 29. DIAGRAMA DE UN SISTEMA CON CONTROL AUTOMÁTICO.....	36
FIGURA 30. DIAGRAMA A BLOQUES DEL SISTEMA AUTÓNOMO DE SEGUIMIENTO SOLAR.	37
FIGURA 31. INTERACCIÓN DE ARDUINO CON LOS PERIFÉRICOS USADOS EN EL SASS.	38
FIGURA 32. INTERFAZ DE U-CENTER DONDE SE MUESTRA LA POSICIÓN DE ESTUDIO	40
FIGURA 33. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO USADO PARA EL SASS.	43

FIGURA 34. ESTRUCTURA DE LABORATORIO SOLAR.	44
FIGURA 35. SOPORTE PARA PANELES FOTOVOLTAICOS.....	45
FIGURA 36. LABORATORIO SOLAR CON BASE PARA PANEL FOTOVOLTAICO	45
FIGURA 37. LABORATORIO SOLAR CON CAMPANA CONCENTRADORA Y LENTE DE FRESNEL.	46
FIGURA 38. UBICACIÓN DE SENSORES DE POSICIÓN.....	47
FIGURA 39. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL P PARA EL ÁNGULO ELEVACIÓN.....	49
FIGURA 40. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL P PARA EL ÁNGULO AZIMUT.	49
FIGURA 41. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL EN LAZO CERRADO.....	50
FIGURA 42. PARTE DEL CÓDIGO DE CONTROL DESARROLLADO PARA LA PLATAFORMA ARDUINO.	51
FIGURA 43. MOTOR DC 37D 131:1 DE LA MARCA POLOLU.	51
FIGURA 44. ENGRANES DE LA TRANSMISIÓN AZIMUT.....	52
FIGURA 45. ENGRANES DE LA TRANSMISIÓN DE ELEVACIÓN.	53
FIGURA 46. TRANSMISIÓN PARA EL ÁNGULO DE AZIMUT.	54
FIGURA 47. TRANSMISIÓN PARA EL ÁNGULO DE ELEVACIÓN.....	54
FIGURA 48. LCD Y MEMORIA SD INTEGRADAS AL SASS.	55
FIGURA 49. PARTE DEL CÓDIGO PARA LA RESOLUCIÓN DE ECUACIONES EN MATLAB.	56
FIGURA 50. INTERFAZ GRÁFICA DE LA CALCULADORA SOLAR.....	57
FIGURA 51. PARTE DEL ‘SKETCH’ DE RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES EN ARDUINO.	57
FIGURA 52: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESAMIENTO DE LAS ECUACIONES DE SEGUIMIENTO SOLAR.....	58
FIGURA 53: COMPARACIÓN DEL PROCESAMIENTO DE LAS ECUACIONES QUE DEFINEN LA TRAYECTORIA SOLAR.....	59
FIGURA 54. CIRCUITO DE CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	60
FIGURA 55. PCB DE LA PLACA DE CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS.	61
FIGURA 56. MÓDULO DE CONTROL DEL SASS DE LA RADIACIÓN SOLAR.	61
FIGURA 57. PROTOTIPO DE LABORATORIO SOLAR.	62
FIGURA 58. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SASS.....	63
FIGURA 59. BASE DE DATOS DEL SASS.....	64
FIGURA 60. GRÁFICO COMPARATIVO DEL CÁLCULO DEL ÁNGULO DE AZIMUT.	65
FIGURA 61. GRÁFICO COMPARATIVO DEL CÁLCULO DEL ÁNGULO DE ELEVACIÓN.	65
FIGURA 62. GRÁFICO DE DATOS OBTENIDOS POR EL SASS PARA UN DÍA NORMAL.	66
FIGURA 63. GRÁFICO DE DATOS OBTENIDOS POR EL SASS PARA UN DÍA CON MUCHA NUBOSIDAD.	67
FIGURA 64. GRÁFICO DE DATOS OBTENIDOS POR EL SASS PARA UN DÍA TOTALMENTE DESPEJADO.	68
FIGURA 65. GRÁFICO DE IRRADIACIÓN SOLAR DISPONIBLE OBTENIDO CON UN PIRANÓMETRO.....	70

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El sol tiene la capacidad de convertir 4 millones de toneladas de hidrógeno en helio por segundo transcurrido, una gran cantidad de energía es liberada en este proceso. Es sabido que el planeta Tierra solamente capta una pequeña fracción de la energía emitida por el sol; la incidencia de los rayos del sol sobre la atmosfera de la tierra es de alrededor de $5.4 \times 10^{24} \text{ J} = 170$ trillones de kW por año, lo que es aproximadamente 27,000 veces la energía producida por todos los sistemas fabricados por el ser humano [1]. La figura 1 muestra cómo se distribuye la irradiación solar a lo largo del globo terrestre en promedio por año. En el cuadro azul se identifica el área de aprovechamiento de energía solar necesaria para solventar la demanda de energía a nivel mundial.

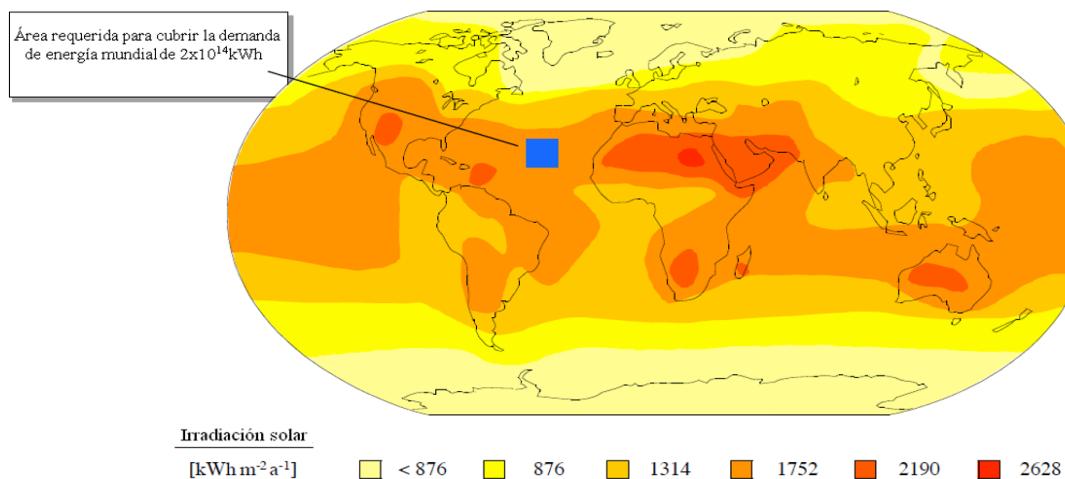


Figura 1. Irradiación solar en el mundo [2].

En la India Conference (INDICON 2013), se plantearon las ventajas y necesidades de utilizar seguidores solares y no solo paneles solares estáticos. Entre las ventajas mencionadas en dicho evento se encuentra el seguimiento de la trayectoria solar sin importar la estación del año o la hora del día y así contar con un mejor aprovechamiento de la energía absorbida por las fotoceldas [3]. En el año 2013 en la India se comenzó a desarrollar un sistema de seguimiento solar el cual se diferenciaba de otros sistemas por el hecho de que éste no solo poseía dos paneles solares para optimizar la cantidad de energía que incidía sobre éste,

sino que además la energía obtenida se dividía y alimentaba a una celda de combustible de hidrógeno, la cual podía suministrar energía para algunos autos [4].

Hoy en día, existen en el mundo diferentes sistemas que se encargan de la conversión y aprovechamiento de la energía solar, como una alternativa a los métodos usados convencionalmente. La conversión de energía a partir de la irradiación solar, se da a través de sistemas de tipo fotovoltaico y sistemas termosolares principalmente [5]; los cuales operan generalmente fijos y se encuentran orientados hacia una dirección específica, dicha orientación depende de su ubicación geográfica. Esta condición provoca una disminución en la potencia eléctrica del sistema y evidentemente en su rendimiento. Sin embargo, es posible aprovechar el movimiento aparente del sol con respecto a la tierra y operar los sistemas con un modelo de seguimiento solar, basado principalmente en las ecuaciones que describen dicha trayectoria solar; de esta manera se hace un aprovechamiento más eficiente del espectro solar y su capacidad energética [6]. La figura 6 muestra la comparación del desempeño reportado por distintos seguidores solares alrededor del mundo. Las diferencias entre estos seguidores son variables debido a la posición geográfica o la época en que es reportado el trabajo.

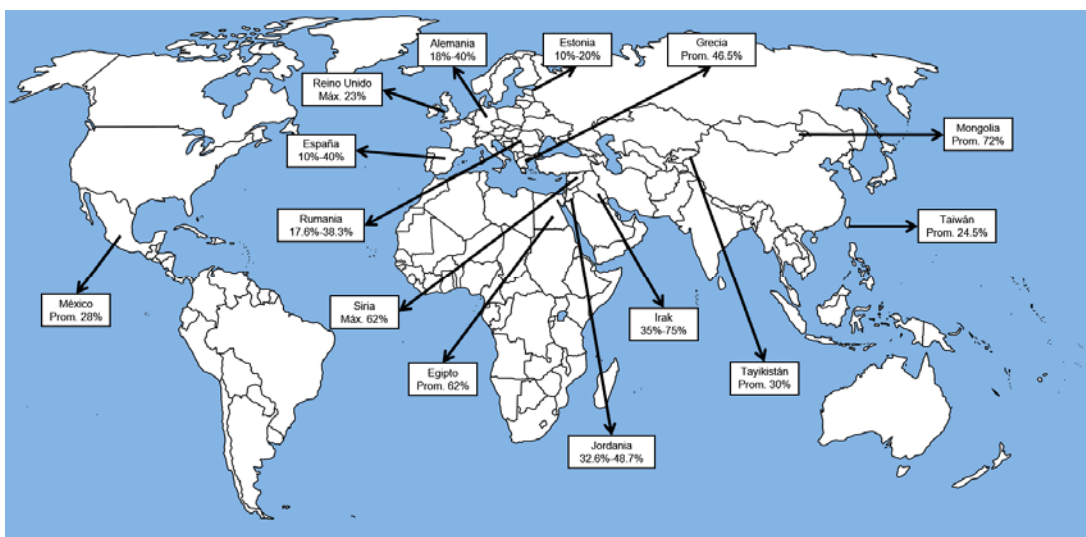


Figura 2. Desempeño de diferentes seguidores solares alrededor del mundo [6].

El aprovechamiento del espectro solar, para conversión de energía, ha cobrado importancia en algunos países, donde la disponibilidad de la energía eléctrica se está convirtiendo en un tema de desarrollo económico y social. Algunos de estos países son: Liechtenstein, Alemania e Italia los cuales se encuentran dentro de los líderes en el aprovechamiento de las energías alternativas [7]. Además, en algunos otros países, como Bangladesh o Malasia, se han diseñado sistemas que permiten aprovechar la energía solar haciendo uso de seguidores solares de dos ejes los cuales presentan una mayor eficiencia que los paneles solares estáticos en la captación de energía solar [8]; dicho sistemas se encuentran instalados en los techos de las viviendas y hacen uso de motores a pasos para lograr el posicionamiento solar y así reducir el consumo de energía; con este tipo de sistemas se muestra un uso más eficiente de la energía solar, pues su consumo energético es más bajo que el de otros tipos de motores, pero además ayuda a las comunidades de estos países en donde el problema de la demanda de energía está en aumento.

Para la realización del seguimiento solar, estos sistemas hacen uso de la implementación de resistores dependientes de luz (LDR, por sus siglas en inglés) que crean una diferencia de potencial basada en la incidencia de los rayos solares y de este modo es posible determinar el sentido de giro de los motores. Se implementan algoritmos básicos en microcontroladores, pero requieren de una computadora personal (PC, por sus siglas en inglés) para realizar el control usando programas como Simulink [9]; existen también sistemas que hacen uso de lógica difusa empleando el mismo método de sensado para determinar la posición del astro solar [10].

Existen también métodos que en lugar de sensores de luz utilizan las ecuaciones del seguimiento solar. Como ejemplo, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla se desarrolló un sistema de control empleando un entorno gráfico desarrollado en Labview que requiere el uso de una PC y una licencia de software para funcionar [11]. Algunos otros desarrollos obtienen los datos de la posición y tiempo mediante la interacción de un sistema de posicionamiento global y la

conexión a internet que haciendo uso de una PC se procesa la información y se envían señales a un microcontrolador que genera el movimiento de los actuadores [12].

Los modelos descritos anteriormente son parte del desarrollo que ha realizado la comunidad científica y se encuentran como prototipos experimentales; existen a su vez los modelos de tipo comercial adaptados exclusivamente para trabajo con paneles solares de grandes dimensiones físicas [13] y algunos otros que utilizan actuadores lineales en lugar de motores, lo cual aumenta su costo y tamaño [14].

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y fabricar un sistema autónomo de seguimiento solar que use las ecuaciones geométricas de la trayectoria solar aparente asociadas a un sistema de posicionamiento global y sensores de posición para su aplicación a un prototipo de laboratorio solar de dos grados de libertad.

1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar y sintetizar las ecuaciones geométricas que definen la trayectoria del sol.
- Diseñar y construir un prototipo de laboratorio solar de dos grados de libertad.
- Implementar una etapa de potencia para control del movimiento de los motores de corriente continua que manejan el prototipo.
- Diseñar e implementar un sistema de recopilación de datos del sistema de seguimiento solar con fines estadísticos y analíticos.
- Realizar una comparación entre los sistemas de seguimiento solar y los sistemas estáticos, tomando en cuenta la potencia eléctrica generada.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En México las regiones de mayor irradiación normal directa son las de los estados de Sonora, Chihuahua y el oriente de la península de Baja California, mientras las que abarcan Durango, Zacatecas, Aguascalientes y la mayor parte de Puebla,

Guerrero y Oaxaca cuentan con un promedio anual de aproximadamente 6.2 kWh/m²/día [15]. La figura 3 muestra estas regiones y su irradiación normal directa.

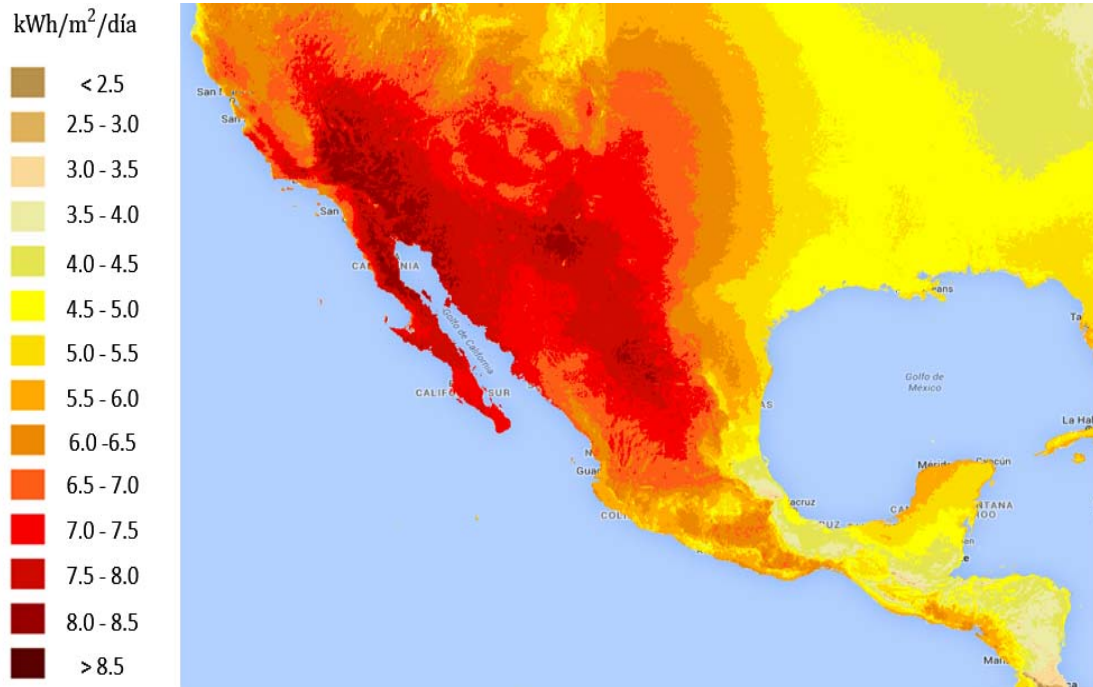


Figura 3. Irradiación normal directa en México anual [16].

Dada la disponibilidad de este recurso energético; se hace necesario incrementar la capacidad de los sistemas para el aprovechamiento en mayor medida de la energía solar en la región. Tomando en cuenta la información recabada acerca de otros sistemas de seguimiento solar alrededor del mundo, se propone implementar un sistema más robusto, es decir: que tenga base en datos actuales y en tiempo real, que sea modulable acorde a los requerimientos del usuario, que sea actualizable, es decir, que los componentes puedan ser reemplazados por elementos más recientes y que además sean compatibles con los protocolos de comunicación existentes. Dentro de estos criterios se contempla entre estos componentes, los radios de posicionamiento global, los sensores de posición y/o los sistemas de comunicación.

Actualmente existe una tendencia mundial de gran interés y necesidad sobre el aprovechamiento de los recursos energéticos que provienen de energías renovables, fundamentalmente la energía solar. Bajo este contexto la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y algunas otras universidades, incorporan a su oferta académica la Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables. Para atender esta necesidad, es necesario diseñar y crear herramientas que coadyuven a la eficiencia en el aprovechamiento de la energía solar y que además contribuyan al desarrollo profesional de los estudiantes de las distintas licenciaturas ofertadas en estas instituciones de educación superior. Esta herramienta será aplicable para su uso en medios de conversión y aprovechamiento de energía solar a través de aplicaciones termosolares y fotovoltaicas; así como, al desarrollo de las competencias profesionales y académicas de los estudiantes. Debido a que el sistema propuesto es modulable, se crea la posibilidad de interactuar con distintos elementos del propio sistema para cubrir distintas necesidades como el uso de paneles solares de distintas dimensiones, por mencionar un ejemplo. Se deja abierta también la posibilidad hacia los estudiantes, para que puedan utilizar este prototipo como instrumento para la implementación y experimentación de funciones de control, ecuaciones de trayectoria solar y experimentación con diferentes dispositivos de conversión de energía.

Se espera que este trabajo propicie un alto impacto tecnológico, económico y ambiental ya que fomenta la utilización de métodos que favorecen el aprovechamiento de los recursos renovables, en especial uno tan vasto e inagotable como lo es el sol. La aplicación de estas tecnologías aumenta con el paso de los días observando un crecimiento en el aprovechamiento de los recursos energéticos. Este desarrollo permite a su vez generar un impacto social hacia la comunidad, en especial a los alumnos de educación media superior y superior que estén interesados en conocer acerca de las alternativas que existen en el rubro de la producción de energía; además que podrá ayudar a los alumnos interesados en control automático para realizar experimentos en un sistema real. Existen variadas aplicaciones para este sistema, entre las que destacan las de

producción de energía, pero también se tiene un enfoque a la investigación como parte importante del desarrollo de tecnología nueva.

1.3 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Es necesario crear un sistema de seguimiento solar que permita incrementar el rendimiento en la captación de energía solar, que además sea amigable y práctico para el usuario, de bajo costo y sin requerir el uso de un equipo de cómputo para realizar el procesamiento de ecuaciones y el monitoreo de las variables asociadas al proceso. Es así como se plantea el diseño, desarrollo, fabricación e implementación de un sistema capaz de realizar el seguimiento solar a través del análisis y síntesis de las ecuaciones trigonométricas que definen la trayectoria solar aparente. Se busca crear un sistema que funcione de manera autónoma para realizar el seguimiento solar para cualquier ubicación geográfica, con el propósito de lograr la mayor eficiencia en la transformación de energía solar a energía eléctrica. El sistema propuesto tiene un funcionamiento predictivo y portable que no está limitado en su funcionamiento por las condiciones de la radiación solar para realizar el seguimiento solar, como es el caso de otros dispositivos.

Los elementos empleados en el sistema proporcionan en tiempo real, la información necesaria para estudiar el fenómeno del seguimiento solar. Entre estos elementos se encuentran, los sistemas de posicionamiento global que permiten obtener la ubicación del dispositivo en el momento en que se hace el estudio. Es necesario también conocer horario solar, es así que se hace uso de un reloj en tiempo real. El sistema incluye también los medios de almacenamiento y envío de información con fines estadísticos para futuros casos de estudio; es decir, se incluyen tablas con la información recibida por el sistema, datos almacenados en una memoria que puede ser extraída de manera sencilla y que es compatible para trabajar con dispositivos y programas especializados en el estudio de información estadística.

El utilizar elementos de fácil acceso y comprensión, incrementa la habilidad del usuario para manipular los diferentes elementos que integran el proyecto con el propósito de impulsar su implementación en diferentes áreas de la sociedad. De

esta forma se permite a estudiantes y usuarios en general, entender la importancia de contar con sistemas más eficientes para la obtención de energía y proporcionar las bases teóricas y prácticas de cómo realizar e implementar dichos sistemas sin la necesidad de ser expertos en el tema; de esta manera, poder hacer uso de los recursos que a diario se tienen sin recurrir a una computadora, lo que podría resultar en un gasto excesivo, tanto de dinero como de energía. El sistema propuesto cuenta con cualidades que le permiten ser adaptado a sistemas de diferente magnitud; desde sistemas de laboratorio solar, hasta sistemas de generación de dimensiones similares a las de campos de paneles fotovoltaicos.

Por su practicidad y movilidad, el prototipo genera una interacción mayor con el usuario final. La interacción a través de un objeto sencillo de manipular, como lo es el prototipo propuesto, abre un amplio panorama para que las personas descubran los fenómenos que por años han estado a la vista de la humanidad, pero que han quedado reservados a una parte de la comunidad científica como algo extraordinario.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento se encuentra integrado por cuatro capítulos principales; donde se explica el desarrollo de cada uno de los elementos claves de este trabajo, un glosario de términos para permitir al lector una mejor comprensión del texto y una serie de apéndices complementarios con fines informativos.

En el Capítulo 1 se da una introducción al trabajo, así como la justificación y delimitación de los objetivos.

En el Capítulo 2 se muestra la teoría utilizada en este trabajo y que permite conocer los elementos fundamentales del seguimiento solar. Se describen también los elementos electrónicos y su interacción con el sistema; así como, los elementos mecánicos.

El Capítulo 3 describe la metodología de trabajo y como se integra la teoría previamente analizada, explicada y detallada en el capítulo 2 para poder alcanzar los objetivos propuestos.

En el Capítulo 4 se hace el análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales, se analiza la información recabada y se explican los fenómenos ocurridos y observados.

Finalmente, después de estudiar los capítulos anteriormente mencionados, se procede a dar una conclusión del trabajo y los posibles desarrollos a futuro.

Una sección de apéndices es integrada en la parte final del documento. En esta sección pueden ser consultadas las hojas de especificaciones de los dispositivos utilizados, así como los dibujos técnicos del prototipo de laboratorio solar y los códigos desarrollados para este sistema.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Si se empleara el tiempo para fijar la vista hacía el sol durante todos los días del año y a la misma hora, se podría percibir que no siempre se encuentra en el mismo lugar; esto es ocasionado por dos fenómenos explicados a continuación.

Se sabe que la Tierra cumple con un ciclo de rotación sobre su propio eje cubierto en un lapso de 24 horas, lo que da origen al día y la noche. Sin embargo, el eje sobre el cuál nuestro planeta gira diariamente, se encuentra inclinado 23.5° respecto al eje eclíptico. La figura 4 muestra gráficamente como afecta el ángulo de inclinación a la incidencia de los rayos solares respecto a la superficie terrestre para distintas épocas del año. Esta inclinación de la Tierra produce que el hemisferio norte se incline hacia el Sol en verano y se aleje de éste en invierno; creando así las estaciones del año y ocasionando también cambios en la posición del sol a lo largo del día y del año respecto a un observador ubicado en la Tierra [17].

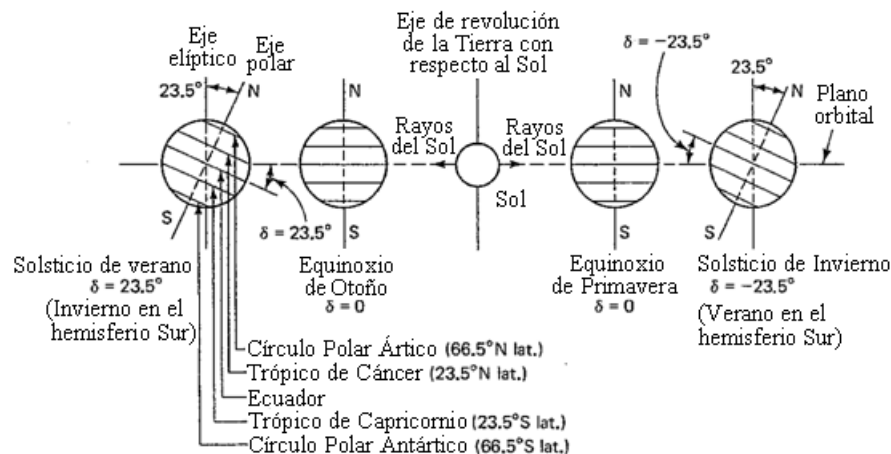


Figura 4. Comportamiento de la incidencia solar en diferentes etapas del año.

En la figura 4 se observa que el valor de la declinación varía de entre 0° en el equinoccio de primavera hasta $+23.5^\circ$ en el solsticio de verano y de entre 0° en el equinoccio de otoño hasta -23.5° al solsticio de invierno.

El segundo fenómeno es conocido como excentricidad orbital y se ocasiona debido a que el planeta Tierra gira alrededor del Sol una vez cada 365 días siguiendo una trayectoria elíptica, causando que ambos cuerpos se encuentren distanciados de manera irregular a lo largo de este tiempo, el punto más cercano entre ambos astros, llamado Perihelio, se observa en diciembre a una distancia de 147 millones de kilómetros; mientras que, el Afelio ocurre en julio a una distancia de 152 millones de kilómetros, como se muestra en la figura 5.

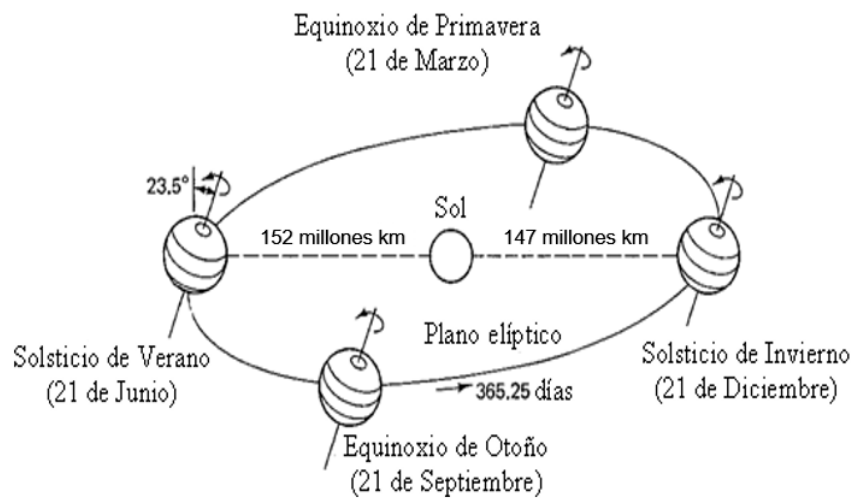


Figura 5. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol a lo largo de un año.

Ambos fenómenos crean la llamada Analema Solar, una trayectoria patrón que sigue el Sol a lo largo del año y que varía dependiendo de la posición del observador. Esta trayectoria indica el punto más alto en que se encuentra el sol o también conocido como mediodía solar [17]. En la figura 6 se puede ver un esquema ilustrativo de cómo este fenómeno es observado desde la ciudad de Figueres, España.

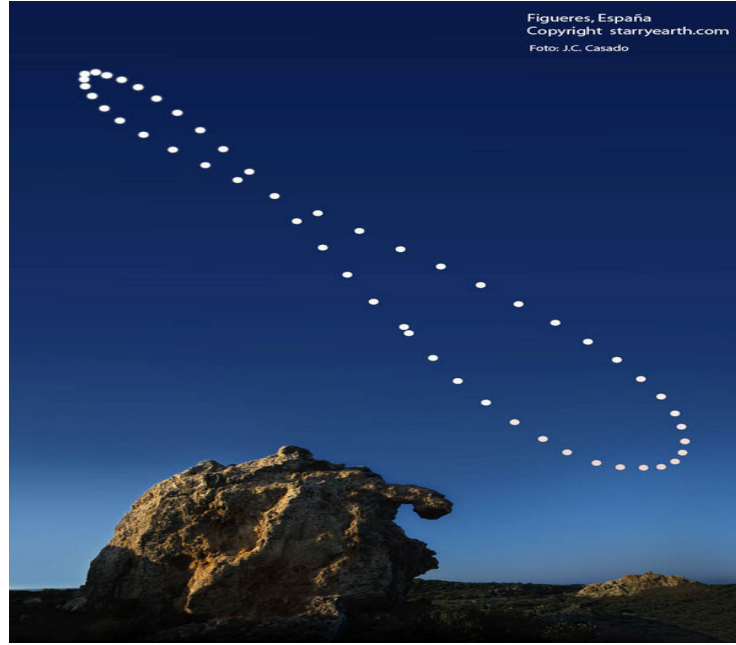


Figura 6. Analema Solar observado en Fígueres, España.

Es importante mencionar que, junto con los efectos en el seguimiento de la trayectoria solar, existen medidas del tiempo distintas a la hora estándar como: la Hora Solar Local (*HSL*), la Hora Local (*HL*) y la Hora Estándar Local Meridiana (*HELM*). La *HSL* y *HL* usualmente varían una respecto a la otra debido a la excentricidad orbital y a ajustes humanos como el Horario de Verano o las zonas horarias [18].

La *HELM* es una referencia usada para las distintas zonas horarias y es obtenida mediante la ecuación 1.

$$HELM = 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT} \quad (1)$$

En la ecuación 1, ΔT_{GMT} indica la diferencia horaria entre el punto en que se está realizando el seguimiento y el tiempo base del Meridiano de Greenwich.

Una vez que se han descrito los diferentes fenómenos que causa el movimiento de la tierra respecto al sol, los científicos crearon una ecuación que ayuda a corregir los efectos de la excentricidad y el ángulo de inclinación de la Tierra, esta

ecuación es llamada Ecuación de Tiempo (ET) [19] y está descrita por la ecuación 2.

$$ET = 9.87\text{sen}(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5\text{sen}(B) \quad (2)$$

De la ecuación 2 se desprende B , siendo ésta la relación mostrada en la ecuación 3.

$$B = \frac{360}{365}(d - 81) \quad (3)$$

En la ecuación 3 la variable d es el número de días que han transcurrido desde el inicio del año hasta el momento de realizar el seguimiento, siendo 1 para el 1ro de enero y tomando el valor de 365 para el 31 de diciembre.

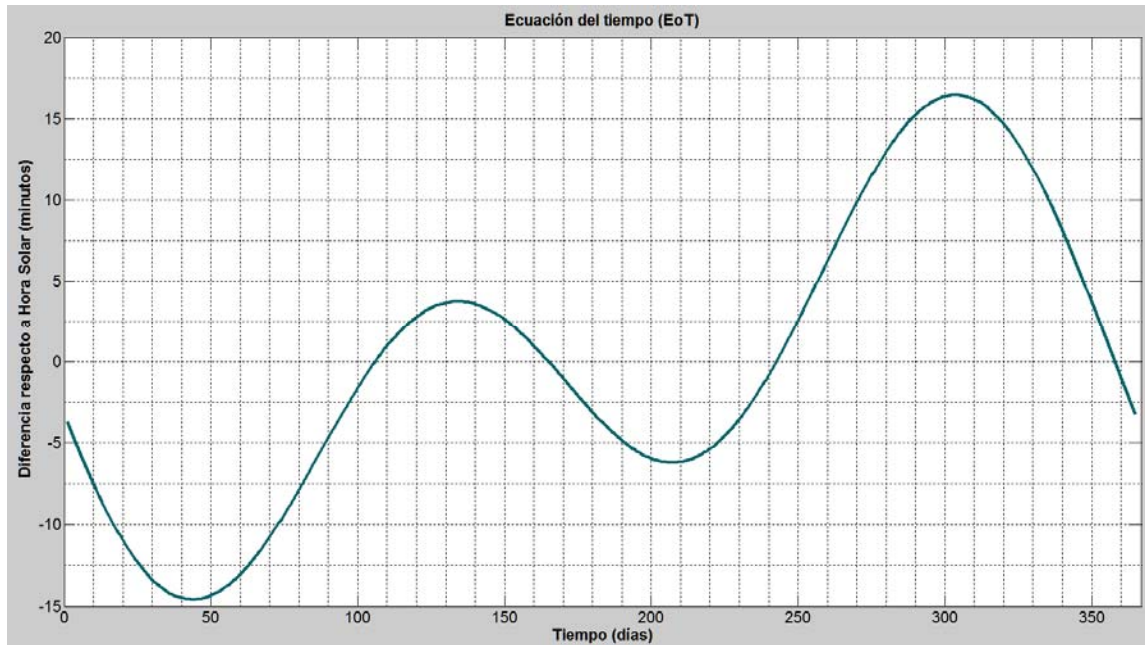


Figura 7. Ecuación del Tiempo a lo largo del año graficado en MATLAB [19].

La Corrección del Tiempo (CT) es otro factor utilizado para contrarrestar los efectos de la variación entre zonas horarias con la HSL .

$$CT = 4(\text{Longitud} - \text{HELM}) + ET \quad (4)$$

En la ecuación 4 se utiliza el número cuatro como factor debido a que la Tierra gira 1° cada 4 minutos como se observa en la ecuación 5.

$$\frac{24 \text{ hr} * \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}}}{360^\circ} = \frac{1440 \text{ min}}{360^\circ} = 4 \frac{\text{min}}{^\circ} \quad (5)$$

Conociendo los factores de corrección podemos ahora conocer la Hora Solar Local (*HSL*) correspondiente a nuestra posición para así poder ajustar la *HL* mediante el uso de la ecuación 6.

$$HSL = HL + \frac{CT}{60} \quad (6)$$

Sabiendo cómo se comporta el tiempo respecto a la posición geográfica en donde se desea realizar el seguimiento solar ahora es necesario obtener la forma en que el Sol varía su posición. Un elemento que permite hacer este análisis es la llamada relación Hora-Ángulo (*HRA*), que como su nombre lo indica, crea una relación entre el ángulo de movimiento de la Tierra respecto a la hora del día.

$$HRA = 15^\circ (HSL - 12) \quad (7)$$

El factor de 15°, mostrado en la ecuación 7, corresponde al número de grados que el sol se mueve cada hora, el cual se obtiene de dividir 360° entre 24 horas de las que se compone cada día.

Hasta ahora se han tratado los efectos correspondientes al movimiento de rotación de nuestro planeta, pero no hay que olvidar que también existe el fenómeno de inclinación del eje imaginario de rotación de la tierra, el cual tiene un gran efecto en relación con el estudio del seguimiento solar. Previamente se mencionó que el ángulo de inclinación de la Tierra es de 23.5° y es a raíz de este ángulo que surge el término de declinación solar (δ) [19].

La variación de la declinación solar a lo largo de un año se muestra en la figura 8, en donde se puede observar que ésta se comporta de manera muy similar a una función Gaussiana.

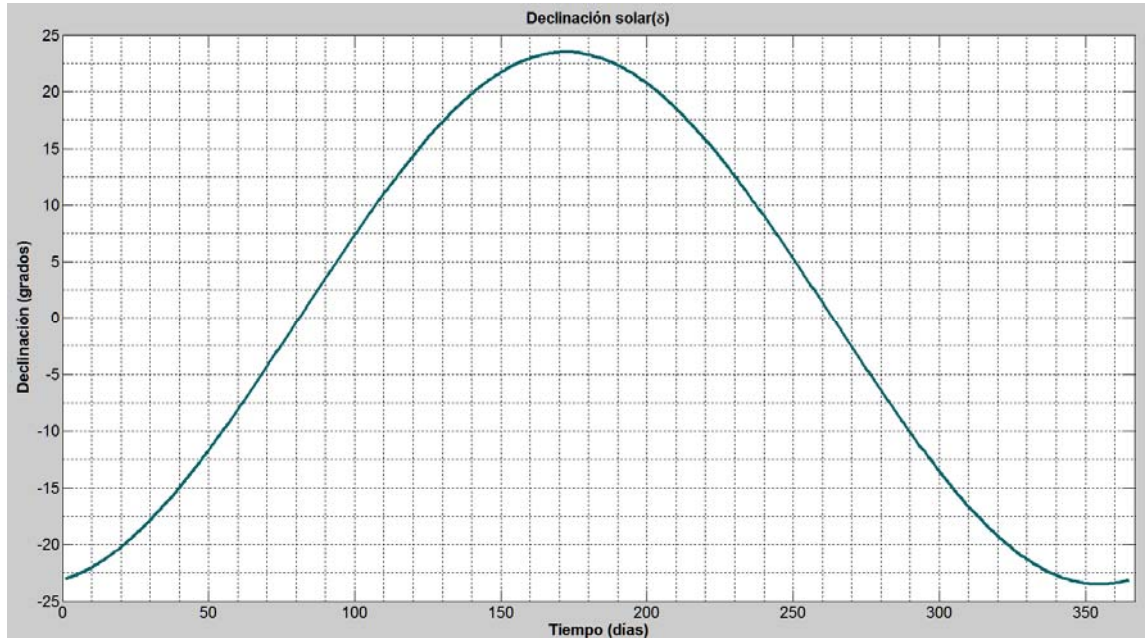


Figura 8. Variación de la declinación solar a lo largo del año graficado en MATLAB [19].

La declinación es la diferencia que existe entre el ángulo de inclinación de la tierra y el centro del Sol. Se expresa en términos del ángulo de inclinación de la Tierra y al día en que se hace su estudio como se aprecia en la ecuación 8.

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left(\text{sen}(23.5) * \text{sen} \left(\frac{360}{365} (d - 81) \right) \right) \quad (8)$$

2.1 LOS ÁNGULOS DEL SEGUIMIENTO SOLAR

Son dos los ángulos determinantes que se deben conocer al momento de realizar el estudio del seguimiento solar; estos son el ángulo de elevación solar (α) y el ángulo de azimut solar (Φ) [19] los cuales se pueden apreciar de manera gráfica en la figura 9.

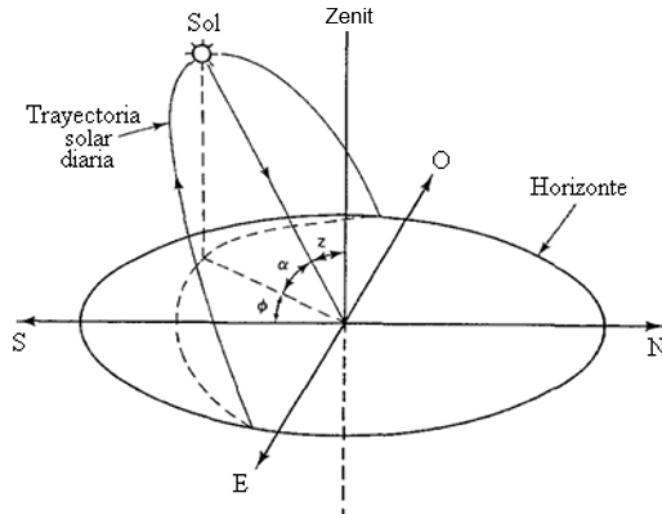


Figura 9. Trayectoria aparente del Sol y definición del ángulo cenital solar z , ángulo de elevación solar α y ángulo de azimut solar ϕ .

La figura 10 muestra a un punto P , como analogía con el observador que necesita realizar el seguimiento solar, y cómo éste se representa sobre la superficie de la Tierra. Se definen de manera gráfica los elementos clave que determinan la posición del observador. La latitud L del observador P , es la distancia angular de un punto desde el Norte (o hacia el Sur) hasta el ecuador, la latitud al Norte es designada como positiva. L se mide como el ángulo entre las líneas OP y la proyección de OP sobre el plano ecuatorial, donde O es centro de la tierra.

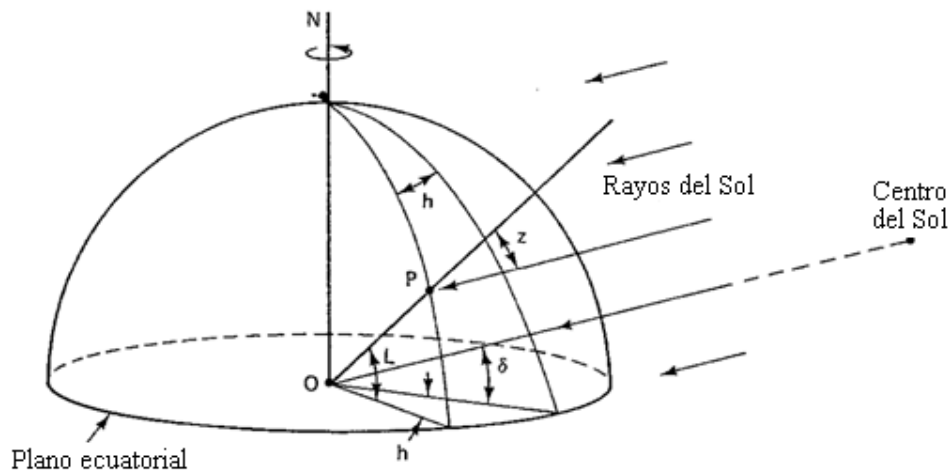


Figura 10. Definición de latitud L , hora angular h , y la declinación solar δ .

El ángulo de elevación solar (α) indica cuál es la altura que tiene el Sol respecto al plano horizontal de la superficie donde se encuentra el observador. La elevación está relacionada directamente a la declinación, la latitud y la relación hora-ángulo siendo descrito este ángulo por la ecuación 9.

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(\text{sen } \delta \text{ sen } L + \cos \delta \cos L \cos HRA) \quad (9)$$

Complementario a α se tiene el ángulo de zenit (z), que es la diferencia de α respecto al plano vertical o línea zenit, de donde obtiene su nombre. Por esto mismo la suma de ambos ángulos, zenit y elevación, es igual a 90° como se aprecia en la ecuación 10 y se dibuja gráficamente en la figura 11.

$$z + \alpha = 90^\circ \quad (10)$$

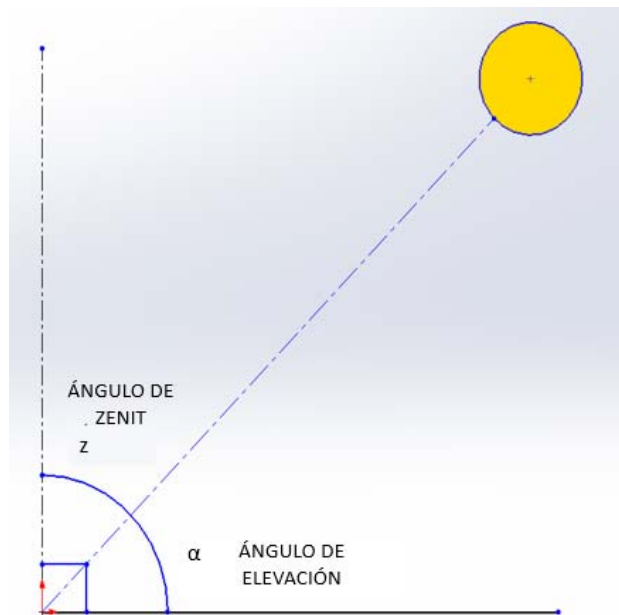


Figura 11. Esquema de interpretación de los ángulos de elevación (α) y zenit (z).

El segundo de los ángulos más importantes es el llamado ángulo azimutal o ángulo de azimut solar (Φ). Este ángulo indica la posición que guarda el Sol respecto al Norte. El ángulo Φ toma en cuenta como variables dependientes para su cálculo a L , δ y HRA , así como al ángulo de elevación α , descrito anteriormente. El ángulo

azimutal se define mediante la ecuación 11 y su trayectoria se representa de manera similar a como lo haría una brújula, marcando ángulos en una gama entre 0° hasta 360°. La figura 12 muestra una analogía gráfica del comportamiento del ángulo de azimut en relación a un compás y la gama de ángulos que puede ocupar.

$$\Phi = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \delta \cos L - \cos \delta \sin L \cos HRA}{\cos \alpha} \right) \quad (11)$$

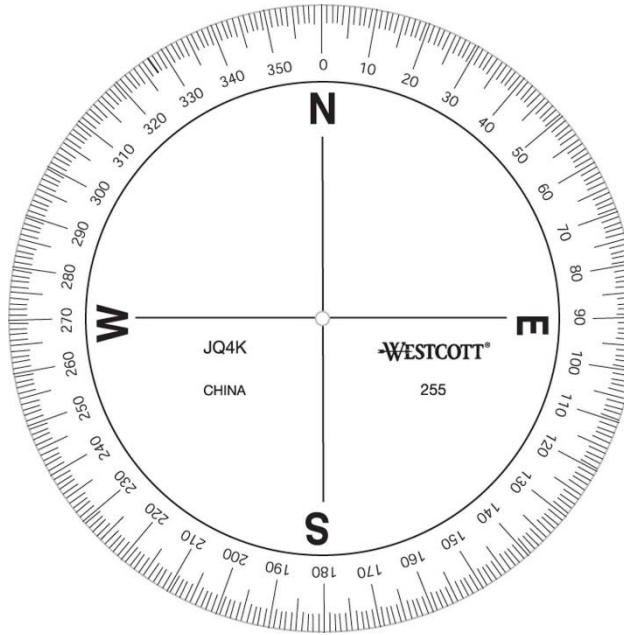


Figura 12. Analogía gráfica del ángulo de azimut solar con relación a un compás.

Es importante tener en cuenta que, si la *HSL* es mayor a 12 horas, la ecuación 11 se debe ajustar al cambio del medio día aplicando la ecuación 12.

$$\Phi_{<12} = 360^\circ - \Phi \quad (12)$$

2.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los microcontroladores son sistemas electrónicos que permiten el procesamiento de información para la realización de muchas actividades de la vida cotidiana, industrial y científica. Son capaces de generar señales eléctricas a partir de información que procesan en su interior que son después interpretadas para realizar tareas específicas. Actualmente existen varios tipos de

microcontroladores de diferentes fabricantes y dirigidos a segmentos de mercado específicos, tal es el caso de la telefonía móvil, la medicina, el hogar y muchas aplicaciones más [20].

Para este trabajo se decidió hacer uso de los microcontroladores de la empresa ATMEL. En particular, del microcontrolador Atmega2560 montado sobre la tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560 observable en la figura 13. Esta tarjeta está acondicionada para su operación con 54 puertos de entrada y salida digital (I/O), 16 puertos analógicos, 15 canales PWM (Pulse-Width Modulation, por sus siglas en inglés), posibilidad de implementación de protocolos de comunicación como I2C, SPI y Serial. Arduino es un dispositivo de código y hardware abierto por lo que se permite hacer desarrollos con esta tarjeta sin tener que pagar una licencia de uso y que además pone a disposición del público los diagramas esquemáticos de construcción para darle mayor flexibilidad a los desarrollos y cuya arquitectura puede ser consultada en el Apéndice A.

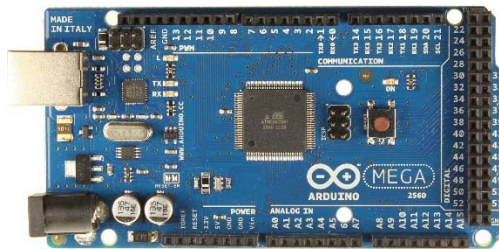


Figura 13. Tarjeta de Desarrollo Arduino Mega 2560.

Para poder hacer uso de las cualidades de la tarjeta Arduino Mega 2560 es necesario la codificación de un “sketch” o programa, escrito sobre el ambiente de desarrollo (IDE por sus siglas en inglés) creado por la misma empresa Arduino y cuya interfaz de trabajo se muestra en la figura 14.

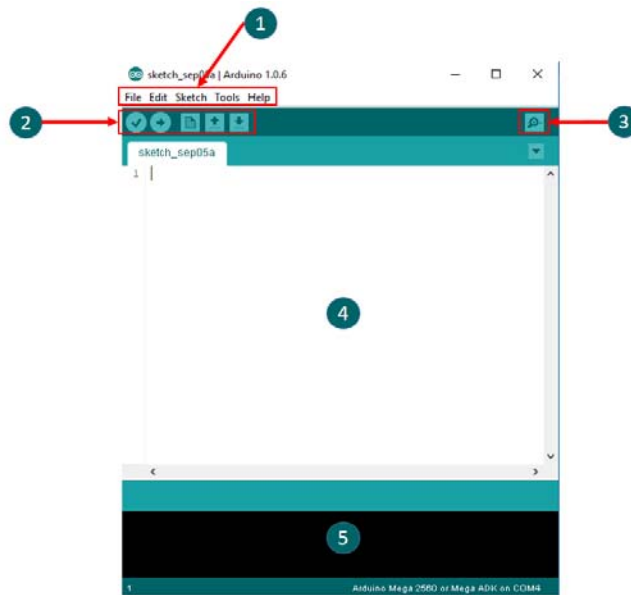


Figura 14. Ambiente de desarrollo de Arduino en un sistema operativo en plataforma Windows.

Es importante estar familiarizado con cada una de las partes que componen al IDE. En la figura 14 se puede observar que se destacan 5 zonas importantes; el punto 1 representa el menú principal, donde se pueden crear nuevos “sketch”, editar programas y configurar las características de la programación; el punto 2 es el menú de compilación que ayuda para verificar que el programa esté redactado adecuadamente y pueda ser enviado para su escritura en el microcontrolador; el punto 3 es el botón de ejecución del monitor serial que se encarga de recibir información desde el microcontrolador para observar su comportamiento; el punto 4 es el área de edición de los programas donde se escriben todas las instrucciones requeridas y finalmente el punto 5 es la consola de estado de compilación que indica si existe algún problema con la tarjeta o con la estructuración de los programas.

Al microcontrolador se carga el sketch con las instrucciones que se desean ejecutar, esto se hace a través de una computadora mediante el uso de un cable de datos y una interfaz de comunicación serial integrada en la tarjeta de desarrollo junto al microcontrolador. La codificación está escrita en un lenguaje muy similar a los lenguajes C y C++, pues hace uso de comandos similares a ambos lenguajes como lo son, la declaración de objetos y de las estructuras básicas de

programación como if, while, case y for. El IDE puede ser instalado en sistemas operativos basado en Windows, Linux o Mac. Esto le da a la plataforma Arduino una mayor flexibilidad de trabajo que además permite y favorece a la existencia de una gran comunidad que se encuentra en constantemente trabajo bajo el proyecto Arduino, haciendo que la literatura sea demasiado amplia y el equipo de soporte mucho más grande y global.

Para poder hacer el análisis de las variables que interesan en este proyecto es necesario conocer cada uno de los elementos que integran al sistema y como trabajan en conjunto con el microcontrolador; entre estos elementos se encuentran los protocolos de comunicación, los sistemas mecánicos y la obtención de las variables dependientes de las ecuaciones del seguimiento solar.

2.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN I2C

El protocolo I2C (IIC por sus siglas en inglés), es un canal de comunicación serial síncrono de dos líneas que fue originalmente desarrollado por Phillips Semiconductors (ahora NXP Semiconductors) desde los inicios de los años 80. Hoy es un estándar aceptado y respaldado por los fabricantes de dispositivos semiconductores para la comunicación de dispositivos electrónicos [21].

El protocolo I2C permite la comunicación entre múltiples dispositivos, todos conectados paralelamente a dos líneas bidireccionales: una línea de datos llamada SDA y una línea de reloj llamada SCL. La transferencia de datos siempre se realiza entre dos dispositivos a la vez y en una relación maestro – esclavo. SDA se encarga de conducir los datos entre el dispositivo maestro y los esclavos. SCL es la señal de reloj que sincroniza los datos que se transmiten por SDA, esta comunicación se muestra en la figura 15.

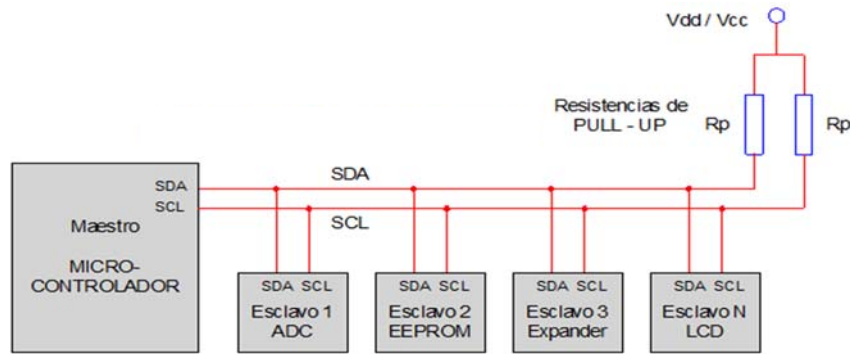


Figura 15. Esquema de conexión de un bus I2C con un maestro y varios esclavos.

El dispositivo maestro (usualmente un microcontrolador) es quien siempre tiene la iniciativa de la comunicación: el maestro genera la señal de reloj y controla cuando se transmiten o reciben los datos. Puede haber varios esclavos en la red I2C, pero el maestro solo se comunica con uno a la vez. Cada dispositivo esclavo es identificado por una dirección única de 7 bits, lo cual permite hasta un máximo de 128 dispositivos conectados a la red I2C [21].

Los datos y direcciones que se transmiten por SDA son enviados en paquetes de 8 bits donde tras cada bloque de información enviado debe recibirse una señal de reconocimiento o ACK, que identifica el final de la cadena de datos, esta cadena se muestra en la figura 16.

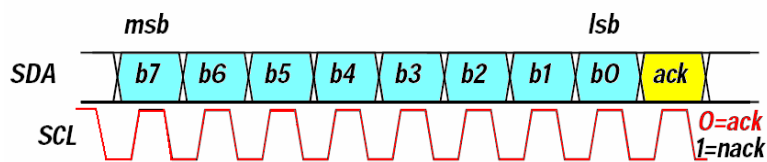


Figura 16. Envío de información por el bus I2C.

En el protocolo I2C el reloj maestro determina la velocidad de transmisión de los datos, normalmente los fabricantes de dispositivos comerciales trabajan bajo una velocidad de transmisión de datos de 9600 baudios o 9600 bits/s.

2.4 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SERIAL

El protocolo serial es uno de los protocolos de comunicación más comunes y utilizados en la actualidad. Éste puede ser utilizado para la adquisición y envío de datos mediante la transmisión de paquetes de información un bit a la vez. La comunicación se realiza mediante el uso de tres líneas de transmisión: Tierra o Referencia (GND), Recepción (RX) y Envío (TX) [22].

La transmisión es asíncrona, lo que permite enviar datos por una línea mientras se reciben datos por la otra. La figura 17 muestra un ejemplo de comunicación serial entre un microcontrolador y una PC.

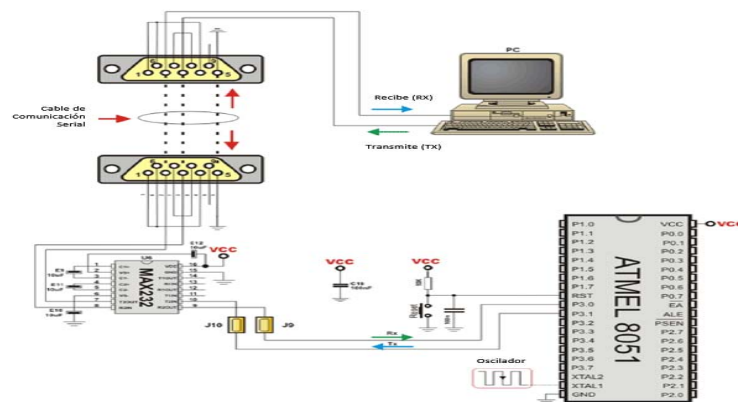


Figura 17. Diagrama de conexión de la comunicación serial entre un microcontrolador y una computadora.

Entre las características que definen la comunicación serial se encuentran, la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, y la paridad. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características sean iguales en ambos dispositivos.

La velocidad de transmisión indica el número de bits por segundo que se transfieren, y se mide en baudios. Cuando se envían paquetes de información, el tamaño bits de ese paquete puede variar. Las cantidades más comunes de bits por paquete son 5, 7 y 8 bits; el número de bits que se envía depende del tipo de información que se transfiere. Se usa un bit de paro para indicar el fin de la comunicación de un solo paquete.

Debido a la manera como se transfiere la información a través de las líneas de comunicación, y que cada dispositivo tiene su propio reloj, es posible que los dos dispositivos no estén sincronizados. Así, los bits de parada no sólo indican el fin de la transmisión, sino que además dan un margen de tolerancia para esa diferencia que pudiese existir entre los relojes de cada dispositivo conectado a la red serial. Mientras más bits de parada se usen, mayor será la tolerancia a la sincronía de los relojes, sin embargo, la transmisión será más lenta. Finalmente, la paridad es una forma sencilla de verificar si hay errores en la transmisión serial. Existen cuatro tipos de paridad: par, impar, marcada y espaciada. La opción de no usar paridad alguna también está disponible. Para paridad par e impar, el puerto serial fijará el bit de paridad (el último bit después de los bits de datos) a un valor para asegurarse que la transmisión tenga un número par o impar de bits en estado alto lógico

2.5 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SPI

La interfaz serial periférica (SPI, por sus siglas en inglés) es un bus de tres líneas sobre el cual se transmiten paquetes de información de 8 bits. Cada una de estas tres líneas porta la información entre los diferentes dispositivos conectados al bus. Cada dispositivo conectado al bus puede actuar como transmisor y receptor al mismo tiempo, por lo que este tipo de comunicación serial se denomina dúplex completa, aunque algunos dispositivos solo pueden ser transmisores y otros solo receptores, esto queda determinado por el fabricante. Dos de las tres líneas transfieren datos, una línea por dirección de envío, y la tercera línea es el reloj. Cada esclavo es controlado sobre el bus a través de una línea selectora llamada “*chip select*” o “*select slave*” (CS o SS por sus siglas en inglés, respectivamente), por lo tanto, un dispositivo esclavo es solicitado únicamente cuando su propia línea de selección es habilitada. Cualquier dispositivo esclavo que no esté seleccionado, debe deshabilitarse mediante una alta impedancia a través de la línea selectora [23].

La señal sobre la línea de reloj (SCLK) es generada por el maestro y sincroniza la transferencia de datos. El bus de transferencia de datos es conocido como MOSI

quien transporta los datos del maestro hacia el esclavo y el bus MISO transporta los datos del esclavo hacia el maestro. Los datos sobre este bus pueden ser transmitidos a una razón de hasta 1 megabit por segundo.

En la figura 18 se muestra un diagrama de cómo se interrelaciona un dispositivo maestro con diferentes esclavos mediante uso del bus SPI.

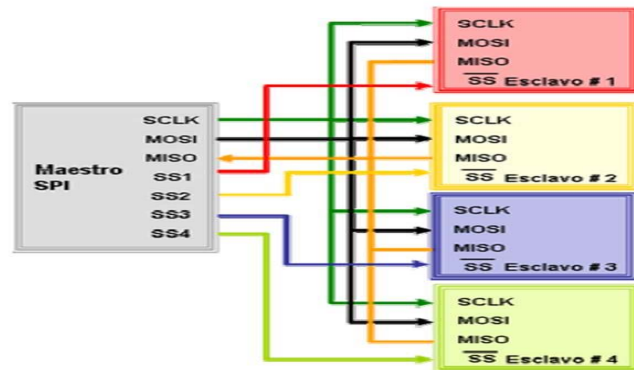


Figura 18. Diagrama de conexión Maestro-Esclavo del bus SPI.

2.6 RELOJES EN TIEMPO REAL

Los Relojes en Tiempo Real (RTC por sus siglas en inglés) son circuitos integrados que se encargan de medir el tiempo en sistemas embebidos, incluso si no existe energía eléctrica suministrada al dispositivo en el que se encuentran conectados pues integran una memoria que guarda la información. Durante este tiempo los RTC toman energía auxiliar de una batería o un supercapacitor, lo cual propicia que sigan realizando su función, pero con un bajo consumo de energía [24].

En la figura 19 se muestra un módulo de RTC que hace uso del protocolo de comunicación I2C. En esta figura se observan los componentes principales de un RTC: el número 1 es la memoria que almacena la información del tiempo, el número 2 es el circuito integrado que se encarga de hacer las operaciones del conteo del tiempo y el número 3 es la batería que permite que los datos del tiempo no sean borrados o reiniciados. Estos dispositivos son capaces de llevar la cuenta de segundos, minutos, horas, días, meses y años.

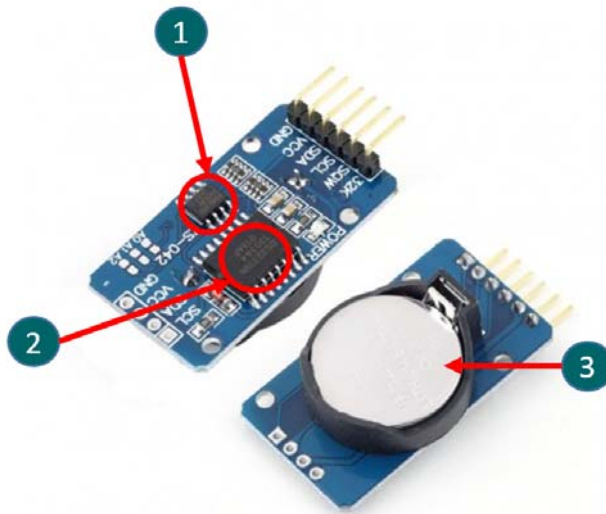


Figura 19. Módulo RTC DS3231 con protocolo I2C.

Los RTC son programados a las necesidades de operación requeridas estableciendo los parámetros iniciales e inmediatamente llevan la cuenta automática del tiempo, haciendo uso de sus componentes electrónicos internos. Las especificaciones técnicas se muestran en el Apéndice B.

2.7 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

Los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) son elementos de navegación basados en redes de satélites capaces de determinar la ubicación de cualquier elemento que haga uso de estos con una gran exactitud. Este sistema está compuesto por 24 satélites pertenecientes al gobierno de los Estados Unidos de América y 24 más del estado ruso, todos circulando alrededor de la Tierra durante las 24 horas del día. La figura 19 muestra el segmento espacial GPS con la distribución de los satélites alrededor del globo terráqueo. Una parte importante del servicio GPS es que no existen cargos o cuotas para poder hacer uso de esta red [25].

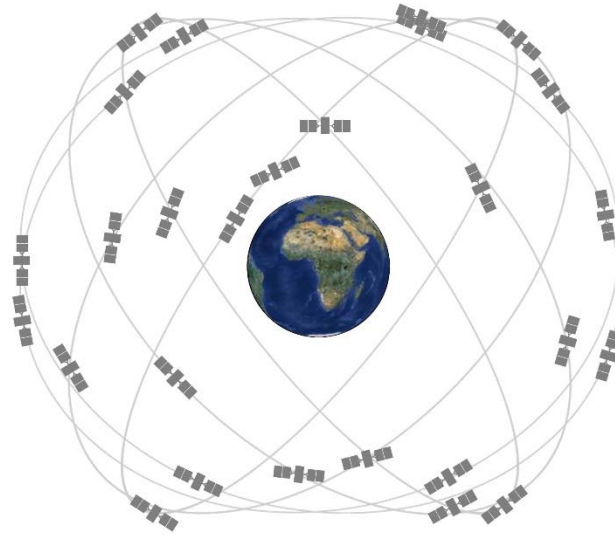


Figura 20. Segmento espacial del sistema GPS.

El arreglo de satélites está diseñado de tal forma que siempre habrá un mínimo de 4 satélites visibles en una distancia de 15° para cualquier punto de la superficie terrestre. Los receptores GPS usan diferentes códigos para distinguir entre los distintos satélites disponibles.

La forma de operación de esta red consiste en medir la distancia de los satélites al receptor sobre la Tierra. Conociendo la distancia existente entre tres puntos diferentes respecto al lugar de interés es posible determinar la posición relativa que guarda el dispositivo hacia estos puntos, como se ve en la figura 21.

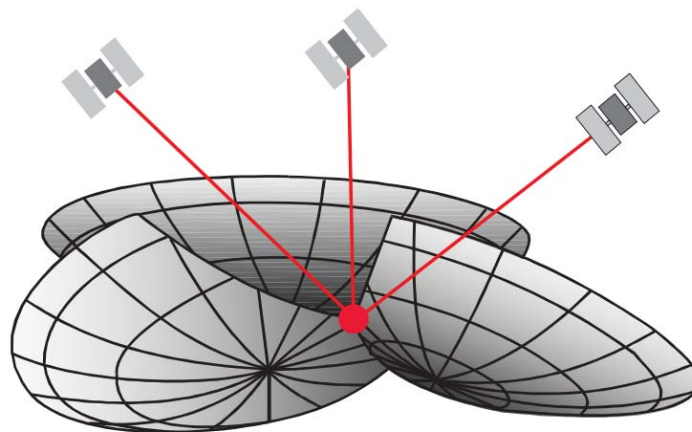


Figura 21. Tres satélites GPS determinando la posición relativa.

Para determinar una mejor posición global del dispositivo en las tres dimensiones de interés es necesaria la recepción de un mínimo de cuatro satélites como se ilustra en la figura 22, las especificaciones técnicas del GPS se muestran en el Apéndice C.

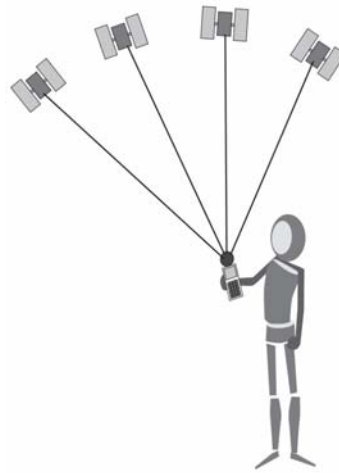


Figura 22. Incógnitas a resolver; posición (X, Y, Z) y tiempo de viaje de la señal.

2.8 MEMORIAS DE SEGURIDAD DIGITAL

Las tarjetas de memoria de seguridad digital (SD por sus siglas en inglés) son medios compactos de almacenamiento que proveen una gran capacidad de resguardo de información. Son utilizadas en diversos dispositivos portátiles tales como cámaras de video, teléfonos inteligentes, sistemas de audio y computación. Son usadas desde 1999 y están disponibles en diferentes capacidades de almacenamiento alcanzando, hasta este día, los 128 gigabytes con dos tamaños principales: SD y microSD.

Este tipo de memorias trabajan bajo el protocolo de comunicación SPI por lo que pueden ser conectadas a un microcontrolador para almacenar o extraer información [26]. En la figura 23 se muestra como se identifican cada una de las conexiones de una memoria SD y una microSD y su relación con el protocolo SPI.

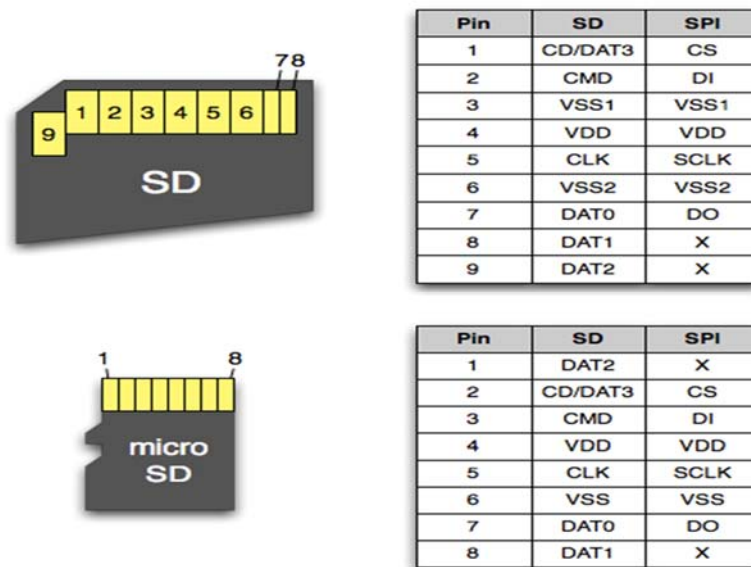


Figura 23. Descripción de las conexiones de las memorias SD y microSD.

2.9 ACELERÓMETRO

Los acelerómetros son dispositivos electromecánicos capaces de medir la razón de cambio en la velocidad de un objeto respecto al tiempo. Existen distintas formas en las que los acelerómetros pueden medir la aceleración, todos usan una masa que se mueve en proporción a la fuerza. Algunos acelerómetros utilizan resortes, efectos capacitivos o cristales piezoeléctricos, siendo estos últimos los más usados actualmente. Como sea que sean contruidos, el principio general es que la diferencia en el movimiento de la masa respecto a su posición original produce una diferencia de potencial, usada como medición indirecta de la aceleración ejercida en el objeto.

En la figura 24 se observa el modelo de construcción de un acelerómetro utilizado en un teléfono móvil que usa pequeñas estructuras que permiten la medición de la aceleración [27]. Las características técnicas del acelerómetro se muestran en el Apéndice D.

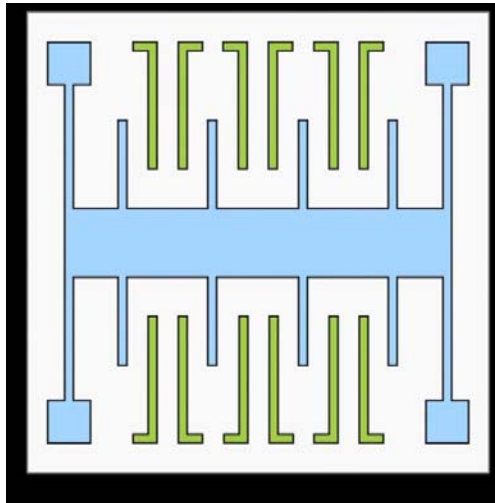


Figura 24. Esquema interno de un acelerómetro capacitivo.

Los acelerómetros son fabricados para medir la aceleración en una, dos o tres dimensiones de manera que sea posible medir la aceleración en cada eje particular. Entre sus aplicaciones se encuentra la medición de la inclinación que presenta un cuerpo, esto es posible de calcular debido a que se utiliza la componente normal de la aceleración provocada por la gravedad respecto a alguno de los ejes del cuerpo que se está analizando.

En la figura 25 se muestran gráficamente los ejes en que puede ser medida la aceleración haciendo uso de un acelerómetro. El eje Z corresponde a la normal de la aceleración de gravedad [28].

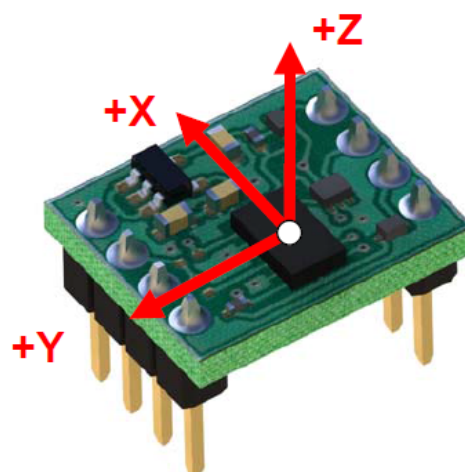


Figura 25. Acelerómetro analógico que opera con microcontroladores.

2.10 MAGNETÓMETRO

Los magnetómetros son sofisticados sensores capaces de medir la intensidad, y a veces la dirección, de campos magnéticos. Entre estos campos se incluyen aquellos que se encuentran en o cerca de la superficie terrestre y del espacio. Gracias a la capacidad de medir la intensidad de los campos magnéticos de la Tierra, son utilizados como medios de orientación en analogía al uso de una brújula [29].

En la figura 26 se puede observar que los magnetómetros tienen un sentido de orientación que se relaciona de forma similar a los puntos cardinales, esto permite obtener una orientación hacia cualquiera de estos puntos, las características técnicas se muestran en el Apéndice E.

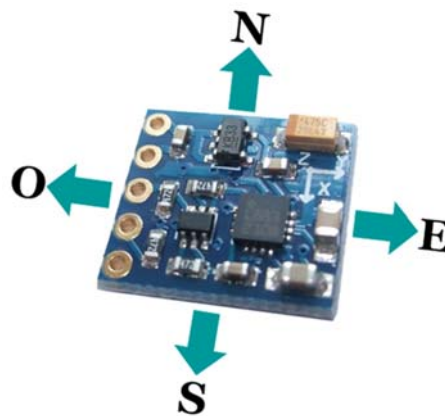


Figura 26. Magnetómetro digital que hace uso del protocolo I2C.

2.11 SISTEMA DE TRANSMISIÓN POR ENGRANES

Existen distintas maneras de transmitir movimiento de un lugar a otro, cada una con características específicas que las hacen ideales para cada aplicación. Estas formas de transmisión pueden ser de movimiento circular a movimiento lineal, de circular a circular, de lineal a circular. Para poder llevar movimiento de un lugar a otro son necesarios elementos mecánicos como bielas, manivelas, correas, cadenas y engranes.

Muchas aplicaciones industriales necesitan el uso de motores para poder operar, algunas de estas, requieren la implementación de velocidades menores a las otorgadas por el motor, es así que se emplean reductores de velocidad. Los reductores de velocidad tienen la característica de transmitir la potencia otorgada por el motor con la menor pérdida de energía, es decir, mientras reducen la velocidad incrementan el torque.

Una forma de crear reductores de velocidad es a base de engranes, los engranes son ruedas dentadas que permiten crear una interacción entre dos o más de estos elementos. Los engranes se clasifican de acuerdo a la forma de sus dientes en cuatro grupos principales: helicoidales, cónicos, de gusano o rectos.

La figura 27 muestra un ejemplo de la interacción entre dos engranes de dientes rectos los cuales son útiles para transmitir movimiento de un eje a otro de forma paralela. De todos los tipos de engranes, los rectos son los más simples, pero hay que tomar en cuenta que en estos engranes el sentido de giro del engrane es opuesto al del piñón por lo que si se requiere un sentido de giro de salida similar al de entrada es necesario ocupar reductores con número impar de engranes [30].

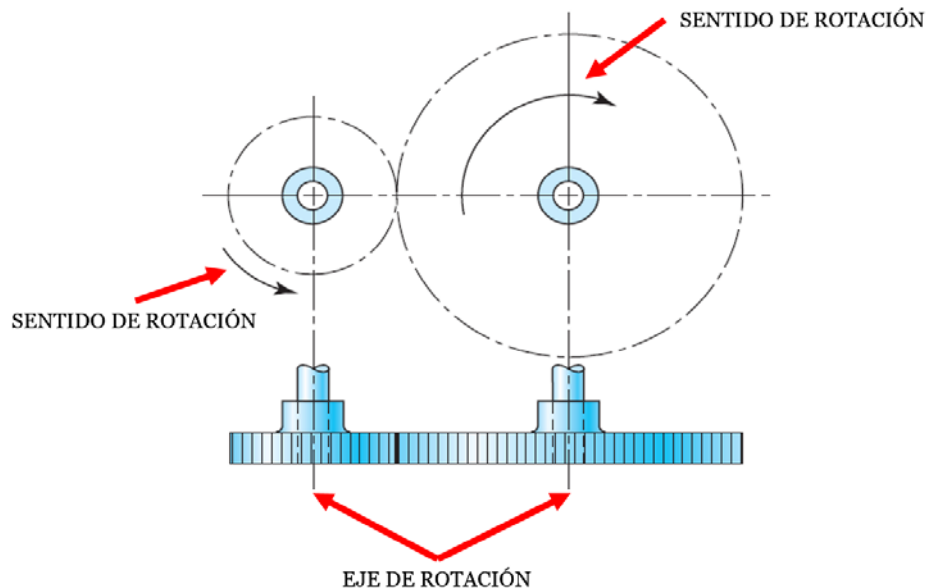


Figura 27. Esquema de relación entre engranes de dientes rectos.

Para la construcción de un reductor por engranes es necesario tomar en cuenta datos importantes como lo son el número de dientes de los engranes, el ángulo de presión y el módulo. Dos engranes serán compatibles entre sí siempre y cuando el módulo (M) y el ángulo de presión (PA) sea el mismo para ambos elementos; en caso de que estos dos elementos no concuerden uno con el otro la transmisión de la energía no será óptima.

Para calcular la relación de transmisión de un reductor (R_{PG}) es necesario tomar pares de engranes que tienen contacto directo y obtener el cociente de entre su número de dientes (N) como lo muestra la ecuación 13 donde R_{pg} es la relación de transmisión para un par de engranes con número de dientes N_p para el piñón y N_g para el engrane. Normalmente al engrane con menor número de dientes se le llama piñón y al de mayor número se le llama simplemente engrane.

$$R_{pg} = \frac{N_g}{N_p} \quad (13)$$

Tomando un piñón de $N_p = 20$ y un engrane de $N_g = 40$ tenemos que la relación de transmisión es de $40/20$ o 2 que se expresa nominalmente como relación $2:1$. La forma de interpretar la relación de transmisión es diciendo que el piñón tendrá que girar dos veces para que el engrane complete una vuelta.

Para conocer la velocidad (n) de salida de la transmisión se ocupa la ecuación 14 que busca la velocidad de salida n_s en relación a la velocidad de entrada n_e como producto del cociente de N_p sobre N_g .

$$n_s = \frac{N_p}{N_g} \times n_e \quad (14)$$

Suponiendo el mismo par de engranes anterior pero una velocidad de entrada $n_e = 500$ rpm tenemos que $n_s = 0.5 \times 500$ rpm = 250 rpm.

Para conocer la velocidad de salida de un reductor de más de dos engranes solamente se multiplican los cocientes de los pares de engranes en contacto. Si

al reductor anterior le agregamos un par más de engranes con $N_3= 15$ y $N_4=10$ tenemos que

$$R_{14} = R_{12} \cdot R_{23} \cdot R_{34} = \frac{40}{20} \times \frac{20}{15} \times \frac{15}{10} = 2 \times 1.33 \times 1.5 = 3.99$$

Es decir, una relación de transmisión $R_{14} = 3.99$ o en términos de velocidad

$$n_s = \left[\frac{20}{40} \times \frac{15}{20} \times \frac{10}{15} \right] \times 500 \text{ rpm} = [0.5 \times 0.75 \times 0.666] \times 500 \text{ rpm} = 124.87 \text{ rpm}$$

En términos de transmisión de torque se debe tener en cuenta el diámetro de paso (D_p) que está relacionado al número de dientes y módulo del engrane como lo muestra la ecuación 15.

$$D_p = N * M \quad (15)$$

Conociendo el D_p podemos ahora conocer la relación de transmisión de torque (τ) como lo marca la ecuación 16 donde r es el radio de paso o lo mismo a la mitad de D_p .

$$\tau_s = \frac{r_2}{r_1} * \tau_e \quad (16)$$

Donde τ_s indica el torque de salida en relación al cociente del radio de paso del engrane r_2 y el radio de paso del piñón r_1 multiplicado por el torque de entrada τ_e . Para reductores con más de una etapa se utiliza el mismo principio que para calcular la relación de transmisión de la velocidad, se multiplican las relaciones de los radios de cada etapa.

Suponiendo que los engranes de nuestro ejemplo tienen un módulo de 2 y conociendo el número de dientes conocemos entonces su D_p con un torque de entrada de 10 kgf/cm. Así la relación de transmisión queda de la forma

$$\tau_s = \left[\frac{0.40 \text{ cm}}{0.20 \text{ cm}} \times \frac{0.20 \text{ cm}}{0.15 \text{ cm}} \times \frac{0.15 \text{ cm}}{0.10 \text{ cm}} \right] \times 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}} =$$

$$= [2 \times 1.33 \times 1.5] \times 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}} = 39.99 \text{ kgf/cm}$$

Por lo que podemos ver que la fuerza casi cuadruplica su valor, razón por la que los reductores por engranes son ampliamente utilizados en aplicaciones que requieren potencia más que velocidad.

2.12 CONTROL EN LAZO CERRADO

Los sistemas de control en lazo cerrado son aquellos que utilizan una señal de retroalimentación para crear una comparación con respecto a un valor deseado, a esta señal se le conoce como error. A partir del error, el controlador es capaz de definir una función capaz de reducir este y llevar el sistema al valor deseado [31].

En la figura 28 se observa un diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado donde la salida $C(s)$ se utiliza como retroalimentación a la entrada $R(s)$ creando la señal de error $E(s)$ que afecta al sistema $G(s)$.

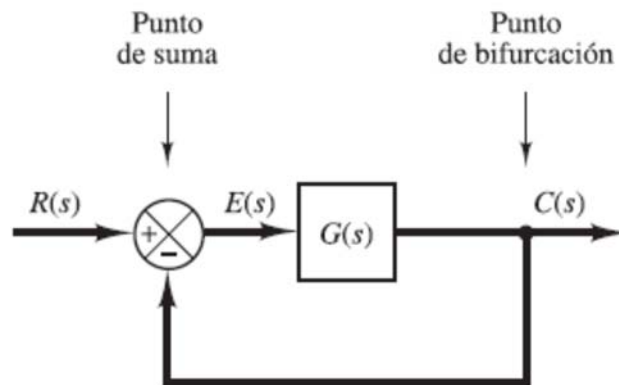


Figura 28. Diagrama de bloques de un sistema de lazo cerrado.

En un controlador automático se genera una señal de control capaz de llevar el error a cero o lo más cercano a este. La forma en que el controlador realiza este proceso se llama acción de control.

La figura 29 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control que se compone de un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor. El controlador procesa la señal de error que alimenta al actuador, este podría ser un motor o una válvula. El sensor tiene la función de convertir la variable de salida en otro tipo de variable compatible con las unidades de la señal de entrada para así poder ser manejable y pueda usarse para comparar la salida con la señal de referencia deseada.

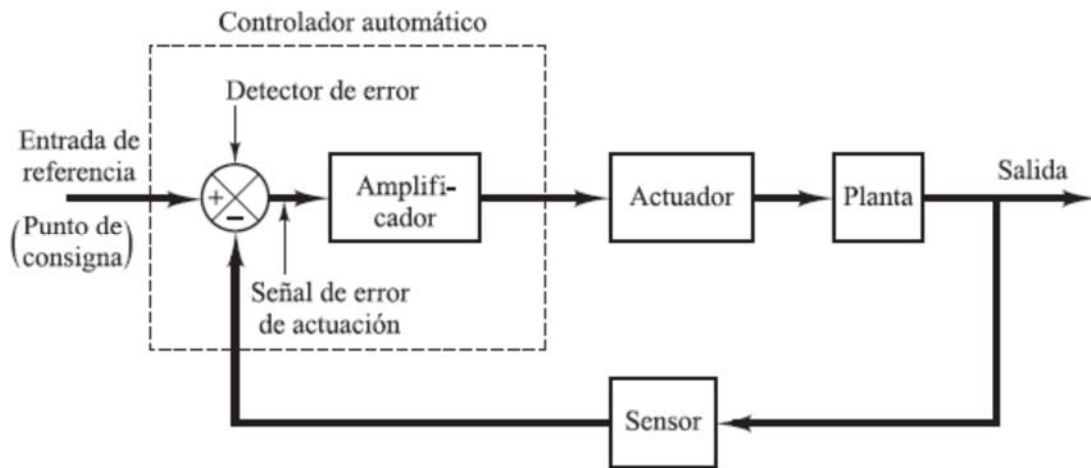


Figura 29. Diagrama de un sistema con control automático.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

La figura 30 muestra un diagrama a bloques de cómo se realiza la interacción de cada uno de los elementos que conforman el Sistema Autónomo de Seguimiento Solar (SASS). Las líneas de flujo verdes representan información que va de los módulos a la tarjeta Arduino para que sea procesada en el microcontrolador. Entre esta información se encuentran: la latitud y longitud proporcionada por GPS, la hora y fecha determinadas por el RTC, la orientación del magnetómetro y el grado de inclinación del acelerómetro. Todas estas variables indican el estado actual del Laboratorio Solar. Las líneas rojas representan información que va del microcontrolador a los medios de despliegue y/o almacenamiento de la información. La memoria SD guarda la información en una base de datos y la pantalla de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) muestra la posición del sistema en tiempo real. Finalmente, las líneas azules representan el flujo de la información a través del proceso para llegar finalmente al objetivo que es hacer seguimiento solar.

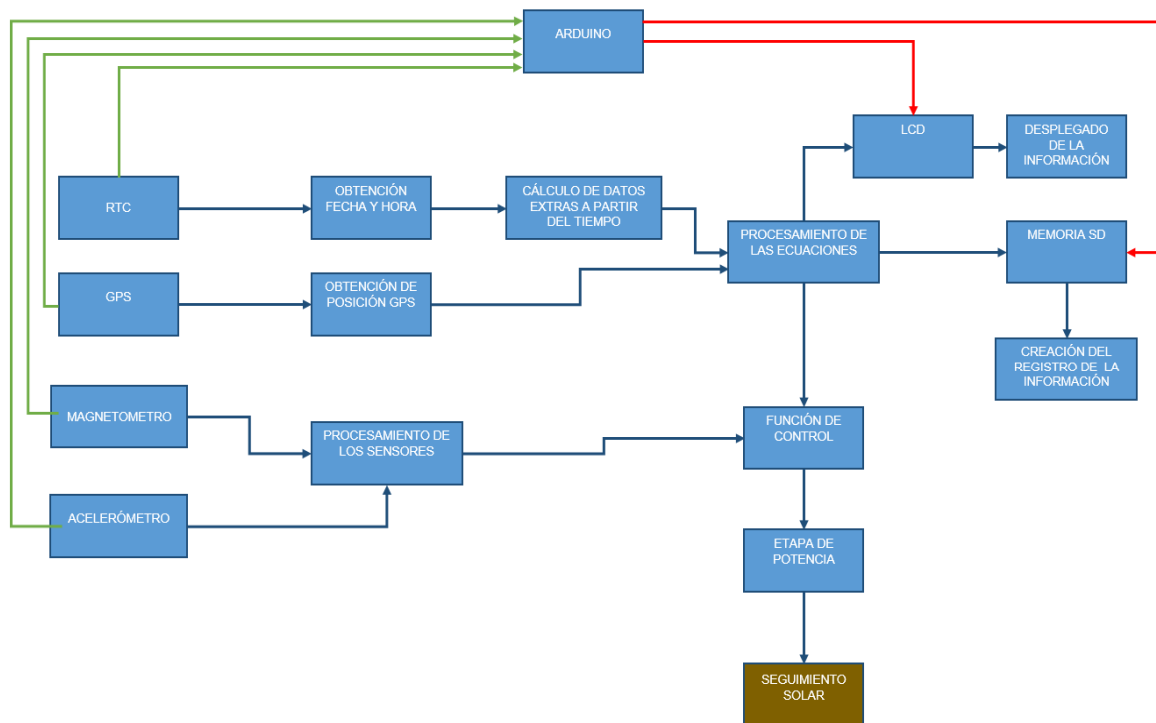


Figura 30. Diagrama a bloques del sistema autónomo de seguimiento solar.

En la figura 31 se aprecia de manera gráfica la interacción entre la tarjeta de desarrollo y los módulos periféricos que permiten la obtención de la información para lograr el seguimiento solar.

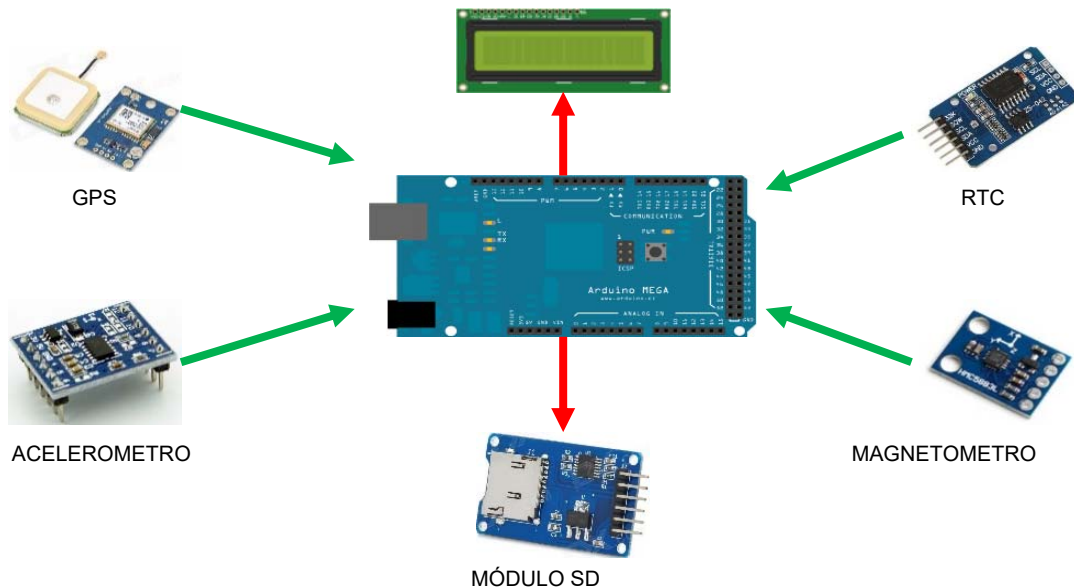


Figura 31. Interacción de Arduino con los periféricos usados en el SASS.

La primera parte importante para lograr el objetivo es reunir las variables que permiten interpretar las ecuaciones que describen el seguimiento solar. Teniendo al alcance y pudiendo manipular estas variables, el microcontrolador se encarga de realizar el procesamiento y otorgar señales eléctricas que se convierten en movimiento por medio de los motores para llevar el sistema al estado deseado. Como se puede apreciar en las ecuaciones 1 a 12, estos requerimientos son el tiempo y el lugar en que se hace el análisis. Se incluyen entre estos requerimientos datos como hora, minutos, día, mes, latitud y longitud.

Para obtener la información se deben utilizar módulos compatibles con los protocolos de comunicación que el microcontrolador es capaz de manejar, esto con la finalidad de obtener de la manera más simple y rápida los datos necesarios para el trabajo desarrollado. Para el tiempo se utiliza un RTC DS3231 que trabaja bajo el protocolo de comunicación I2C; para la obtención de la posición se utiliza un GPS U-Blox Neo 6M con interfaz serial. Se eligieron estos módulos porque

tienen una infraestructura que les permite ser usados con la tarjeta Arduino, entre estas características se encuentran: los niveles de voltaje, velocidad de transferencia de datos y protocolo de comunicación compatible.

Para poder obtener información desde los módulos, se debe realizar el “sketch” de programación basado en el lenguaje de Arduino y, que servirá como interacción entre el microcontrolador y los módulos periféricos, es decir, las instrucciones que el microcontrolador dará a los elementos que estén conectados a éste para recibir o transmitir información.

Conocidas las instrucciones básicas para la obtención de la información se hace una prueba de comprobación de los datos en “*crudo*”, es decir, la información se recolecta tal y como es otorgada por el módulo que se encuentre en estudio. Como ejemplo, en la figura 32 se puede ver de manera gráfica la interacción del módulo GPS U-Blox Neo 6M con el software U-center que a través de la codificación de un sketch envía la información del GPS a una PC y muestra en un mapa la posición donde se encuentra el dispositivo. Se destacan cinco regiones importantes para este trabajo; el punto 1 muestra gráficamente la posición del dispositivo GPS que ayuda a determinar la correcta ubicación del sistema, el punto 2 muestra numéricamente la posición mostrada en la región 1, el punto 3 indica la intensidad y cantidad de los satélites a los que el dispositivo GPS se ha conectado, el punto 4 muestra datos de hora y fecha y finalmente el punto 5 muestra el estado de la conexión, así como el tipo de radio GPS utilizado.

Una vez obtenidos los datos del sistema de posicionamiento global, correspondientes a la posición geográfica, se procede a su interpretación e implementación dentro de las ecuaciones descritas en el Capítulo 2, esto permite calcular la posición aparente del Sol.

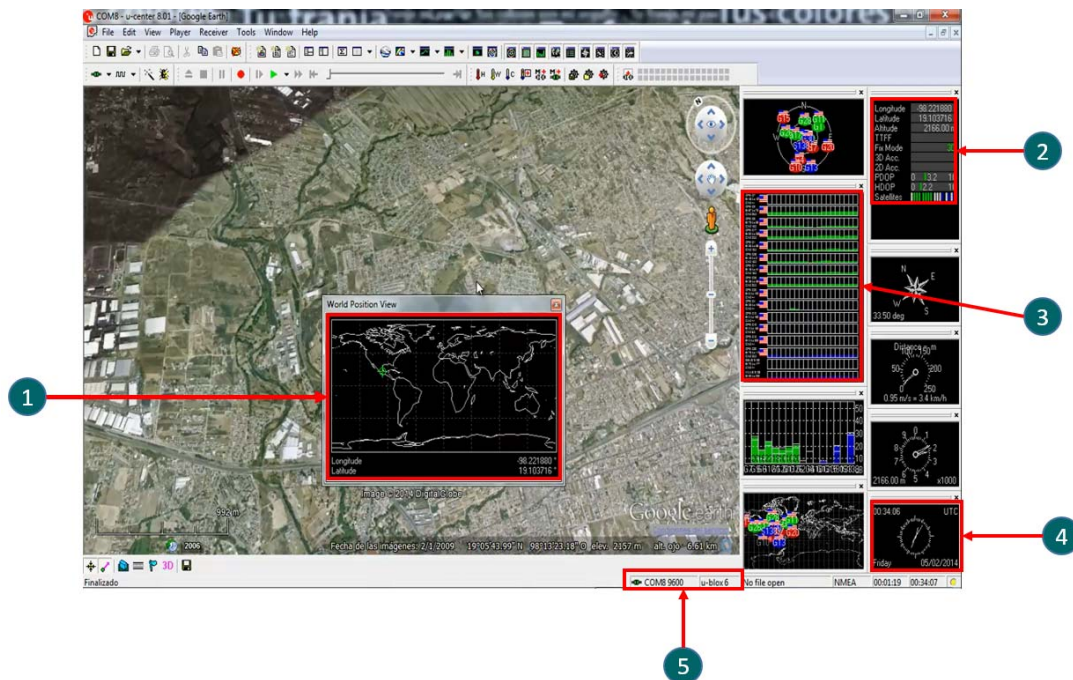


Figura 32. Interfaz de U-center donde se muestra la posición de estudio

El microcontrolador es capaz de realizar el procesamiento de toda esta información haciendo uso de operaciones matemáticas con resultados de variables en punto flotante.

Para la realización de la codificación se toman en cuenta algunas consideraciones que permiten el mejor funcionamiento del sistema. Entre estas consideraciones se toma en cuenta que el sol solamente es visible por un lapso de tiempo a lo largo de un periodo de 24 horas. Como el punto de interés es realizar el seguimiento Solar, es irrelevante mantener constante la operación del sistema en los momentos que el sol se encuentra fuera de nuestro foco visual. Para esto se define que el intervalo de tiempo de operación del sistema será desde el momento del amanecer hasta el anochecer; momento en que el sol deja de ser perceptible para el observador. Como punto de apoyo para este proceso se agregan al sistema, la ecuación 17, indicando el momento en que amanece y la ecuación 18 que determina el momento de la puesta del Sol.

$$Amanecer = 12 - 0.0666 \left(\cos^{-1} (-\tan L * \tan \delta) \right) - \frac{TC}{60} \quad (17)$$

$$Puesta\ del\ Sol = 12 + 0.0666 \left(\cos^{-1} (-\tan L * \tan \delta) \right) - \frac{TC}{60} \quad (18)$$

Otra consideración que se toma en cuenta es la posibilidad de que el GPS pierda conexión con los satélites y la posición no pueda ser determinada; en este caso se verifica que el número de satélites disponibles se encuentre por encima de 4, el mínimo de satélites necesarios para obtener la posición global adecuada. Por eso se agrega la función que considera este inconveniente, el sistema se posicionará hacia el Sur o 180° de azimut con una elevación de 90° con el fin de mantenerlo en una posición neutral y quizá en un estado de mínimo consumo de energía.

Una vez resueltos los posibles conflictos se procede al estudio, análisis y codificación de las ecuaciones. Primeramente, se lee y almacena la información proveniente del RTC para después hacer lo mismo con el GPS puesto que es a partir de estos elementos que el seguimiento solar es posible.

En la ecuación 3 se puede observar que es necesario conocer el día del año en que se está realizando el estudio. Para esto se creó y codificó la ecuación 16.

$$d = (bmes \times 30) + día\ del\ mes \pm ajuste \quad (16)$$

De la ecuación 16 se tiene la variable d que corresponde a un número entre 1 y 365, relacionado al día del año que está en transcurso. La variable $bmes$ tiene asignado un valor entero entre 1 y 12 correspondiente al mes anterior, otorgado por el RTC. También se agrega la variable $ajuste$ pues se toma en consideración especial que no todos los meses del año tienen 30 días en su calendario y que los años bisiestos tienen 366 días. Es decir, si hoy es el día 12 de marzo de 2016, la ecuación 16 se describe de la siguiente manera:

$$d = (2 \times 30) + 12 = 72$$

El mes de marzo es el tercero del año por lo tanto $bmes = 3-1 = 2$ pues idealmente ya han transcurrido dos periodos completos de 30 días. El número 12 corresponde a los días que han transcurrido en el mes de marzo. Ahora es tiempo de tomar en cuenta el ajuste pues en principio el mes de enero tiene 31 días y no 30 como se consideró en un principio, además, el año 2016 es bisiesto por lo cual es necesario hacer el ajuste de año ya que febrero tiene 29 días lo que da una suma de 60 días. En caso de que el año no sea bisiesto, se tendría que restar 1 día a la ecuación puesto que febrero tendría una duración de 28 días y no 29 como ocurre en el año 2016. Este es sólo un ejemplo de un día específico, el código de programación contempla las distintas variables que puedan afectar el resultado.

De las ecuaciones 1, 4 y 6 se desprende que el siguiente paso es obtener los ajustes en tiempo de la diferencia entre la *HELM* y la *HL*. Para esto, se procesa la información almacenada de tiempo y posición para obtener los datos de *CT*, *ET* y la declinación solar.

Con todas las consideraciones ya tomadas en cuenta y codificadas se procede a llevar el “sketch” a la tarjeta para que esta interactúe con los dispositivos necesarios para procesar las ecuaciones descritas a lo largo de este documento y el microcontrolador otorgue las señales adecuadas para el movimiento de los motores que controlan la estructura de prueba. El “sketch” completo se puede consultar en el Apéndice F.

En la figura 33 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo desarrollado para la implementación del SASS.

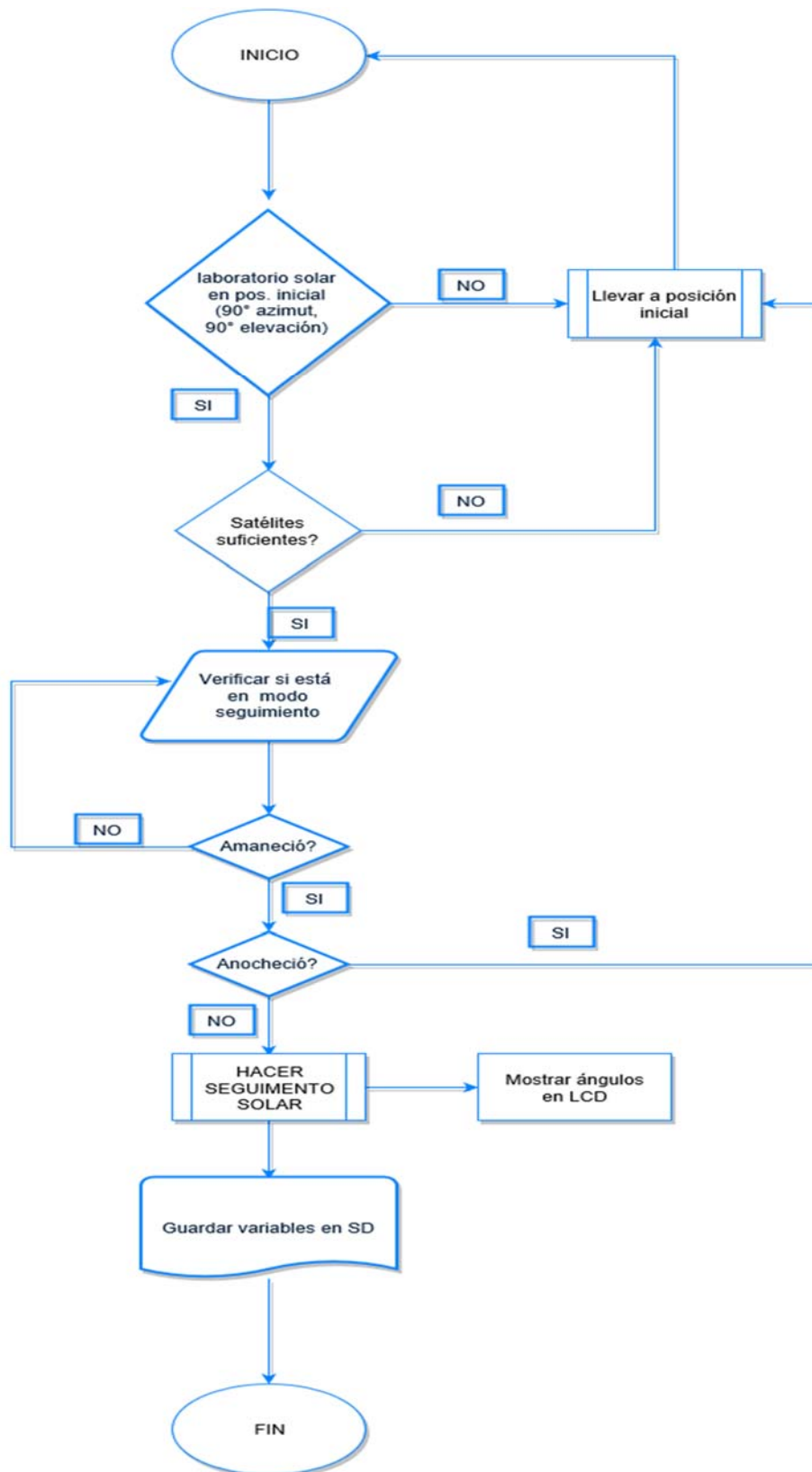


Figura 33. Diagrama de flujo del algoritmo usado para el SASS.

3.1 PROTOTIPO DE LABORATORIO SOLAR

Para realizar las pruebas experimentales de control se diseñó y manufacturó el prototipo de laboratorio solar presentado en la figura 34; los planos técnicos de todos los componentes del prototipo se presentan en el Apéndice G. Este modelo implementa elementos que le permiten moverse en dos grados de libertad para adaptarse a los requerimientos del seguimiento solar por ecuaciones geométricas.

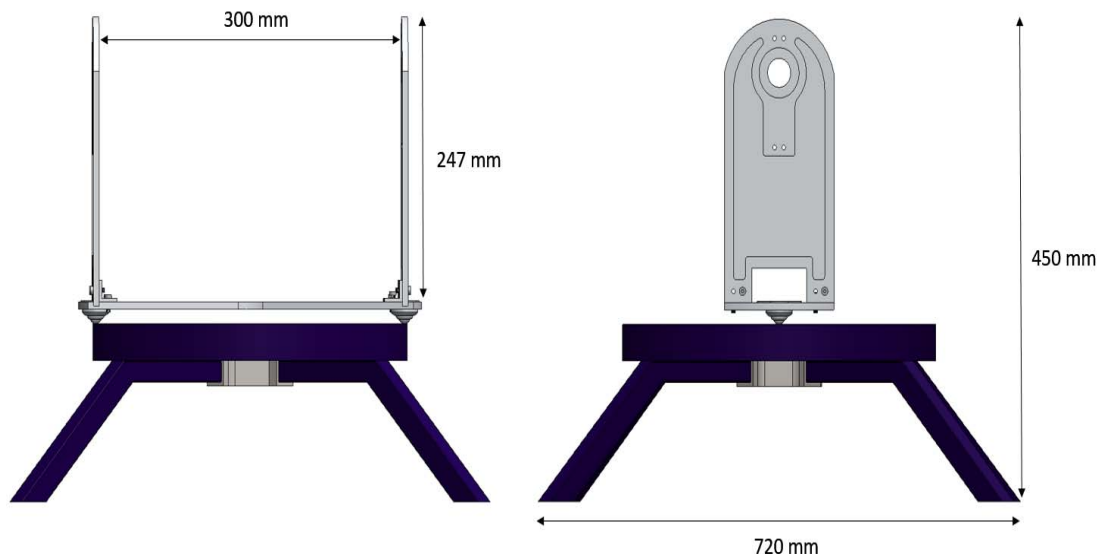


Figura 34. Estructura de laboratorio solar.

El primero de sus grados de libertad se encuentra en la parte inferior, correspondiente al movimiento del ángulo de azimut. La base de apoyo cuenta con dos ruedas que le sirven de guía, descansando sobre un aro y un rodamiento que permiten su mejor desplazamiento. Los detalles y dimensiones de la base se presentan en el Apéndice G.

El segundo grado de movimiento se implementa para realizar el seguimiento del ángulo de elevación. La estructura integra un soporte ajustable con capacidad de adaptar paneles fotovoltaicos con medidas de hasta 450mm de largo, 280mm de ancho y 50mm de altura; la figura 35 muestra el diseño del soporte.

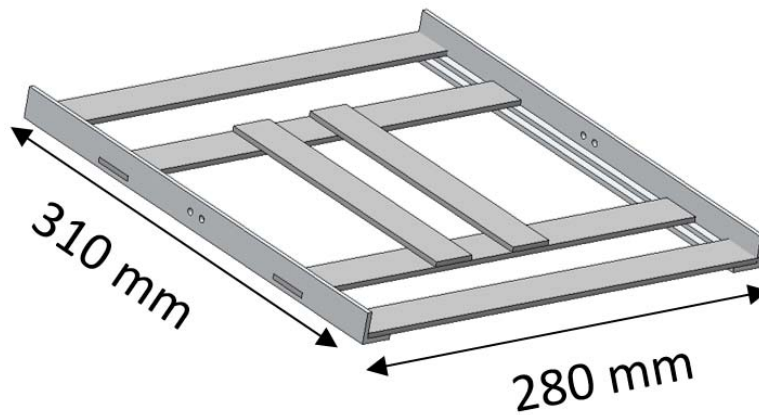


Figura 35. Soporte para paneles fotovoltaicos.

En la figura 36 se puede observar la integración del laboratorio solar con un panel fotovoltaico de 10W, cuyas dimensiones son: 280mm de ancho, 350mm de largo y 50mm de altura.



Figura 36. Laboratorio solar con base para panel fotovoltaico

Además de los paneles fotovoltaicos, en el prototipo se puede instalar también una campana de concentración solar, la cual se muestra en la figura 37. En la parte superior se colocó una lente de Fresnel de 300mm x 300mm permite llevar la radiación solar hacia un punto focal específico para obtener radiación solar

concentrada, con la capacidad de maximizar la concentración de energía y poder realizar aplicaciones termoeléctricas y/o termosolares. Por ejemplo: celdas termoeléctricas, secado de productos, calefacción, purificación de agua [32] o incluso experimentos con metales en condición de alta temperatura debido a las capacidades energéticas alcanzadas [33].

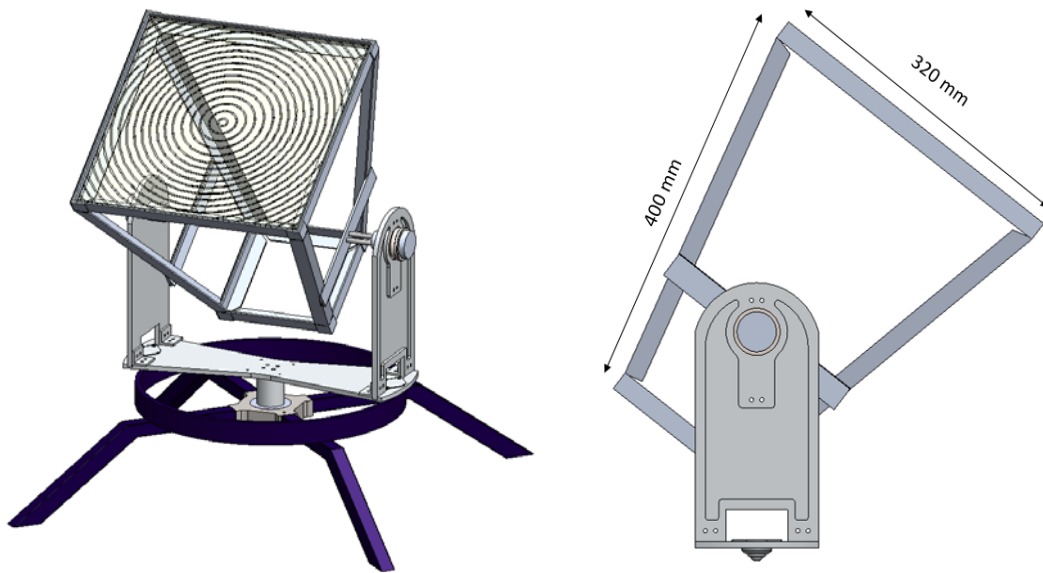


Figura 37. Laboratorio solar con campana concentradora y lente de Fresnel.

Para conocer la posición real que tiene el laboratorio solar en cada uno de sus grados de libertad, se hace uso de dos sensores que miden los ángulos que el laboratorio dibuja sobre su plano de acción. La ubicación de estos sensores se muestra en la figura 38. Con el número 1 se muestra la posición del sensor para el ángulo de elevación, este sensor es un acelerómetro capaz de medir la inclinación que tiene el panel fotovoltaico respecto al plano normal de la superficie sobre la que descansa el prototipo de laboratorio solar. Se colocó en dicho lugar debido a que se guarda el paralelismo del panel fotovoltaico con el soporte ajustable.

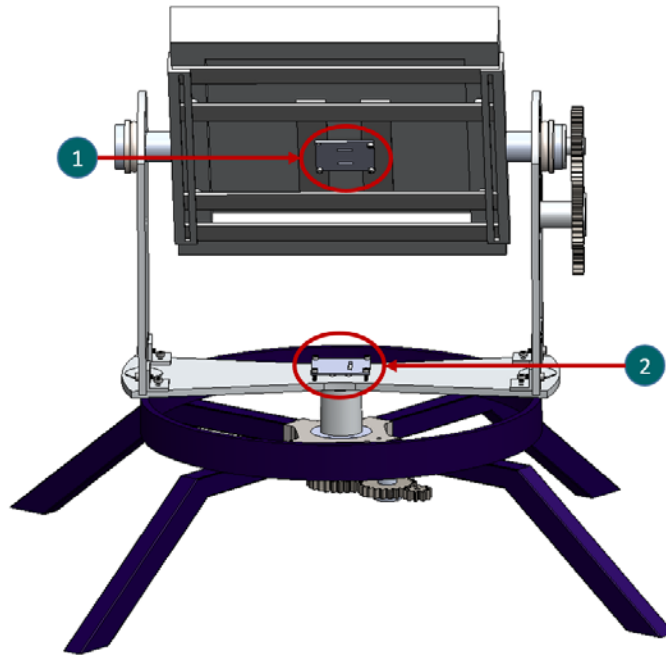


Figura 38. Ubicación de sensores de posición.

El número 2 muestra la ubicación del sensor para el ángulo de azimut, se implementó con un magnetómetro que mide la orientación que guarda el prototipo de laboratorio solar respecto al Norte. Se escogió dicha posición debido a que el sensor podrá ser capaz de girar a la par de la base del prototipo. Las señales otorgadas por estos sensores proporcionan los puntos de comparación para poder realizar el control en lazo cerrado y llevar el laboratorio a la posición indicada por las ecuaciones trigonométricas.

3.2 FUNCIÓN DE CONTROL

Se llevó a cabo la integración de las ecuaciones para obtener el control de seguimiento solar, correspondiente con el modelo de seguimiento solar y se implementó una función de control del tipo Proporcional (P). Se escogió la función proporcional por su rápida implementación en los sistemas de control, tomando en consideración los efectos de error en estado estable que pudiesen ocurrir, esto también deja abierta la posibilidad a futuros usuarios para el uso y desarrollo de diferentes funciones de control como podrían ser PI o PID.

La implementación del control automático, requiere conocer el estado final o el punto a donde se desea llegar. Para eso, el SASS utiliza los ángulos de azimut y de elevación procesados en las ecuaciones como referencia y utiliza las señales del magnetómetro y acelerómetro como retroalimentación. Con estos elementos almacenados, el microcontrolador obtiene una señal de error que es compensada con una variable kp adaptable a las condiciones del estado del error y es transmitida por un puerto PWM hacia el motor de corriente continua. La condición de adaptabilidad depende del margen de error que exista, el cual es variable para cada grado de libertad. Para el ángulo de elevación existe un error máximo de 180° y para el ángulo de azimut el error máximo es de 360° ; en ambos casos se proponen 3 estados de compensación. El primer estado es cuando el error varía en función del 33% del error máximo y se aplica una constante kp activa, es decir, una kp de un valor numérico grande, el segundo estado varía entre 33% y 66% del error máximo donde se aplica una kp de valor moderado y finalmente el estado pasivo con un error de más del 66% del error máximo en donde se aplica una kp pequeña. Estas consideraciones fueron tomadas para evitar grandes sobre impulsos en condiciones de error grande. En el caso del ángulo de elevación se toma en consideración un factor de compensación de la gravedad, determinado por el producto de la masa del panel, la distancia del centro de masa al punto de torque y la constante de gravedad. La señal obtenida previamente es enviada a través de un amplificador operacional en modo seguidor para mantener los niveles de corriente adecuados para el acoplamiento de la señal que entrará al puente H, dispositivo que sirve como etapa de potencia eléctrica para la alimentación de los motores, además de que permite conmutar el sentido de giro del motor de acuerdo a las necesidades del sistema.

Las figuras 39 y 40 muestran los diagramas a bloques del control P aplicado a cada uno de los grados de libertad del SASS, en estas figuras se pueden observar las diferentes etapas que conforman un control en lazo cerrado.

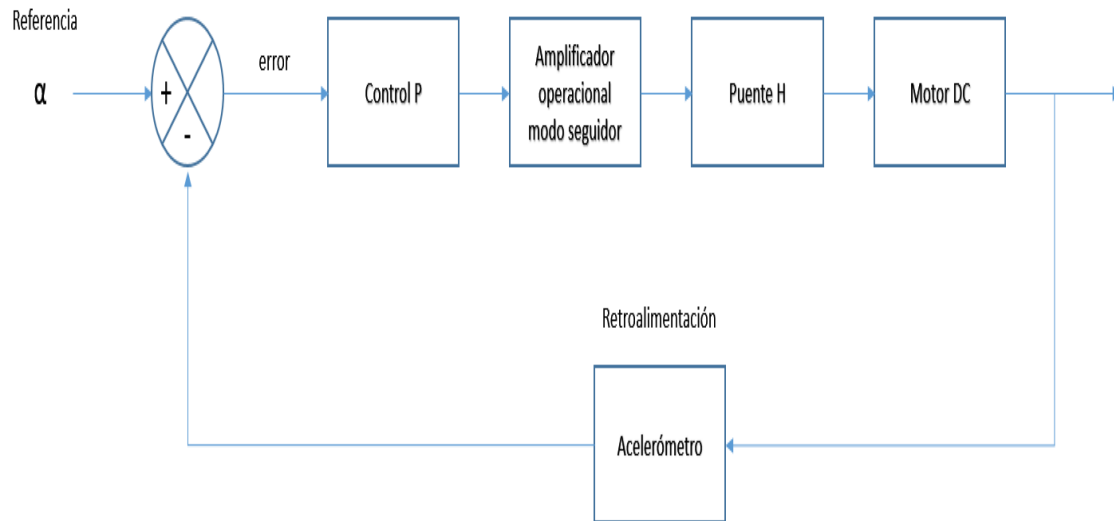


Figura 39. Diagrama de bloques del control P para el ángulo elevación.

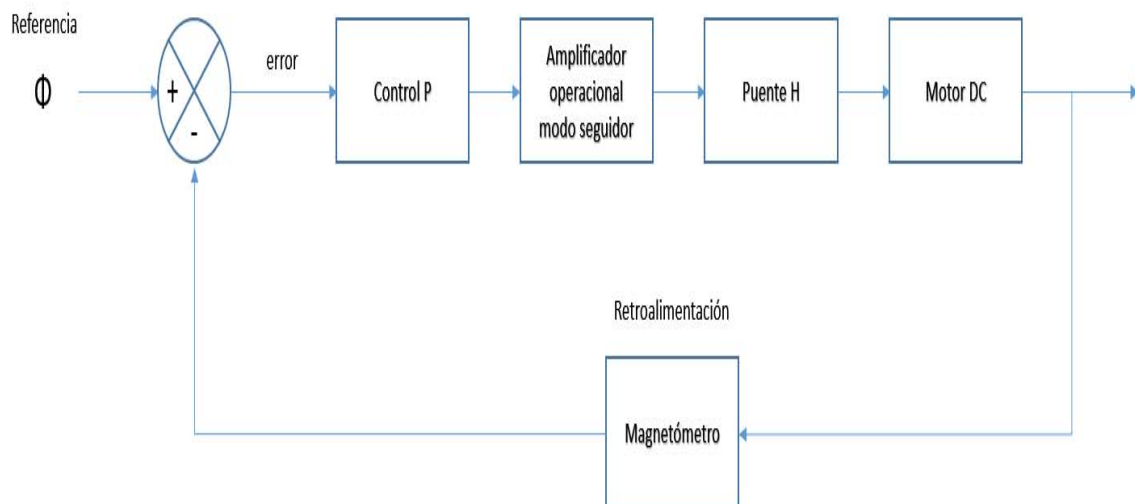


Figura 40. Diagrama de bloques del control P para el ángulo azimuth.

La figura 41 muestra el diagrama de flujo que describe el método desarrollado, y empleado, para el cálculo y aplicación del control tipo P en lazo cerrado.

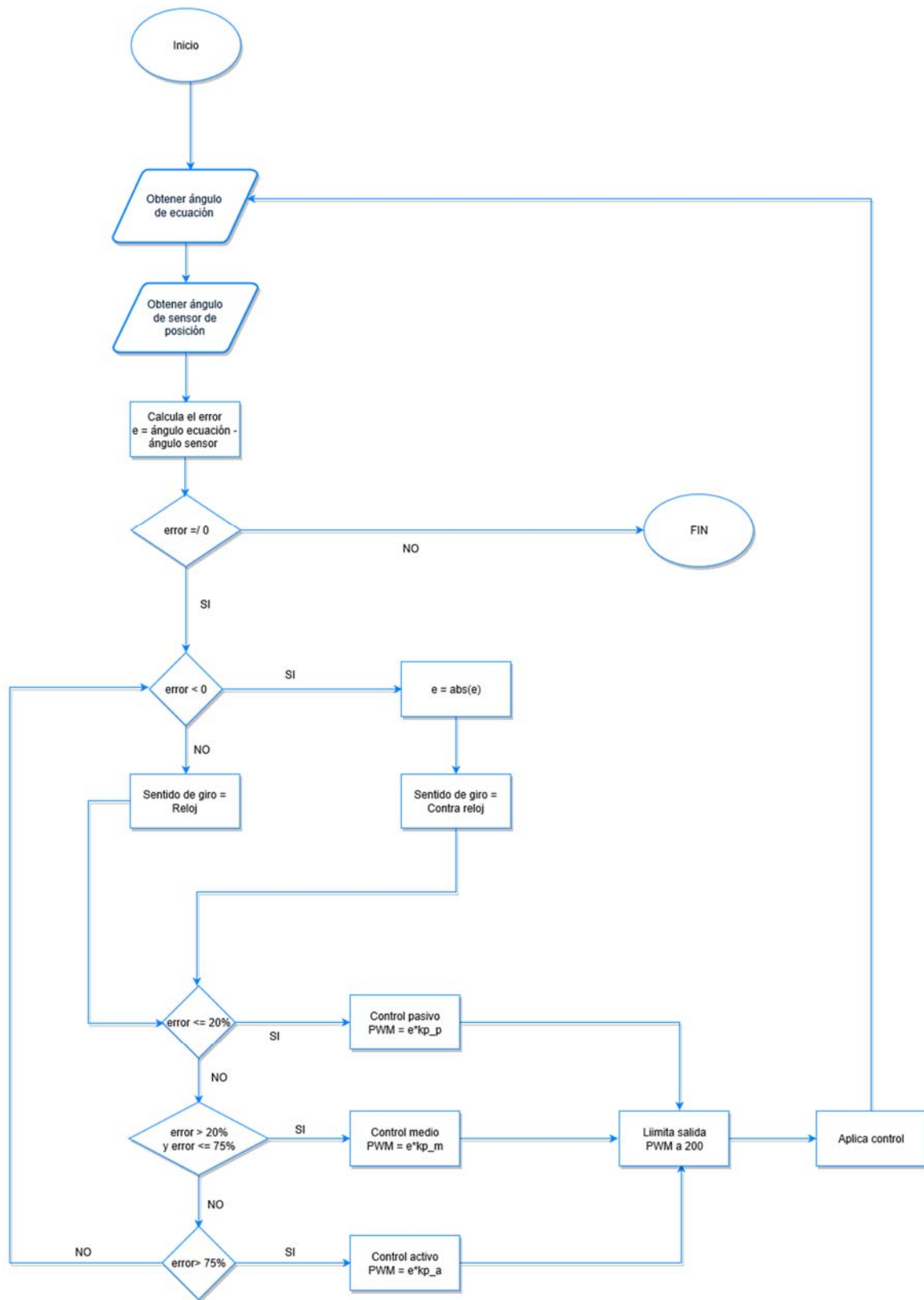


Figura 41. Diagrama de flujo del control en lazo cerrado

En la figura 42 se muestra parte del código programado para la realización del control de los motores, se puede consultar el código completo en el Apéndice F.

```
void controlE1()
{
  double error1 = desE1 - adqE1;
  double errorlabs = abs(error1);

  if (errorlabs > 0 && errorlabs <=60)
  {
    P1 = kp1_se*error1 + compGrav;
  }
  else if (errorlabs >=61 && errorlabs < 120)
  {
    P1 = kp1_ne*error1 + compGrav;
  }
  else if (errorlabs >=121 && errorlabs < 180)
  {
    P1 = kp1_be*error1 + compGrav;
  }
  else
  {
    P1 = kp1_ne*error1+ compGrav;
  }
}
```

Figura 42. Parte del código de control desarrollado para la plataforma Arduino.

3.3 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El laboratorio solar hace uso de motores de corriente continua que cuentan con una velocidad de 80 RPM y un torque de 18 kg/cm, la figura 43 muestra el motor empleado; las especificaciones técnicas se detallan en el Apéndice H. Debido a las condiciones de los motores, y para guardar la integridad de los mismos, se diseñó un sistema de transmisión a base de engranes para cada uno de los grados de libertad.



Figura 43. Motor DC 37D 131:1 de la marca Pololu.

El sistema de transmisión integra tres engranes que permiten que el sentido final de giro sea igual al del motor, pero en menor velocidad y con un aumento en el torque. En total son dos las transmisiones implementadas, una para el movimiento de azimuth, vista en la figura 44, y otra para el movimiento de elevación, la cual se muestra en la figura 45.

Para la transmisión azimuth se emplean engranes con las características de la tabla 1, donde se muestran los elementos más importantes para el estudio de la transmisión. Donde N es el número de dientes, M es el módulo, PA es el ángulo de presión y Dp el paso diametral.

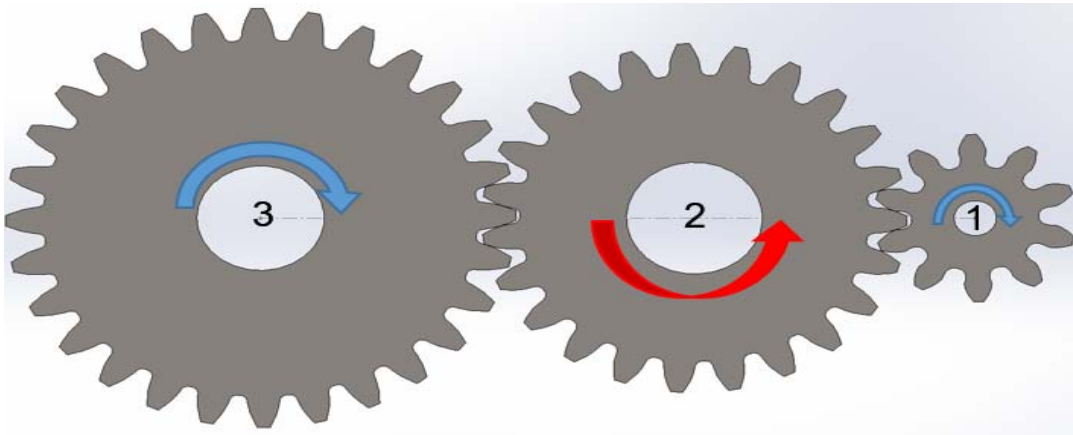


Figura 44. Engranes de la transmisión azimuth.

Tabla 1. Especificaciones de la transmisión para el ángulo de azimuth

Engrane	N	M	PA	Dp
1	10	2	20°	20.00 mm
2	23	2	20°	46.00 mm
3	28	2	20°	56.00 mm

Así mismo, para la transmisión de elevación se emplean engranes con las características de la tabla 2.

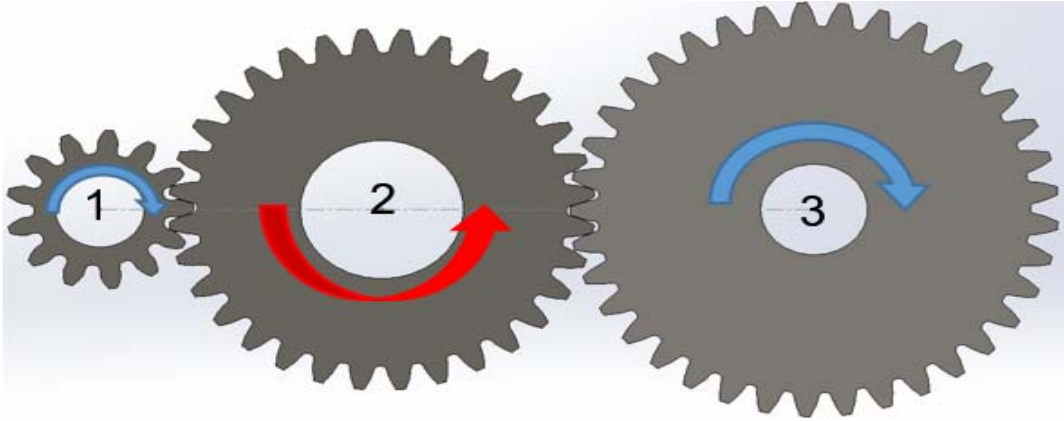


Figura 45. Engranes de la transmisión de elevación.

Tabla 2. Especificaciones de la transmisión para el ángulo de elevación

Engrane	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>PA</i>	<i>Dp</i>
1	13	1.75	20°	22.75 mm
2	32	1.75	20°	56.00 mm
3	37	1.75	20°	65.75 mm

De acuerdo a los datos mostrados en las tablas 1 y 2 se tienen las relaciones de transmisión siguientes:

$$R_{azimut} = \frac{28}{23} \times \frac{23}{10} = 2.8$$

$$R_{elevación} = \frac{37}{32} \times \frac{32}{13} = 2.46$$

Tomando en cuenta las características de los motores implementados, en términos de velocidad y torque, las transmisiones tienen las siguientes relaciones:

$$n_{azimut} = \left[\frac{10}{23} \times \frac{23}{28} \right] * 80 \text{ rpm} = 28.57 \text{ rpm}$$

$$\tau_{azimut} = \left[\frac{0.46 \text{ cm}}{0.20 \text{ cm}} \times \frac{0.56 \text{ cm}}{0.46 \text{ cm}} \right] * 18 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} = 50.40 \text{ kg/cm}$$

La figura 46 muestra el acoplamiento del sistema de transmisión por engranes para el ángulo de azimut y la integración del motor de corriente directa.

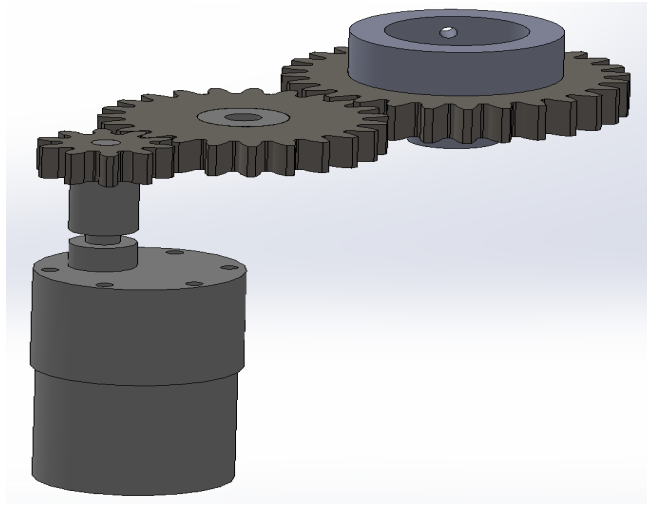


Figura 46. Transmisión para el ángulo de azimut.

$$n_{\text{elevación}} = \left[\frac{13}{32} \times \frac{32}{37} \right] * 80 \text{ rpm} = 28.10 \text{ rpm}$$

$$\tau_{\text{elevación}} = \left[\frac{0.5600 \text{ cm}}{0.2275 \text{ cm}} \times \frac{0.6575 \text{ cm}}{0.5600 \text{ cm}} \right] * 18 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} = 51.22 \text{ kg/cm}$$

En la figura 47 se observa la simulación de la integración del motor con el sistema de transmisión por engranes para el ángulo de elevación.

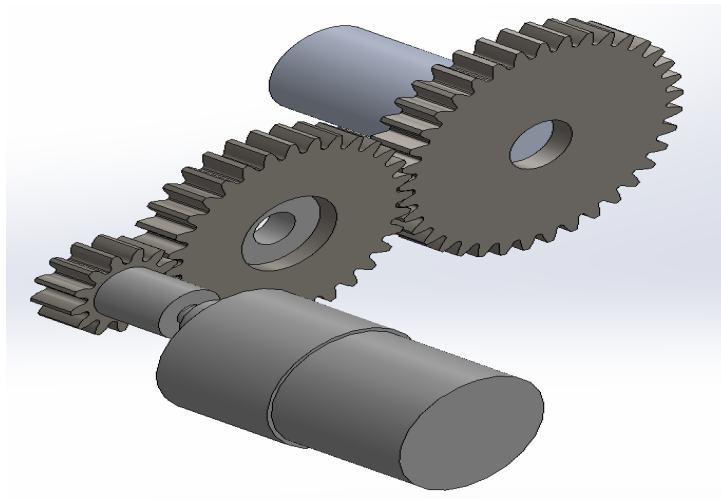


Figura 47. Transmisión para el ángulo de elevación.

3.4 VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información proporcionada por el sistema es fundamental para el análisis y comprobación del funcionamiento esperado. Una característica del sistema es que, proporcione información para su análisis de manera sencilla, de fácil acceso y además que sea procesable por medios externos para su estudio. Es por esta razón que se integró al SASS una pantalla LCD, la cual se observa en la figura 46; su ubicación está marcada con el número 1. La pantalla LCD permite la visualización de la posición del sistema en forma directa y el despliegue de algunos mensajes como la inicialización o la pérdida de la señal de satélites GPS. Se utiliza también una tarjeta de memoria SD que puede ser extraída del sistema para obtener la información que ha sido recabada a lo largo del periodo de operación del SASS, ésta se puede observar en la figura 48 con el número 2.

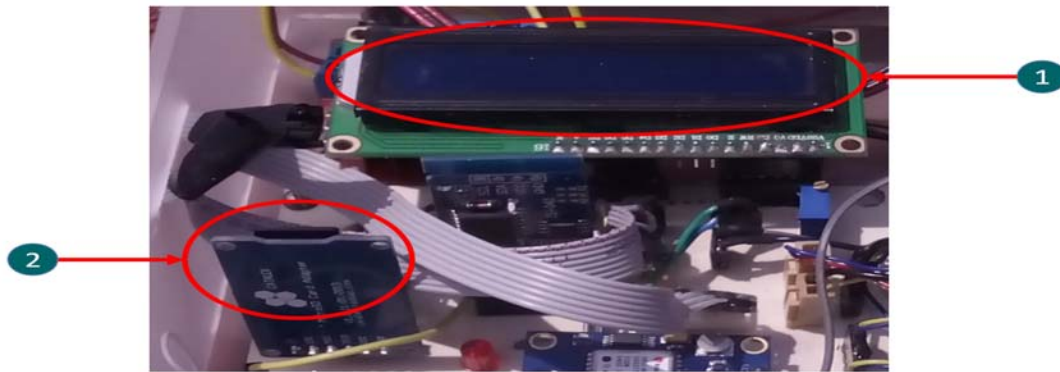


Figura 48. LCD y memoria SD integradas al SASS.

La pantalla LCD muestra de manera rápida los ángulos de posición del sistema sin necesidad de manipular ningún elemento externo o interno del sistema. La memoria SD, por su parte, sirve como un medio de almacenamiento de los datos que se han recabado a lo largo del periodo de estudio que se ha establecido. Los datos son guardados como una cadena de valores separados por comas (.cvs) haciendo uso del protocolo SPI. La principal ventaja que otorga el uso de la extensión .cvs es la compatibilidad con programas que procesan hojas de datos como Microsoft Excel para Windows. Así, cada valor es separado por una coma y Excel los separa automáticamente por columnas y de esta forma es posible obtener gráficos con la información de manera rápida y sencilla.

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Como primera parte de la comprobación del funcionamiento del SASS, se realizó la comparación de la resolución de las ecuaciones que describen el seguimiento solar. El análisis de la resolución de las ecuaciones se llevó a cabo con el fin de verificar la capacidad de trabajo que tiene el microcontrolador al manejar números de punto flotante y funciones trigonométricas, para demostrar que el microcontrolador es capaz de realizar la misma función que un procesador de computadora personal, muchas veces más caro, para este objetivo en particular.

Se tomaron tres métodos distintos para este experimento; como primer método se creó un código en lenguaje de programación MatLab, software especializado para procesamiento de datos, que utiliza los recursos de una computadora personal para resolver las ecuaciones; el código desarrollado se observa en la figura 49 y puede ser consultado a detalle en el Apéndice I.

```
LSTM = (15*gmtoff)*d2r;  
B = (360/365)*(diayear - 81) * d2r;  
EoT = (9.87 * sin(2*B)) - (7.53 * cos(B)) - (1.5 * sin(B));  
TC = (4 * (r2d)*(lonrad - LSTM)) + EoT;  
fac = minuto/60;  
LT = hora + fac;  
LST = LT + (TC/60);  
HRA=(15*(LST-12))* d2r;  
declinacion = asin(sin(23.45*d2r)*sin(d2r*(0.9863)*(diayear - 81)));  
decligrad=declinacion*r2d;
```

Figura 49. Parte del código para la resolución de ecuaciones en MatLab.

El segundo método hace uso de una calculadora solar [34]; se entiende cómo calculadora solar a una aplicación web, donde la persona interesada en conocer la posición de sol proporciona los datos requeridos de posición y tiempo y, así obtiene la información correspondiente a los ángulos de azimut y elevación solar. Las ecuaciones son resueltas a través del código programado por el desarrollador de la calculadora solar, ésta hace uso de la unidad de procesamiento que alberga la página web de la calculadora; en la figura 50 se muestra la interfaz gráfica de calculadora solar, consultada desde el navegador web de una PC.

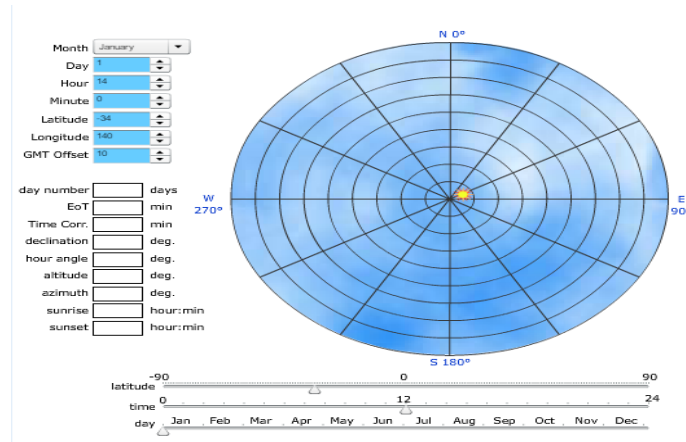


Figura 50. Interfaz gráfica de la calculadora solar.

Como tercer método se implementa un 'sketch' de Arduino, donde se incluyen los datos necesarios para la resolución de las ecuaciones, a través de los recursos disponibles en el microcontrolador; se muestra en la figura 51 parte del 'sketch' implementado y se detalla el código desarrollado en el Apéndice J.

```
double diayear = ((mes-1)* 30) + diames;
double LSTM   = (15*GMT)*d2r;
double B      = (0.9863)*(diayear - 81) * d2r;
double EoT    = (9.87 * sin(2*B)) - (7.53 * cos(B)) - (1.5 * sin(B));
double TC     = (4 * (r2d * (lonrad - LSTM))) + EoT;
double LT     = hora + (minuto/60);
double LST    = LT + (TC/60);
double HRA    = (15 * (LST-12))* d2r;
double declinacion = asin(sin(0.4092)*sin(d2r*(0.9863)*(diayear - 81)));

//Angulos de control
double elevacion = asin(sin(declinacion)*sin(latrad) + cos(declinacion)*cos(latrad)*cos(HRA));
double azimuth = acos((sin(declinacion)*cos(latrad) - (cos(HRA)*cos(declinacion)*sin(latrad)))/ cos (elevacion));
```

Figura 51. Parte del 'sketch' de resolución de las ecuaciones en Arduino.

El proceso mediante el cual se desarrolla la obtención y procesamiento de las ecuaciones de seguimiento solar es descrito a través del diagrama de flujo mostrado en la figura 52.

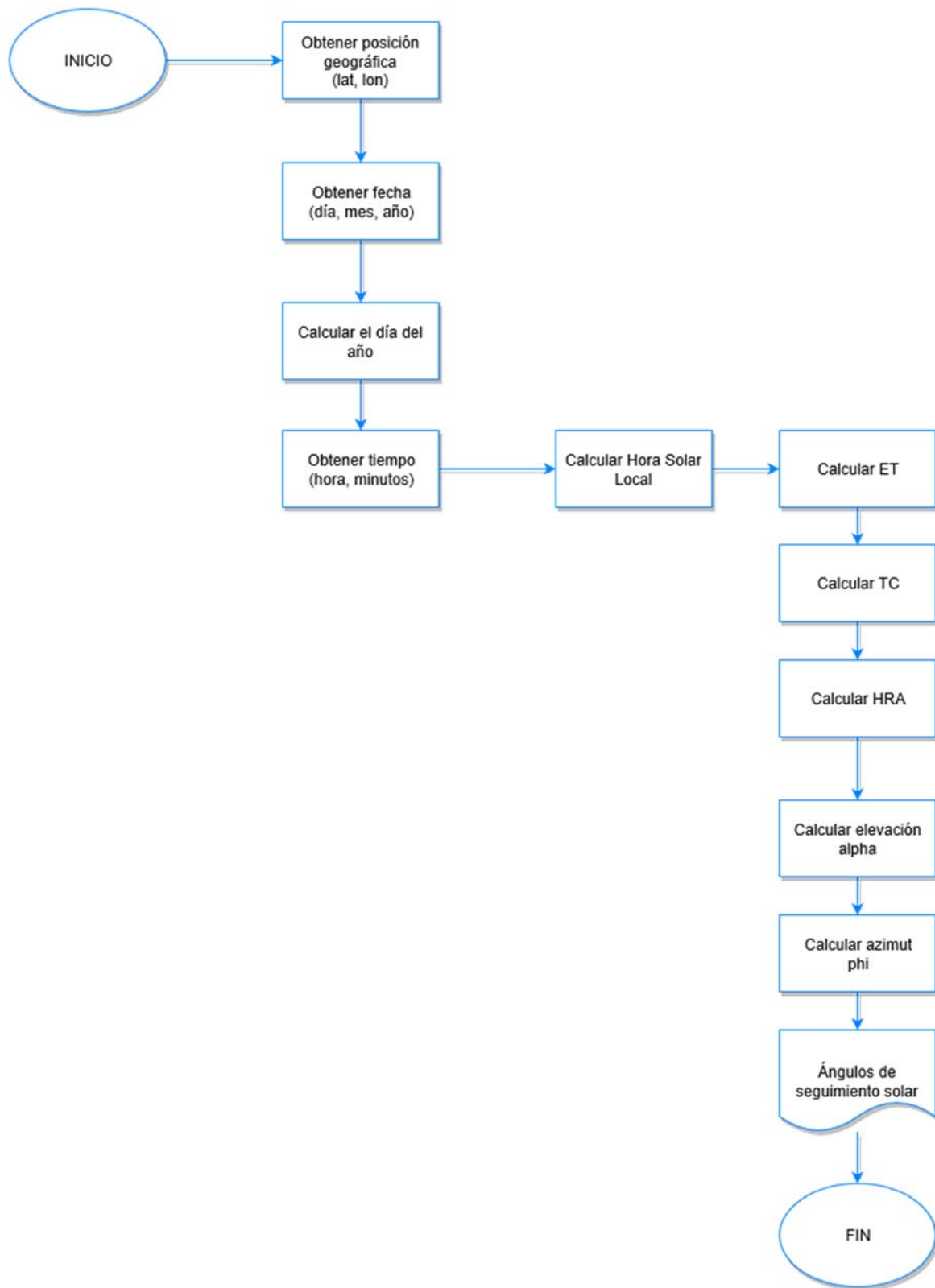


Figura 52: Diagrama de flujo del procesamiento de las ecuaciones de seguimiento solar.

En la figura 53 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos mediante los tres métodos descritos anteriormente para este experimento, donde se puede verificar que la tarjeta de desarrollo Arduino Mega2560 satisface la capacidad de procesamiento de números de punto flotante y funciones trigonométricas, necesarias para trabajar con la información de tiempo y posición geográfica y, entregar los ángulos de azimut y elevación solar. Se muestra para cada renglón, cada una de las variables calculadas mediante los tres diferentes métodos. Por ejemplo, en el primer renglón se calcula el día del año correspondiente al 27 de mayo de 2016, coincidiendo para todos los resultados en ser el día 147 de 366 del año. Se pueden observar pequeñas variaciones en los resultados del cálculo de los números de punto flotante, resultado de la diferencia en la capacidad de memoria que tiene cada uno de los dispositivos utilizados.

diayear = 147	day number 147 days	Diayear: 147.00
EoT = 3.0307	EoT 3.01 min	EoT: 3.03
TC = -28.8715	Time Corr. -28.99 min	TC: -28.87
decligrad = 21.0586	declination 21.27 deg.	Declin: 21.12
HRA = 55.1132	hour angle 55.25 deg.	HRA: 55.11
elevaciongrad = 38.4251	altitude 38.34 deg.	Elevacion: 38.43
azimuthgrad = 282.2783	azimuth 282.52 deg.	Azimet: 282.35

MATLAB

CALCULADORA SOLAR

ARDUINO

Figura 53: Comparación del procesamiento de las ecuaciones que definen la trayectoria solar.

La siguiente parte de la comprobación integra el análisis de la potencia eléctrica instantánea otorgada por dos paneles fotovoltaicos; la medición de este parámetro se realiza a través de una placa de caracterización diseñada, desarrollada y fabricada durante el desarrollo de este trabajo. El circuito de esta placa de

caracterización implementa el uso de una resistencia de carga de $10\ \Omega$, necesaria para obtener la corriente del panel; se elige el valor de resistencia anterior a fin de obtener el mayor aprovechamiento de la potencia eléctrica y hacer más sencillas los cálculos matemáticos. Es utilizado un sensor de corriente de tipo analógico para medir la corriente producida; el sensor tiene la capacidad de medir niveles de corriente de hasta 30A. Para la medición de los niveles de voltaje, se tomaron mediciones en circuito abierto; los valores de voltaje alcanzados fueron de hasta 21V, es por eso que se construyó un divisor de voltaje a fin de cuidar la integridad de la tarjeta Arduino Mega2560, ya que ésta solamente tiene la capacidad de leer voltajes en una gama de 0V a 5V. Los valores de las resistencias utilizadas en el divisor de voltaje fueron elegidas para operar con paneles fotovoltaicos de hasta 55V; se buscó que fuese sencillo conseguir las resistencias necesarias, por eso se eligieron valores comerciales de resistencia: $100\text{K}\Omega$ y $10\text{K}\Omega$. Finalmente, el circuito implementa un amplificador operacional en modo seguidor de voltaje, debido a la alta impedancia de entrada generada por el divisor de voltaje y, obtener una salida con baja impedancia que permita tener la corriente requerida por el microcontrolador para hacer las mediciones adecuadas de los niveles de voltaje; la figura 54 muestra el circuito desarrollado para la caracterización de los paneles fotovoltaicos.

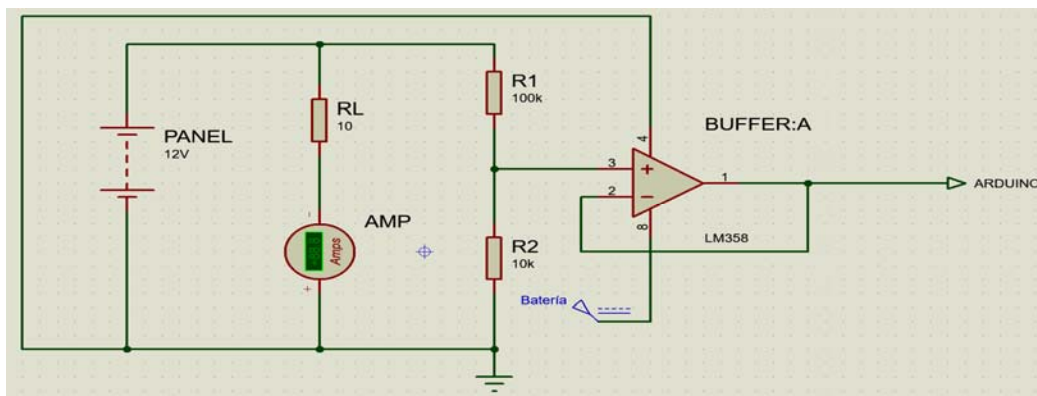


Figura 54. Circuito de caracterización de paneles fotovoltaicos.

En la figura 55 se muestra el diagrama para construir el circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) de la placa de caracterización de paneles fotovoltaicos; el PCB fue desarrollado en el software Proteus, haciendo uso de la extensión Ares.

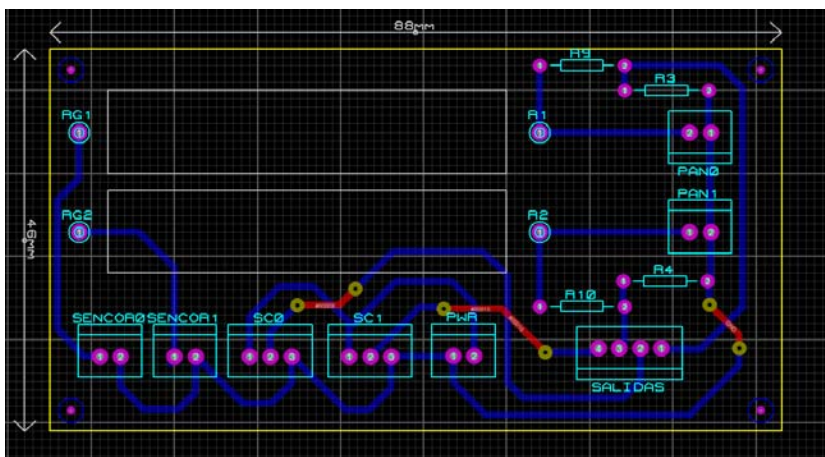


Figura 55. PCB de la placa de caracterización de paneles fotovoltaicos.

En la figura 56 se observa el módulo de control del SASS, construido para el acoplamiento de los distintos circuitos eléctricos y electrónicos, necesarios para el procesamiento de la información y su correcta comunicación una tarjeta de desarrollo Arduino2560. El módulo está conformado por una tarjeta de circuito impreso y una caja de acrílico pulido, recubierto con una laca para evitar que la irradiación solar dañe los circuitos eléctricos contenidos en su interior. Además, se incluyeron conectores del tipo banana para la fácil manipulación de las conexiones de los actuadores y la fuente de alimentación del sistema.



Figura 56. Módulo de control del SASS de la radiación solar.

En la figura 57 se muestra el prototipo de laboratorio solar, quien tiene instalado el panel fotovoltaico que permite el estudio del seguimiento solar. El desarrollo de este prototipo, junto con el módulo de control, son parte fundamental del trabajo mostrado a lo largo de este documento; estos dos elementos definen y permiten el funcionamiento del SASS.



Figura 57. Prototipo de laboratorio solar.

Como puede ser observado, el primero de los paneles fotovoltaicos se instala en la estructura del prototipo de laboratorio solar, esto permite obtener la potencia eléctrica en condición de seguimiento solar. El segundo panel se posiciona estático con orientación hacia el sur, o 180° de azimut solar, y con una elevación solar de 19° , correspondientes a la latitud de la ciudad de Puebla; esta posición se determinó, debido a que es así como comúnmente se instalan los paneles, o calentadores solares, en los techos de las viviendas o edificios. Es importante mencionar que el ángulo de elevación solar es determinado por la latitud del lugar en que se instalan los sistemas estáticos.

En la figura 58 se puede observar la forma en que se posicionaron ambos paneles fotovoltaicos durante el periodo de pruebas experimentales; las pruebas se realizaron para verificar el funcionamiento del SASS y para obtener los niveles de producción de potencia eléctrica instantánea, tanto en el SASS como en el panel estático. El estudio experimental fue realizado en la terraza del Laboratorio de Energía Solar, ubicado en el edificio FCE5 de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.



Figura 58. Pruebas experimentales del SASS.

Para la comprobación del correcto almacenamiento de la información, se construyó una base de datos en la tarjeta SD; en la figura 59 se muestra una parte de la información recopilada a lo largo de las pruebas experimentales, ésta información fue procesada en el software de Microsoft Excel. La base de datos, guarda información como: la posición del sol, la posición geográfica, la fecha, la hora y la potencia eléctrica instantánea producida por los paneles fotovoltaicos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Q	R	S	T	U
	Azimut	Elevación	Latitud	Longitud	Día	Mes	Año	Hora	Minutos	Watts Seguimiento	Watts Estático			
1	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.09	4.99			
2	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	4.99			
3	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.09	4.99			
4	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	4.99			
5	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	4.95			
6	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.09	4.99			
7	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	4.99			
8	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	4.99			
9	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	4.99			
10	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.09	4.99			
11	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.09	4.99			
12	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	5.00			
13	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	4.99			
14	80.29	68.91	19.00	-98.20	26	5	16	11	0	6.08	5.00			
15	80.27	69.14	19.00	-98.20	26	5	16	11	1	6.08	4.96			
16	80.27	69.14	19.00	-98.20	26	5	16	11	1	6.40	4.99			
17	80.27	69.14	19.00	-98.20	26	5	16	11	1	6.39	5.00			
18	80.27	69.14	19.00	-98.20	26	5	16	11	1	6.39	5.00			
19	80.27	69.14	19.00	-98.20	26	5	16	11	1	6.09	5.00			
20	80.27	69.14	19.00	-98.20	26	5	16	11	1	6.08	5.00			

Figura 59. Base de datos del SASS.

Haciendo uso de los datos recopilados por la memoria SD, y de la calculadora solar mencionada anteriormente, se obtuvieron las figuras 60 y 61, que muestran gráficos comparativos de la forma en que el SASS y la calculadora realizan el procesamiento de las ecuaciones de seguimiento solar. Esta comparativa se realiza estudiando el modo en que se dibujan los ángulos de azimut y elevación durante el periodo de pruebas. Se muestra un acercamiento para demostrar a detalle la pequeña diferencia que existe al obtener los ángulos, por parte del microcontrolador de Arduino y por parte del microprocesador de una PC; en azul se observan los ángulos calculados por el microcontrolador y en rojo los datos desde la página de internet, donde se puede consultar la calculadora solar. Con esto se demuestra, de manera gráfica, que el SASS tiene la capacidad de emular a un microprocesador en la obtención de los ángulos de azimut y elevación solar.

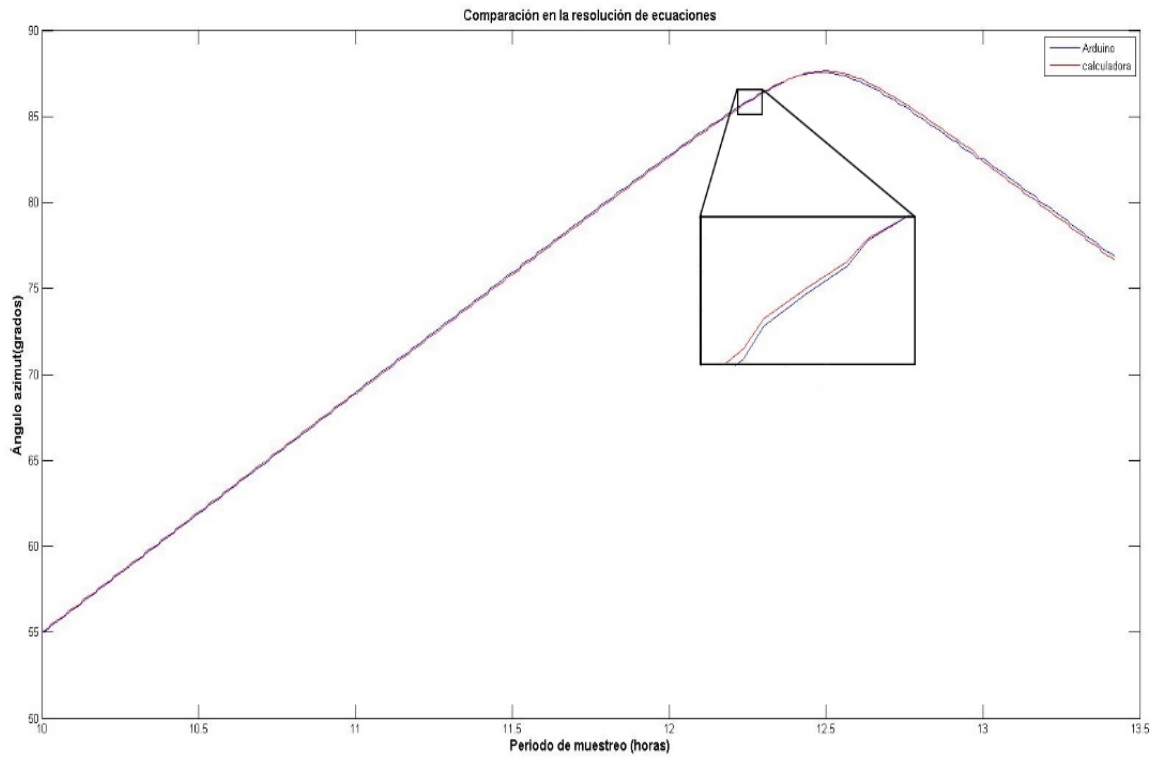


Figura 60. Gráfico comparativo del cálculo del ángulo de azimut.

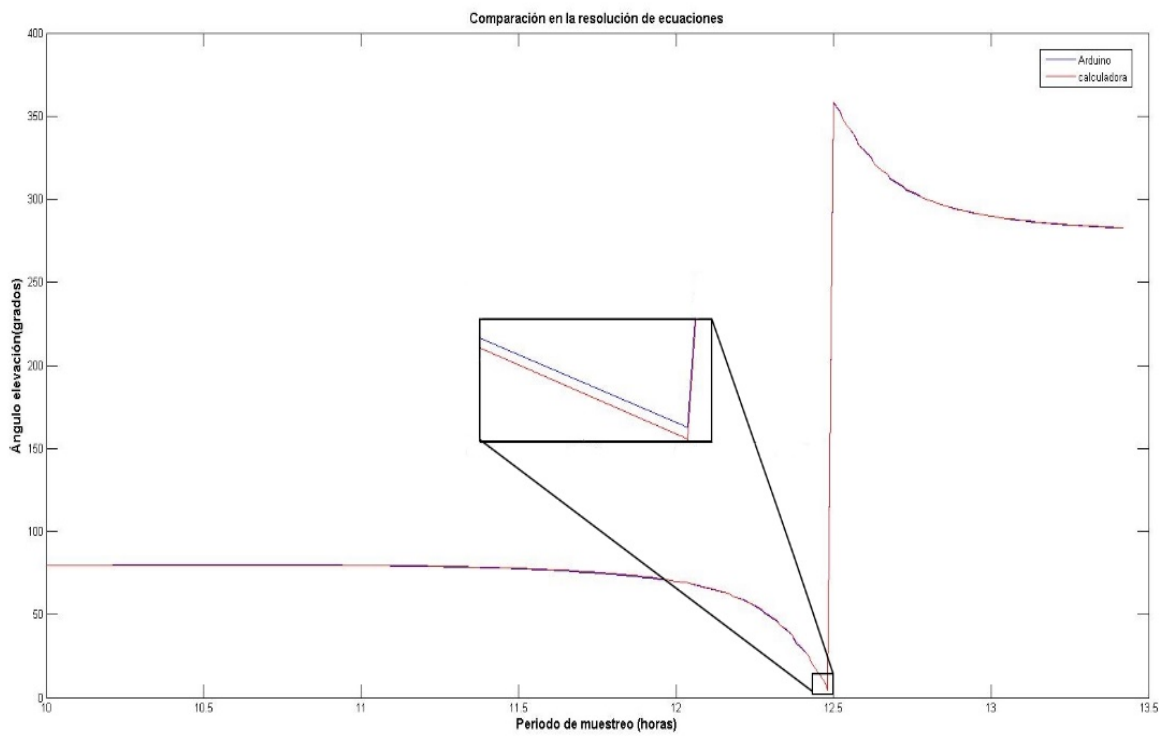


Figura 61. Gráfico comparativo del cálculo del ángulo de elevación.

Las pruebas experimentales, para la demostración de las ventajas que tiene implementar un sistema de seguimiento solar en comparación a un sistema estático, fueron realizadas durante distintos días de la semana con características climatológicas diferentes; en la figura 62 se observa en azul la potencia eléctrica generada por el panel estático y en rojo la potencia eléctrica del panel con seguimiento solar, estudio correspondiente al lapso comprendido entre las 10:00 horas y las 13:30 horas del día 26 de mayo de 2016. Las distintas variaciones que se pueden observar a lo largo de la figura 62, se deben a que este día las condiciones climáticas presentaban un cielo parcialmente nublado; en el lapso comprendido entre las 13:00 y 13:30 se observa que la potencia de ambos paneles casi se traslapa, debido a que en este momento la posición de ambos paneles es casi idéntica, alcanzando niveles muy similares de producción de potencia eléctrica.

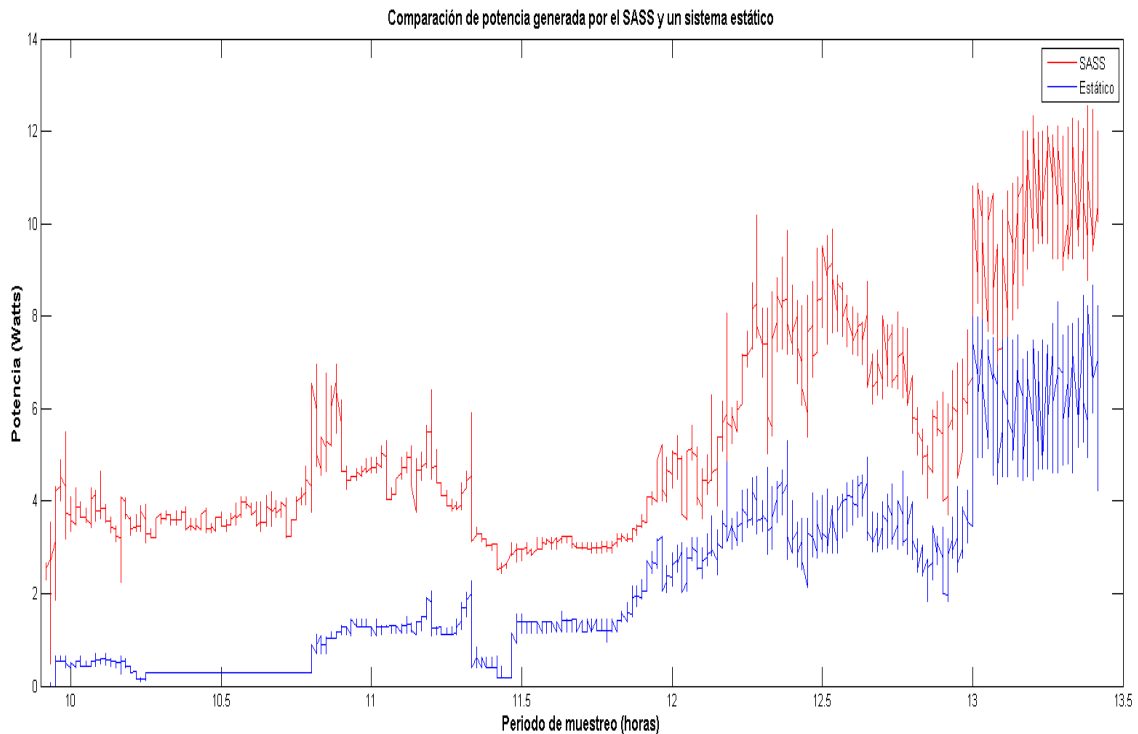


Figura 62. Gráfico de datos obtenidos por el SASS para un día normal.

En la figura 63 se muestran los datos del día 27 de mayo de 2016, donde las condiciones climatológicas presentaron una alta intermitencia de nubes, por lo que se observan notables variaciones de potencia eléctrica generada; en el lapso comprendido entre las 15:00 y las 16:00 horas, una gran capa de nubosidad cruzó por el cielo ocultando el sol por un periodo largo de tiempo, significando esto una disminución notable de la producción de potencia eléctrica.

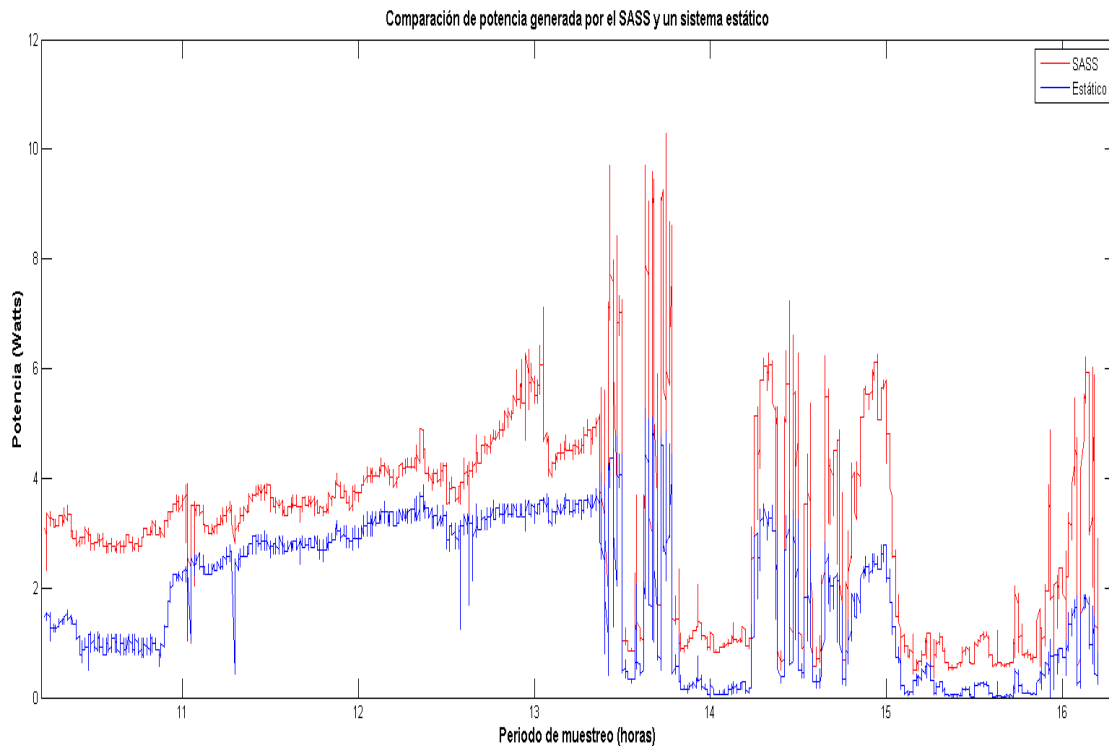


Figura 63. Gráfico de datos obtenidos por el SASS para un día con mucha nubosidad.

Una tercera prueba fue realizada el día 31 de mayo de 2016, donde las condiciones climatológicas permitieron tener un día con muy poca, casi nula, cantidad de nubes; las condiciones climatológicas de este día propiciaron el observar un efecto más uniforme en la generación de potencia eléctrica por parte de ambos paneles. En la figura 64 se muestra en rojo el comportamiento de la producción de potencia eléctrica por parte del panel fotovoltaico integrado al SASS, y en azul los datos del panel fotovoltaico estático; se observa claramente la diferencia que existe en la producción energética, mostrando las cualidades que brinda utilizar el SASS como método de seguimiento solar.

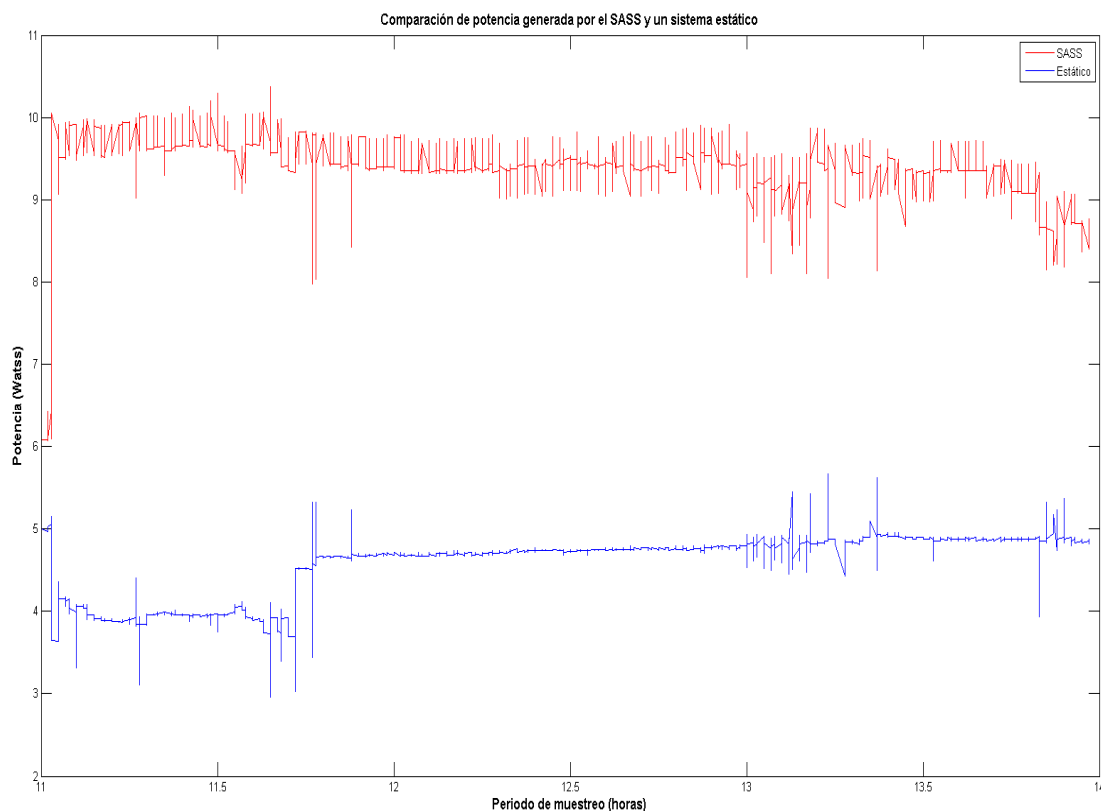


Figura 64. Gráfico de datos obtenidos por el SASS para un día totalmente despejado.

De los datos obtenidos durante el periodo de pruebas, se pudieron observar los niveles máximo, mínimo y promedio de la potencia eléctrica producida por ambos paneles fotovoltaicos; los datos recopilados son mostrados para cada uno de los días estudiados en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3. Potencia eléctrica registrada para el 26 de mayo.

Sistema	Máxima	Mínima	Promedio
SASS	12.5 W	0.47 W	5.35 W
Estático	8.66 W	0.15 w	2.23 W

Tabla 4. Potencia eléctrica registrada para el 27 de mayo.

Sistema	Máxima	Mínima	Promedio
SASS	10.28 W	0.24 W	3.74 W
Estático	5.28 W	0.1 W	1.89 W

Tabla 5. Potencia eléctrica registrada para el 31 de mayo.

Sistema	Máxima	Mínima	Promedio
SASS	9.99 W	7.98 W	9.35 W
Estático	5.66 W	3.03 W	4.75 W

Con ayuda de la información obtenida de las figuras 62, 63 y 64, y de las tablas 3, 4 y 5, se verifica la aportación positiva del SASS hacia la mejor producción de potencia eléctrica, donde se tiene un promedio de aproximadamente el doble de potencia eléctrica producida; es evidente, y claro de distinguir, el aumento de la potencia eléctrica instantánea producida por el panel instalado en el laboratorio con seguimiento solar respecto a la potencia eléctrica instantánea producida por el panel estático.

Para hacer el análisis en términos del rendimiento que tiene el SASS respecto al panel estático, se hace un estudio de la cantidad de energía disponible, la energía entregada por el panel estático y la energía entregada por el SASS. El consumo eléctrico del SASS es de en promedio de 1.5W, es importante tomar en cuenta el consumo eléctrico que tiene el SASS para poder realizar su función ya que éste tiene un impacto sobre el rendimiento del sistema puesto que, aunque el panel estático produce menos energía, este no consume potencia eléctrica para poder moverse. Tomando en consideración esto, se tiene que para un día en condiciones de alta irradiación solar con un promedio de 9.15W de potencia eléctrica generada y un consumo de 1.5W, la potencia aprovechable es de 7.85W, cantidad mayor a

los 4.75W que son producidas por el sistema estático. Incluso para un día con condiciones de poca irradiación solar, donde en promedio se obtuvieron 3.74W en el SASS y consumiendo los 1.5W, la potencia eléctrica disponible es equivalente a 2.24W que es mayor a los 1.89W que promedia el panel estático.

Para evaluar el rendimiento de ambos paneles se toma en consideración la cantidad de irradiación solar disponible, calculada mediante la utilización de un piranómetro. El piranómetro empleado entrega una relación de 82uV por cada watt de energía disponible para una superficie de un metro cuadrado. Fue necesario utilizar una etapa de amplificación de señal para la correcta lectura de la información por parte del microcontrolador, esta información fue almacenada junto a las demás variables en la memoria SD; la figura 65 muestra el gráfico con los datos obtenidos del piranómetro.

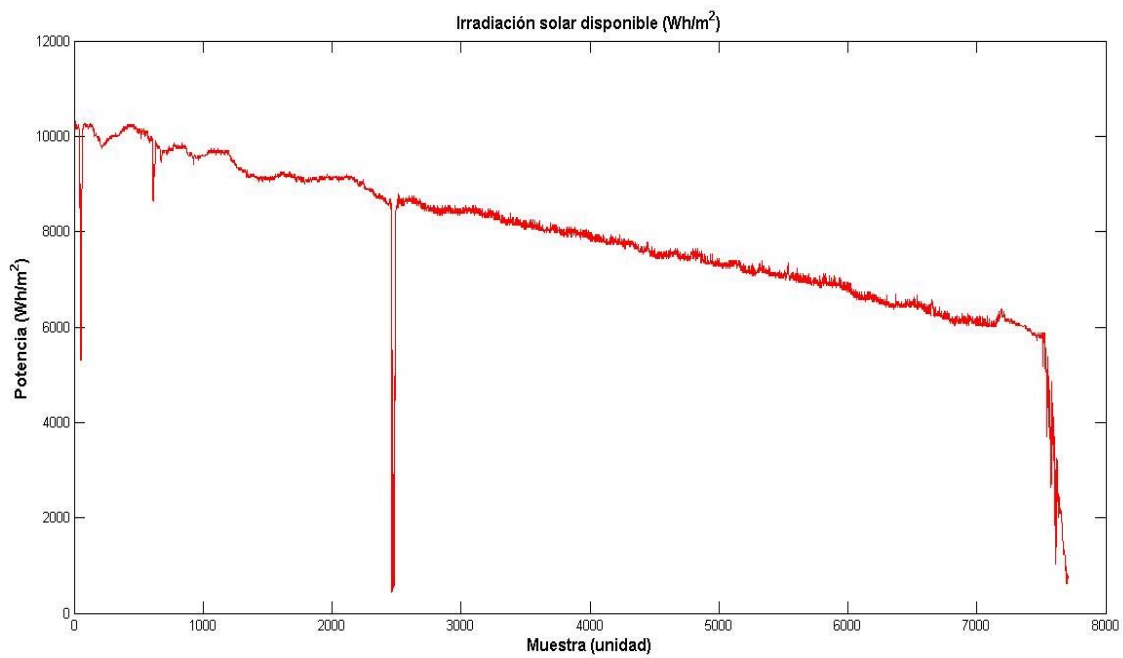


Figura 65. Gráfico de irradiación solar disponible obtenido con un piranómetro

Del estudio realizado con el piranómetro se obtuvo que en promedio existe disponible 6200 $\text{Wh/m}^2/\text{día}$, esto traducido a términos de potencia eléctrica nos otorga un promedio de 41.3W que podrían ser aprovechables en la superficie de

0.08 m² de cada panel. Comparando la cantidad de Watts promedio generados por el SASS y por el panel estático, se tiene que el rendimiento del panel instalado en el SASS aprovecha 19.0% de la energía disponible, mientras que el panel estático aprovecha únicamente el 11.5%; de estos datos se observó que haciendo uso de este sistema de seguimiento solar es posible aumentar el rendimiento en la producción de potencia eléctrica en un factor del 7.5%.

CONCLUSIONES

Del presente trabajo se puede concluir que se obtuvieron de manera satisfactoria los objetivos propuestos.

- Las variables que describen la trayectoria solar aparente (tiempo y posición geográfica) fueron procesadas de manera adecuada, obteniendo así la función que define el seguimiento solar autónomo.
- Se realizó la implementación de un sistema controlado por la plataforma Arduino partiendo, en primera instancia, del diseño y construcción de un prototipo de laboratorio solar y el uso de paneles solares para comprobar el funcionamiento de Sistema Autónomo de Seguimiento Solar.
- En relación al uso de los paneles, se demuestra la aportación que da el implementar un sistema de seguimiento solar a dispositivos que usualmente se encuentran estáticos.
- Es demostrable que la conversión directa de energía tiene un impacto positivo, se seguirán estudiando las ventajas que tienen este tipo de sistemas aplicados a distintas formas de conversión de energía.
- Finalmente, se tienen los registros de las bases de datos de la información recopilada a lo largo de la etapa experimental de pruebas; estos datos pueden ser utilizados para hacer análisis estadísticos sobre la producción energética y continuar con el estudio del fenómeno del seguimiento solar.

TRABAJO A FUTURO

A la par de la realización este trabajo, la comunidad científica se encuentra desarrollando una tecnología con gran impacto, llamada Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés). Esta tecnología permite crear una red de trabajo entre dispositivos de uso diario y el internet. Se propone el hacer uso de estos elementos para agregar al Sistema Autónomo de Seguimiento Solar un medio de comunicación y monitoreo a distancia, pues se observó que la exposición a la radiación solar, por parte de la persona que hace el estudio del seguimiento solar, es dañina para la salud de éste último.

Es necesario también, crear un medio de aislamiento y protección para las partes electrónicas; al ser un sistema que trabaja al aire libre, son diversas las condiciones a la que se expone el sistema como: agua, aire y calor. Este aislamiento se propone, principalmente, para proteger a los sensores de posición del sistema y a los motores de corriente continua, que sirven como actuadores del prototipo.

Se propone la implementación de este proyecto en sistemas más robustos, en cuanto a estructura mecánica y potencia eléctrica, como ejemplo se tiene el concentrador solar del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores de la BUAP o el concentrador solar de Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

Otro punto a considerar es el análisis de la cantidad de energía producida a lo largo de un periodo de tiempo, evaluando la cantidad de Joules eléctricos generados por el SASS.

Finalmente, existe la posibilidad de crear un sistema de mayor precisión a través de la implementación de algún otro algoritmo de control, el análisis de otro tipo de resolución de los ángulos de seguimiento solar o empleando sensores con resoluciones más pequeñas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sheng Hsieh Jui, "Solar Energy Engineering", Prentice Hall, EE.UU. (1996).
- [2] Krieth, F., Krieger, J., "Principles of Solar Engineering", Mc Graw Hill, EE.UU. (1978).
- [3] Rabbani, A., Afrin, F., Siddique, A., y Sanjidah, S., "Installing Dual Axis Solar Tracker on Rooftop to Meet the Soaring Demand of Energy for Developing Countries", Annual IEEE India Conference (2013).
- [4] Shri, K., Shri, Y. y Eshwara, R., "Constantly Functioning Arduino Based Solar Tracker Enabled Solar Panels Coupled With Hydrogen Fuel Cell", International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy, India (2013).
- [5] Recio, J., "Energía Solar", [En línea], Disponible: http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/solar.htm. Extraído el 4 de enero de 2016.
- [6] Lee, J. y Nasrudin, R., "Performance Comparison of Dual-Axis Solar Tracker vs. Static Solar System in Malaysia", IEEE Conference on Clean Energy and Technology, Malasia (2013).
- [7] Mosquera, P., "Los países líderes de la energía solar fotovoltaica", [En línea], Disponible en: <http://www.energias-renovables.com/articulo/los-paises-lideres-de-la-energia-solar-20151124>. Extraído el 4 de enero de 2016.
- [8] Titirsha, T., Siddique, A. y Afrin, F., "Introducing dual axis solar tracker with reflector to increase optimal electricity generation in Bangladesh", Bangladesh (2014).
- [9] García, F., Moya, E., Cervero, V., y López, D., "Full building of a Sun Tracker and Control", 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation, España (2015).
- [10] Ataei, E., Afshari, R., Pourmina, M. y Reza, M., "Design and Construction of a Fuzzy Logic Dual Axis Solar Tracker based on DSP", 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation, Irán (2011).
- [11] Pérez, A., "Sistema de control para un concentrador solar tipo polar", Tesis de Licenciatura, Puebla, México. (2013).

- [12] Elagib, S. y Osman, N., "Design and Implementation of Dual Axis Solar Tracker based on Solar Maps", International Conference on Computing, Electrical and Electronic Engineering, Sudán (2013).
- [13] First Solar, "The First Solar Tracker", [En línea], Disponible en: <http://www.firstsolar.com/Our-Advantage.aspx>. Extraído el 4 de enero de 2016.
- [14] LINAK Group, "Solar Tracking", [En línea], Disponible en: <http://www.solar-tracking.com/>. Extraído el 4 de enero de 2016.
- [15] Almanza, R., y López, S., "Radiación solar en la República Mexicana mediante datos de insolación", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, 357, México, 1-23.
- [16] National Renewable Energy Laboratory, [En línea], Disponible en: <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer>. Extraído el 30 de mayo de 2016.
- [17] Williamson, Gordon, "The Sun's surprising movement across the sky", [En línea], Disponible en: https://youtu.be/Xm13Kq_E1ik. Extraído el 6 de enero de 2016.
- [18] Honsberg, C. y Bowden, S., "Properties of sunlight: The Sun's position", [En línea], Disponible en: <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/suns-position>. Extraído el 30 de mayo de 2016.
- [19] Moreno, L., "Solución de las ecuaciones de la trayectoria solar", Tesis de Maestría, Puebla, México (2009).
- [20] Valdés, F., "Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC", Alfaomega, México-Barcelona (2007).
- [21] NXP Semiconductors, "UM10204: I²C-bus specification and user manual", Revisión 6, (2014).
- [22] Jimb0, "Serial communication", [En línea], Disponible en <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication>. Extraído el 30 de mayo de 2016.
- [23] STMicroelectronics, "TN0897 Technical note: ST SPI protocol", Revisión 2, (2013).

- [24] Cooper, T., "What is an RTC?", [En línea], Disponible en: <https://learn.adafruit.com/ds1307-real-time-clock-breakout-board-kit/what-is-an-rtc>. Extraído el 30 de mayo de 2016.
- [25] McWilliam, N., Teeuw R., Whiteside M. y Zukowskyj, P., "GIS, GPS and Remote Sensing", Royal Geographical Society, (2005).
- [26] "How to use MMC/SDC", Página web disponible en: http://elm-chan.org/docs/mmc/mmc_e.html. Extraído el 6 de enero de 2016.
- [27] Plitnik, G., "Accelerometers", Salem Press Encyclopedia of Science, (2016).
- [28] NXP Semiconductor, " $\pm 1.5G$, $\pm 6G$ Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer", Hoja de datos, Revisión 0, (2008).
- [29] Encyclopedia Britannica, "Magnetometer", (2014).
- [30] Norton, R., "Diseño de Maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos", Mc Graw Hill, EE.UU., (2009).
- [31] Ogata, K., "Ingeniería de control moderna", Pearson Educación, Madrid, (2010).
- [32] Alarcón, A., Hortúa, J. y López, A., "Comparison of thermal solar collector technologies and their applications", TECCIENCIA (2013).
- [33] Cañadas, I., Martínez, D., Rodríguez, J., y Gallardo, J., "Viabilidad del uso de la radiación solar concentrada al proceso de sinterización de cobre", Revista de metalurgia, España, (2005).
- [34] Honsberg, C. y Bowden, S., "Properties of sunlight: Sun Position Calculator", [En línea], Disponible en: <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator>. Extraído el 6 de enero de 2016.

GLOSARIO

Actuador lineal: Dispositivo mecánico que permite transformar energía eléctrica en energía mecánica y transmitirla de forma lineal.

Afelio: Punto más alejado de la órbita de un planeta que gira alrededor del Sol.

Ambiente de desarrollo: En programación se refiere a la interfaz usuario-máquina que permite la codificación de programas.

Analema solar: Diagrama que muestra la desviación del Sol desde su movimiento promedio a lo largo del cielo.

Analogía: Relación de semejanza entre dos elementos distintos.

Arduino: Tarjeta de desarrollo creada por la empresa homónima que permite integrar componentes electrónicos a un microcontrolador para resolver problemas específicos.

Asíncrono: Que no tiene lugar en completa correspondencia temporal con otro proceso o con la causa que lo produce.

Autónomo: Que no requiere de un agente externo para cumplir sus funciones.

Bit: Unidad de información más pequeña en una computadora.

Brújula: Dispositivo que a través de una aguja imantada señala el norte magnético, que sirve para determinar la orientación geográfica de un objeto.

Bus: Sistema de comunicación que permite la transferencia de datos entre los componentes dentro de una computadora.

Campo magnético: Campo de fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas. La intensidad de un campo magnético se mide en Gauss (G) o Tesla (T).

Circuito integrado: Circuito electrónico formado sobre una pequeña pieza de material semiconductor.

Coadyuvar: Contribuir o ayudar en la realización de algo o en el logro de algún objetivo.

Compilación: Serie de instrucciones que permite traducir instrucciones de un programa en lenguaje binario.

Diferencia de potencial: Magnitud física que cuantifica la variación de potencial eléctrico entre dos puntos.

Eje eclíptico: Línea que dibuja la relación entre el centro de la Tierra y el centro del Sol, a lo largo del cual se realiza el movimiento aparente del Sol.

Emular: Imitar las acciones de otro elemento procurando igualarlo o superarlo.

Estado lógico: En sistemas digitales es la condición en que se encuentra un elemento. Existen dos estados lógicos: verdadero y falso o alto y bajo.

Excentricidad: Parámetro que determina el grado de desviación de una sección cónica con respecto a una circunferencia.

Impedancia: Oposición que presenta un circuito al paso de una corriente eléctrica.

Lógica difusa: Lógica basada en lo relativo a lo observado. Pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que evalúa.

Microcontrolador: Dispositivo electrónico programable compuesto de varios bloques para cumplir una función específica.

Modulable: Que tiene la capacidad de ser ajustable, regulado o adaptable a las necesidades del usuario.

Módulo: Componente independiente que pertenece a un sistema.

Paridad: Corrección en los errores de transmisión.

Perihelio: Punto más cercano de la órbita de un planeta que gira alrededor del Sol.

Piezoeléctrico: Dispositivos que al someterse a una deformación o esfuerzo generan una carga eléctrica.

Plano ecuatorial: Plano perpendicular al eje de rotación de un planeta y que pasa por su centro.

Predictivo: Que tiene la capacidad de anunciar algo que va a suceder en un futuro.

Protocolo de comunicación: Sistema de reglas que permiten que dos o más entidades se comuniquen entre ellas para transmitir información.

Prototipo: Ejemplar original en que se fabrica una figura.

Robusto: Que tiene la capacidad de mantener sus condiciones esenciales de desempeño pese a recibir perturbaciones.

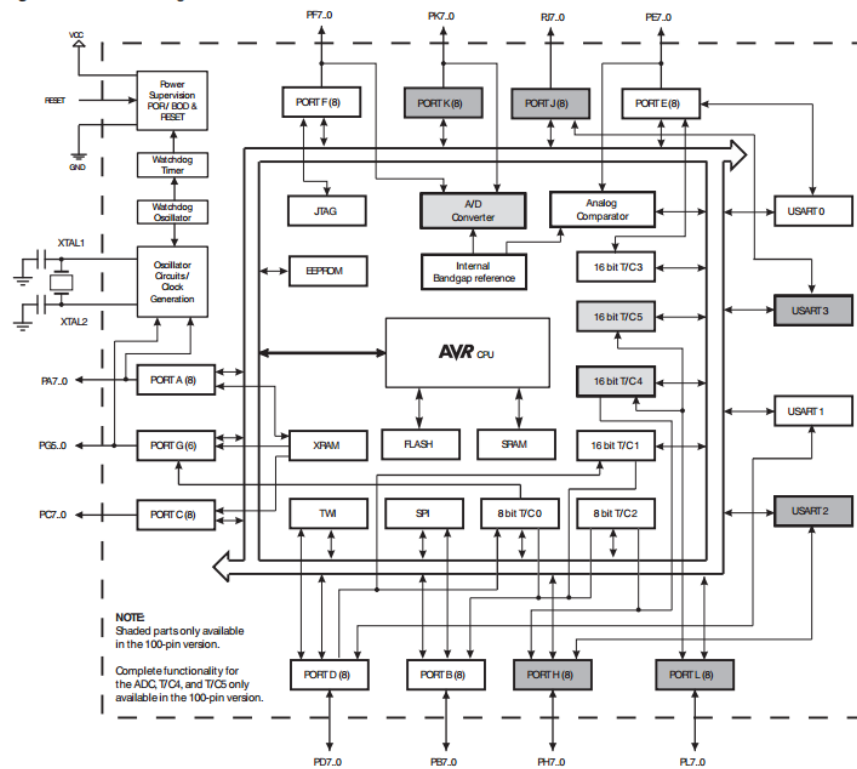
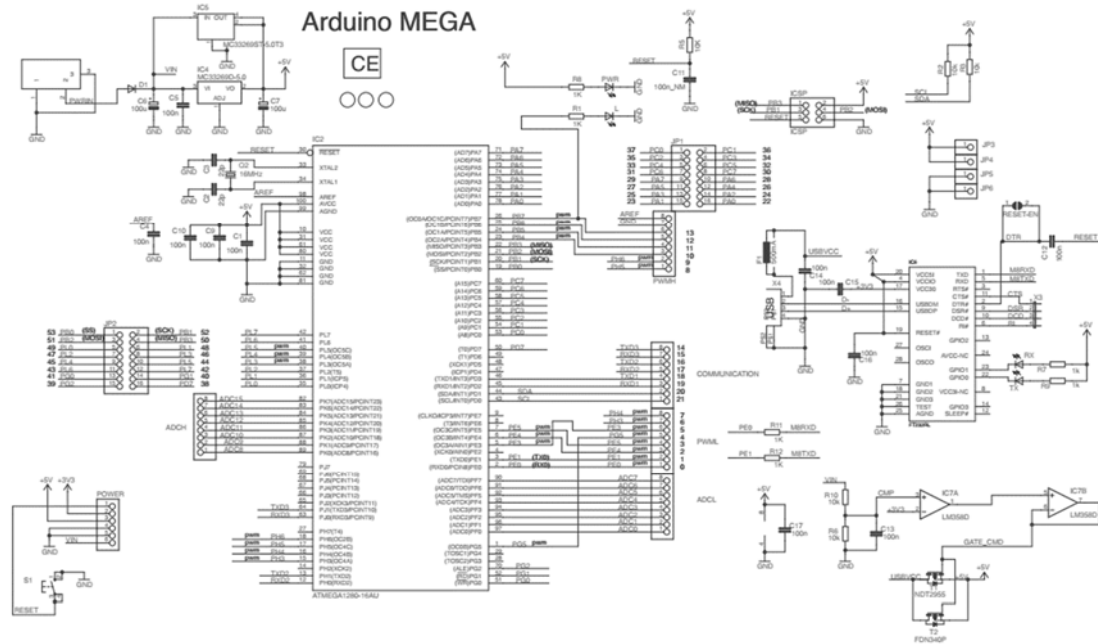
Síncrono: (Comunicación) Que está en coordinación antes del envío de datos.

Sintetizar: Recoger las ideas principales de un asunto o materia.

Sistema embebido: Sistema computacional diseñado para realizar una o pocas funciones dedicadas.

Termoeléctrico: Que tiene la capacidad de convertir energía térmica en energía eléctrica.

APÉNDICE A: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO ARDUINO MEGA 2560



APÉNDICE B: RTC DS3231

DS3231

Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

General Description

The DS3231 is a low-cost, extremely accurate I²C real-time clock (RTC) with an integrated temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) and crystal. The device incorporates a battery input, and maintains accurate timekeeping when main power to the device is interrupted. The integration of the crystal resonator enhances the long-term accuracy of the device as well as reduces the piece-part count in a manufacturing line. The DS3231 is available in commercial and industrial temperature ranges, and is offered in a 16-pin, 300-mil SO package.

The RTC maintains seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The date at the end of the month is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. Two programmable time-of-day alarms and a programmable square-wave output are provided. Address and data are transferred serially through an I²C bidirectional bus.

A precision temperature-compensated voltage reference and comparator circuit monitors the status of V_{CC} to detect power failures, to provide a reset output, and to automatically switch to the backup supply when necessary. Additionally, the RST pin is monitored as a pushbutton input for generating a μ P reset.

Benefits and Features

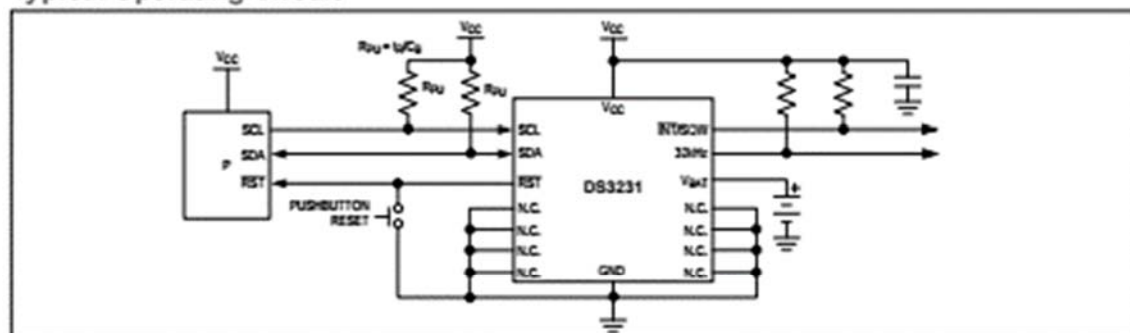
- Highly Accurate RTC Completely Manages All Timekeeping Functions
 - Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Date of the Month, Month, Day of the Week, and Year, with Leap-Year Compensation Valid Up to 2100
 - Accuracy ± 2 ppm from 0°C to +40°C
 - Accuracy ± 3.5 ppm from -40°C to +85°C
 - Digital Temp Sensor Output: $\pm 3^\circ\text{C}$ Accuracy
 - Register for Aging Trim
 - RST Output/Pushbutton Reset Debounce Input
 - Two Time-of-Day Alarms
 - Programmable Square-Wave Output Signal
- Simple Serial Interface Connects to Most Microcontrollers
 - Fast (400kHz) I²C Interface
- Battery-Backup Input for Continuous Timekeeping
 - Low Power Operation Extends Battery-Backup Run Time
 - 3.3V Operation
- Operating Temperature Ranges: Commercial (0°C to +70°C) and Industrial (-40°C to +85°C)
- Underwriters Laboratories® (UL) Recognized

Applications

- Servers
 - Utility Power Meters
- Telematics
 - GPS

Ordering Information and Pin Configuration appear at end of data sheet.

Typical Operating Circuit



Underwriters Laboratories is a registered certification mark of Underwriters Laboratories Inc.

APÉNDICE C: GPS U-BLOX 6

Receiver performance data

Receiver type	50-channel u-blox 6 engine GPS L1 C/A code SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS		
Navigation update rate	up to 5 Hz		
Accuracy ¹	Position	2.5 m CEP	
	SBAS	2.0 m CEP	
Acquisition ¹		NEO-6G/Q	NEO-6M
	Cold starts:	26 s	27 s
	Aided starts ² :	1 s	< 3 s
	Hot starts:	1 s	1 s
Sensitivity ³		NEO-6G/Q	NEO-6M
	Tracking:	-162 dBm	-161 dBm
	Cold starts:	-148 dBm	-147 dBm
	Hot starts:	-157 dBm	-156 dBm

¹ All SV @ -130 dBm

² Dependent on aiding data connection speed and latency

³ Demonstrated with a good active antenna

Electrical data

Power supply	2.7 V – 3.6 V (NEO-6Q/6M) 1.75 V – 2.0 V (NEO-6G)
Power consumption	111 mW @ 3.0 V (continuous) 33 mW @ 3.0 V Power Save Mode (1 Hz) 68 mW @ 1.8 V (continuous) 22 mW @ 1.8 V Power Save Mode (1 Hz)
Backup power	1.4 V – 3.6 V, 22 µA
Supported antennas	Active and passive

Interfaces

Serial interfaces	1 UART 1 USB V2.0 full speed 12 Mbit/s 1 DDC (I ² C compliant) 1 SPI
Digital I/O	Configurable timepulse 1 EXTINT input for Wakeup
Serial and I/O	Voltages 2.7 – 3.6 V (NEO-6Q/6M) 1.75 – 2.0 V (NEO-6G)
Timepulse	Configurable 0.25 Hz to 1 kHz
Protocols	NMEA, UBX binary, RTCM

Legal Notice

u-blox reserves all rights to this document and the information contained herein. Products, names, logos and designs described herein may in whole or in part be subject to intellectual property rights. Reproduction, use, modification or disclosure to third parties of this document or any part thereof without the express permission of u-blox is strictly prohibited.

The information contained herein is provided "as is". No warranty of any kind, either express or implied, is made in relation to the accuracy, reliability, fitness for a particular purpose or content of this document. This document may be revised by u-blox at any time. For most recent documents, please visit www.u-blox.com.

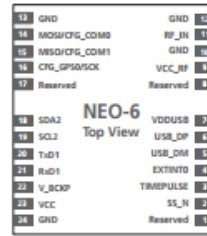
Copyright © 2011, u-blox AG

Specification applies to FW 7

Package

24 pin LCC (Leadless Chip Carrier): 12.2 x 16.0 x 2.4 mm, 1.6 g

Pinout



Environmental data, quality & reliability

Operating temp. -40° C to 85° C

Storage temp. -40° C to 85° C

RoHS compliant (lead-free)

Qualification according to ISO 16750

Manufactured in ISO/TS 16949 certified production sites

Support products

u-blox 6 Evaluation Kits:

Easy-to-use kits to get familiar with u-blox 6 positioning technology, evaluate functionality, and visualize GPS performance.

EVK-6H: u-blox 6 Evaluation Kit with TCXO, suitable for NEO-6G, NEO-6Q

EVK-6P: u-blox 6 Evaluation Kit with crystal, suitable for NEO-6M

Ordering information

NEO-6G-0	u-blox 6 GPS Module, 1.8V, TCXO, 12x16mm, 250 pcs/reel
NEO-6M-0	u-blox 6 GPS Module, 12x16mm, 250 pcs/reel
NEO-6Q-0	u-blox 6 GPS Module, TCXO, 12x16mm, 250 pcs/reel

Available as samples and tape on reel (250 pieces)

Contact us

HQ Switzerland +41 44 722 7444 info@u-blox.com	China +86 10 68 133 545 info_cn@u-blox.com
EMEA +41 44 722 7444 info@u-blox.com	Japan +81 3 5775 3850 info_jp@u-blox.com
Americas +1 703 483 3180 info_us@u-blox.com	Korea +82 2 542 0861 info_kr@u-blox.com
APAC – Singapore +65 6734 3811 info_ap@u-blox.com	Taiwan +886 2 2657 1090 info_tw@u-blox.com

APÉNDICE D: ACELERÓMETRO MMA7361L



NXP
Analog Semiconductor
Technical Data

Document Number: MMA7361L
Rev 0, 04/2008

✓RoHS

±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer

The MMA7361L is a low power, low profile capacitive micromachined accelerometer featuring signal conditioning, a 1-pole low pass filter, temperature compensation, self test, 0g-Detect which detects linear freefall, and g-Select which allows for the selection between 2 sensitivities. Zero-g offset and sensitivity are factory set and require no external devices. The MMA7361L includes a Sleep Mode that makes it ideal for handheld battery powered electronics.

Features

- 3mm x 5mm x 1.0mm LGA-14 Package
- Low Current Consumption: 400 μ A
- Sleep Mode: 3 μ A
- Low Voltage Operation: 2.2 V – 3.6 V
- High Sensitivity (800 mV/g @ 1.5g)
- Selectable Sensitivity ($\pm 1.5g$, $\pm 6g$)
- Fast Turn On Time (0.5 ms Enable Response Time)
- Self Test for Freefall Detect Diagnosis
- 0g-Detect for Freefall Protection
- Signal Conditioning with Low Pass Filter
- Robust Design, High Shocks Survivability
- RoHS Compliant
- Environmentally Preferred Product
- Low Cost

Typical Applications

- 3D Gaming: Tilt and Motion Sensing, Event Recorder
- HDD MP3 Player: Freefall Detection
- Laptop PC: Freefall Detection, Anti-Theft
- Cell Phone: Image Stability, Text Scroll, Motion Dialing, E-Compass
- Pedometer: Motion Sensing
- PDA: Text Scroll
- Navigation and Dead Reckoning: E-Compass Tilt Compensation
- Robotics: Motion Sensing

ORDERING INFORMATION

Part Number	Temperature Range	Package Drawing	Package	Shipping
MMA7361LT	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	Tray
MMA7361LR1	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	7" Tape & Reel
MMA7361LR2	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	13" Tape & Reel

MMA7361L

MMA7361L: XYZ AXIS
ACCELEROMETER
 $\pm 1.5g$, $\pm 6g$

Bottom View



14 LEAD
LGA
CASE 1977-01

Top View



Figure 1. Pin Connections

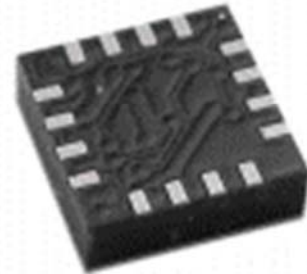
APÉNDICE E: MAGNETÓMETRO HMC5883L

3-Axis Digital Compass IC HMC5883L

Honeywell

Advanced Information

The Honeywell HMC5883L is a surface-mount, multi-chip module designed for low-field magnetic sensing with a digital interface for applications such as low-cost compassing and magnetometry. The HMC5883L includes our state-of-the-art, high-resolution HMC118X series magneto-resistive sensors plus an ASIC containing amplification, automatic degaussing strap drivers, offset cancellation, and a 12-bit ADC that enables 1° to 2° compass heading accuracy. The I²C serial bus allows for easy interface. The HMC5883L is a 3.0x3.0x0.9mm surface mount 16-pin leadless chip carrier (LCC). Applications for the HMC5883L include Mobile Phones, Netbooks, Consumer Electronics, Auto Navigation Systems, and Personal Navigation Devices.



The HMC5883L utilizes Honeywell's Anisotropic Magnetoresistive (AMR) technology that provides advantages over other magnetic sensor technologies. These anisotropic, directional sensors feature precision in-axis sensitivity and linearity. These sensors' solid-state construction with very low cross-axis sensitivity is designed to measure both the direction and the magnitude of Earth's magnetic fields, from milli-gauss to 8 gauss. Honeywell's Magnetic Sensors are among the most sensitive and reliable low-field sensors in the industry.

FEATURES

BENEFITS

- | | |
|---|---|
| ▶ 3-Axis Magnetoresistive Sensors and ASIC in a 3.0x3.0x0.9mm LCC Surface Mount Package | ▶ Small Size for Highly Integrated Products. Just Add a Micro-Controller Interface, Plus Two External SMT Capacitors Designed for High Volume, Cost Sensitive OEM Designs. Easy to Assemble & Compatible with High Speed SMT Assembly |
| ▶ 12-Bit ADC Coupled with Low Noise AMR Sensors Achieves 2 milli-gauss Field Resolution in ± 8 Gauss Fields | ▶ Enables 1° to 2° Degree Compass Heading Accuracy |
| ▶ Built-In Self Test | ▶ Enables Low-Cost Functionality Test after Assembly in Production |
| ▶ Low Voltage Operations (2.16 to 3.6V) and Low Power Consumption (100 μ A) | ▶ Compatible for Battery Powered Applications |
| ▶ Built-In Strap Drive Circuits | ▶ Set/Reset and Offset Strap Drivers for Degaussing, Self Test, and Offset Compensation |
| ▶ I ² C Digital Interface | ▶ Popular Two-Wire Serial Data Interface for Consumer Electronics |
| ▶ Lead Free Package Construction | ▶ RoHS Compliance |
| ▶ Wide Magnetic Field Range (± 8 Oe) | ▶ Sensors Can Be Used in Strong Magnetic Field Environments with a 1° to 2° Degree Compass Heading Accuracy |
| ▶ Software and Algorithm Support Available | ▶ Compassing Heading, Hard Iron, Soft Iron, and Auto Calibration Libraries Available |
| ▶ Fast 160 Hz Maximum Output Rate | ▶ Enables Pedestrian Navigation and LBS Applications |

APÉNDICE F: SKETCH DEL SASS PARA ARDUINO

```
//Librerias
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_HMC5883_U.h>
#include <TinyGPS.h>
#include <math.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

//Pins
int sdCS = 53; // MISO=50 MOSI=51 SCK=52
int x = A0;
int y = A1;
int z = A2;
int pinVol0 = A5;
int pinAmp0 = A4;
int pinVol1 = A7;
int pinAmp1 = A6;

int CW0 = 4;
int CCW0 = 5;
int CW1 = 2;
int CCW1 = 3;

//Objetos
Adafruit_HMC5883_Unified mag = Adafruit_HMC5883_Unified(12345);
#define RTC 0x68
TinyGPS gps;
LiquidCrystal lcd(6,7,11, 10,9,8);

//Variables
byte segundo, minuto, hora,diaSem,diaMes, mes, anio;
int dias;
float flat, flon;
int sat = 0;

float valx, valy, valz ;
float valxx, valyy, valzz;
float exx, eyy, ezz ;
float vmax = 501.0; //1g
float vmin = 174.0; //174 para 0.85V(-1g) (337 para 0g)

double LSTM,B,EoT,TC,LT,LST,HRA,declin;
double elevacion,azimuth,elevgrad,azimgrad;
double GMT = -6.0;
double latrad, lonrad;

double m = 0.2; //Masa del robot
```

```

double g = 9.81;    //Constante de gravedad
double l = 0.5;     //Centro de masas
double compGrav = 0;

float R10 = 115000.0;
float R20 = 9800.0;
float R11 = 115000.0;
float R21 = 9800.0;

int aValVol0 = 0;
int aValAmp0 = 0;
int aValVol1 = 0;
int aValAmp1 = 0;

double volt0 = 0.0;
double amps0 = 0.0;
double watt0 = 0.0;
double volt1 = 0.0;
double amps1 = 0.0;
double watt1 = 0.0;

//Factores de conversion
double d2r = 0.0174; //Grados a radianes
double r2d = 57.2957; //Radianes a grados

//Variables de control
double kp0_be=2.0;
double kp0_ne=2.5;
double kp0_se=4.0;
double kp1_be=1.8;
double kp1_ne=2.3;
double kp1_se=4.1;

double error0 = 0.0;
double error1 = 0.0;
double desAz = 0.0;
double desEl = 0.0;
double adqAz = 0.0;
double adqEl = 0.0;
double PMin0, PMax0; // Limitar salidas a 0 y 255
double PMin1, PMax1; // Limitar salidas a 0 y 255
double P0=0.0;      // Salida a pin PWM
double P1=0.0;      // Salida a pin PWM

void setup()
{ //Define el comportamiento de los pins IO
  pinMode(sdCS, OUTPUT);
  digitalWrite(sdCS,HIGH);
  pinMode(x,INPUT);
  pinMode(y,INPUT);
  pinMode(z,INPUT);

```

```

pinMode(pinVol0, INPUT);
pinMode(pinAmp0, INPUT);
pinMode(pinVol1, INPUT);
pinMode(pinAmp1, INPUT);
pinMode(CW0,OUTPUT);
pinMode(CCW0,OUTPUT);
pinMode(CW1,OUTPUT);
pinMode(CCW1,OUTPUT);

//Inicializa los protocolos de comunicación
Wire.begin();
Serial.begin(9600);
Serial1.begin(9600);
lcd.begin(16, 2);
lcd.print("Solar Tracking");

calibra(); //Calibra el acelerometro

if (!SD.begin(sdCS))
{ //Serial.println("Error en SD");
  return;
}
Serial.println("SD lista!");

if(!mag.begin())
{ //Serial.println("No HMC5883 detectado...Verifica conexion!");
  while(1);
}

//setRTC();// Se comenta cuando no haya que hacer cambios en el RTC
}

void loop()
{ readRTC();
  globalpos();

  if (sat >= 4)
  { diaanio();
    ecuaciones();
    amananoch();
    angulos();
    obtenAz();
    obtenEl();
    controlAz();
    controlEl();
    calVolt0();
    calAmps0();
    calWatt0();
    calVolt1();
    calAmps1();
  }
}

```

```

    calWatt1();
    sd();
    Serial.println("*****");
}
else
{ lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("NOT ENOUGH SATS");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("SATS: ");
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print(sat);
  Serial.print("SATS: ");Serial.println(sat);
  Serial.println("No hay suficientes satelites");
  return;
}
}

//Ecuaciones
void diaanio()
{ int mesant = mes-1;
  dias = ((mesant)*30)+(diaMes);
  if(mesant==1)
  { dias=dias+1;
  }
  if (mesant==2)
  { dias=dias-1;
  }
  else if (mesant==5||mesant==6)
  { dias=dias+1;
  }
  else if (mesant==7)
  { dias=dias+2;
  }
  else if (mesant==8||mesant==9)
  { dias=dias+3;
  }
  else if (mesant==10||mesant==11)
  { dias=dias+4;
  }

  if((anio==16||anio==20||anio==24)&& mesant>=2)
  { dias=dias+1;
  }
}

void ecuaciones()
{ diaanio();
  LSTM = (15 * GMT) * d2r;
  B = (0.9863) * (dias-81) * d2r;
  EoT = (9.87 * sin(2*B)) - (7.53 * cos(B)) - (1.5 * sin(B));
}

```

```

TC    = (4 * (r2d * (lonrad - LSTM))) + EoT;
double fac = minuto/60.0;
LT    = hora + fac;
LST   = LT + (TC/60.0);
HRA   = (15 *(LST-12)) * d2r;
declin = asin(sin(0.4092) * sin(d2r*(0.9863)*(dias-81)));
double declingrad = declin * r2d;
double HRAgrad    = HRA * r2d;
Serial.print("EoT    : ");
Serial.println(EoT);
Serial.print("TC      : ");
Serial.println(TC);
Serial.print("LT      : ");
Serial.println(LT);
Serial.print("LST     : ");
Serial.println(LST);
Serial.print("Declin   : ");
Serial.println(declingrad);
Serial.print("HRA      : ");
Serial.println(HRAgrad);
}

double redondeo(double x)
{ double result;
  int entero = x * 1.0;
  double residuo = x - entero;
  if (residuo >= 0.00 && residuo < 0.15)
  { result = entero + 0.00;
  }
  else if (residuo >= 0.15 && residuo < 0.35)
  { result = entero + 0.25;
  }
  else if (residuo >= 0.35 && residuo < 0.65)
  { result = entero + 0.5;
  }
  else if (residuo >= 0.65 && residuo < 0.85)
  { result = entero + 0.75;
  }
  else if (residuo >= 0.85)
  { result = entero + 1.0;
  }
  else
  { result = x;
  }
  return result;
}

void angulos()
{ elevacion = asin(sin(declin)*sin(latrad) + cos(declin)*cos(latrad)*cos(HRA));
  azimuth   = acos((sin(declin)*cos(latrad) - (cos(HRA)*cos(declin)*sin(latrad)))/ cos
(elevacion));

```

```

    elevgrad = elevacion * r2d;
    azimgrad = azimuth * r2d;
    if (LST <= 12)
    { azimgrad = azimgrad;
    }
    else
    { azimgrad = 360 - azimgrad;
    }
    desEl = redondeo(elevgrad);
    desAz = redondeo(azimgrad);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Elev:");
    lcd.setCursor(6,0);
    lcd.print(desEl);
    Serial.print("Elevac : ");
    Serial.println(desEl);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Azim:");
    lcd.setCursor(6,1);
    lcd.print(desAz);
    Serial.print("Azimuth : ");
    Serial.println(desAz);
}

void amananoch()
{ double s0 = (-tan(latrad)*tan(declin));
  double s1 = (0.0666 * acos(s0)) * r2d;
  double s2 = s1-(TC/60);
  double amanecer = 12 - s2;
  double anochece = 12 + s2;
  Serial.print("Amanecer : ");
  Serial.println(amanecer);
  Serial.print("Anochece : ");
  Serial.println(anochece);
}

//Funciones complementarias
byte bcdToDec(byte value)
{ return ((value / 16) * 10 + value % 16);
}

void setRTC()
{ Wire.beginTransaction(RTC);
  Wire.write(0x00); //Primer registro
  Wire.write(0x00); //Segundos
  Wire.write(0x05); //Minutos
  Wire.write(0x14); //Hora
  Wire.write(0x04); //DiaSem
  Wire.write(0x18); //DiasMes
}

```

```

Wire.write(0x05);//Mes
Wire.write(0x16);//Año
Wire.endTransmission();
}

void readRTC()
{ Wire.beginTransmission(RTC);
  Wire.write(0x00);
  Wire.endTransmission();
  Wire.requestFrom(RTC, 7);
  segundo = bcdToDec(Wire.read());
  minuto = bcdToDec(Wire.read());
  hora = bcdToDec(Wire.read());
  diaSem = bcdToDec(Wire.read());
  diaMes = bcdToDec(Wire.read());
  mes = bcdToDec(Wire.read());
  anio = bcdToDec(Wire.read());
}

void sd()
{ String dataStr = String(azimgrad) + "," + String(elevgrad) + "," + String(flat) + "," +
String(flon) + "," + String(diaMes) + "," + String(mes) + "," + String(anio) + "," +
String(hora) + "," + String(minuto) + "," + String(watt0) + "," + String(watt1) + "," +
String(volt0) + "," + String(amps0) + "," + String(volt1) + "," + String(amps1);
  File dataFile = SD.open("sts.csv",FILE_WRITE);
  if(dataFile)
  { dataFile.println(dataStr);
    dataFile.close();
    Serial.println(dataStr);
  }
  else
  { Serial.println("No se encontró el archivo");
  }
}

//Función para obtener el Angulo de Azimuth medido en el concentrador
void obtenAz()
{ sensors_event_t event;
  mag.getEvent(&event);
  float heading = atan2(event.magnetic.y, event.magnetic.x);
  float declinationAngle = 1.357;
  heading += declinationAngle;

  if(heading < 0)
    heading += 2*PI;

  if(heading > 2*PI)
    heading -= 2*PI;

  adqAz = heading * 180/M_PI;
  adqAz = redondeo(adqAz);
}

```

```

    Serial.print("Magneto : ");
    Serial.println(adqAz);
}

//Función para obtener el Angulo de Elevación medido en el concentrador
void obtenEI()
{ valx = analogRead(x);
  valy = analogRead(y);
  valz = analogRead(z);
  valx = valx + exx;
  valy = valy + eyy;
  valz = valz + ezz;
  double valxg = map(valx,vmin,vmax,-180,180);
  double valyg = map(valy,vmin,vmax,-180,180);
  double valzg = map(valz,vmin,vmax,-180,180);
  adqEI = RAD_TO_DEG * (atan2(-valyg, -valzg));
  if (adqEI < 0) adqEI = 360 + adqEI;
  adqEI -= 90;
  adqEI = redondeo(adqEI);
  // if (angyz<0)angyz = 0 ;
  Serial.print("Acelero: ");
  Serial.println(adqEI);
  Serial.println("+++++++");
}

//Obtener posición del GPS
void globalpos()
{ bool newData = false;
  for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 500;)
  { while (Serial1.available())
    { char c = Serial1.read();
      if (gps.encode(c))
        newData = true;
    }
  }

  if (newData)
  { gps.f_get_position(&flat, &flon);
    sat = gps.satellites() == TinyGPS::GPS_INVALID_SATELLITES ? 0 : gps.satellites();
  }
  latrad=flat*d2r;
  lonrad=flon*d2r;
}

void imprimeRTC()
{ Serial.print(diaMes, DEC);
  Serial.print("/");
  Serial.print(mes,DEC);
  Serial.print("/20");
  Serial.print(anio, DEC);
}

```

```

Serial.print(" - ");
Serial.print(hora, DEC);
Serial.print(":");
if (minuto < 10)
{ Serial.print("0");
}
Serial.print(minuto, DEC);
Serial.print(":");
if (segundo < 10)
{ Serial.print("0");
}
Serial.println(segundo, DEC);
Serial.print("Latitud : ");
Serial.println(flat);
Serial.print("Longitud : ");
Serial.println(flon);
Serial.print("Dia anio : ");
Serial.println(dias);
}

void compensacion()
{ compGrav = m * g * l * sin(adqEl*DEG_TO_RAD);
}

void calibra()
{ valx = analogRead(x);
  valy = analogRead(y);
  valz = analogRead(z);
  valxx = valx * 5.0/1023.0;
  valyy = valy * 5.0/1023.0;
  valzz = valz * 5.0/1023.0;
  float ex = 1.65-valxx;
  float ey = 1.65-valyy;
  float ez = 2.45-valzz;
  exx = ex * 1023.0/5.0;
  eyy = ey * 1023.0/5.0;
  ezz = ez * 1023.0/5.0;
}

void controlAz()
{ double error0 = desAz - adqAz;
  P0 = kp0*error0;
  if (error0 <= 0)
  { double Pc0 = abs(P0);
    if (Pc0 >= 255) Pc0 = 255;
    analogWrite(CW0,Pc0);
  }
  else
  { if (P0 >= 255) P0 = 255;
    analogWrite(CCW0,P0);
  }
}

```

```

}
void controlEI()
{ double error1 = desEI - adqEI;
  P1 = kp1*error1 + compGrav;
  if (error1 <= 0)
  { double Pc1 = abs(P1);
    if (Pc1 >= 255) Pc1 = 255;
    analogWrite(CW1,Pc1);
  }
  else
  { if (P1 >= 255) P1 = 255;
    analogWrite(CCW1,P1); }
}

void calAmps0()
{ aValAmp0 = analogRead(pinAmp0);
  double ADCAmp0 = (aValAmp0/1024.0)*5000.0;
  amps0 = (ADCAmp0 - 2485.0)/ 100.0;
  if(amps0 < 0)
  {amps0 = 0;}
  Serial.print("Amps : ");
  Serial.print(amps0);
  Serial.println("A");}

void calVolt0()
{ aValVol0 = analogRead(pinVol0);
  double ADCVol0 = (aValVol0 * 5.0) / 1024.0;
  volt0 = (ADCVol0 / (R20/(R10+R20)));
  if (volt0 < 0.09)
  { volt0 = 0.0;}
  Serial.print("Volts : ");
  Serial.print(volt0);
  Serial.println("V");}

void calWatt0()
{ watt0 = amps0 * volt0;
  Serial.print("Watts : ");
  Serial.print(watt0);
  Serial.println("W");}

void calAmps1()
{ aValAmp1 = analogRead(pinAmp1);
  double ADCAmp1 = (aValAmp1/1024.0)*5000.0;
  amps1 = (ADCAmp1 - 2485.0)/ 100.0;
  if(amps1 < 0)
  { amps1 = 0;}
  Serial.print("Amps : ");
  Serial.print(amps1);
  Serial.println("A");}

```

```

void calVolt1()
{ aValVol1 = analogRead(pinVol1);
  double ADCVol1 = (aValVol1 * 5.0) / 1024.0;
  volt1 = (ADCVol1 / (R21/(R11+R21)));
  volt1 = volt1-14.5;
  if (volt1<0.09)
  { volt1=0.0;}
  Serial.print("Volts : ");
  Serial.print(volt1);
  Serial.println("V");}

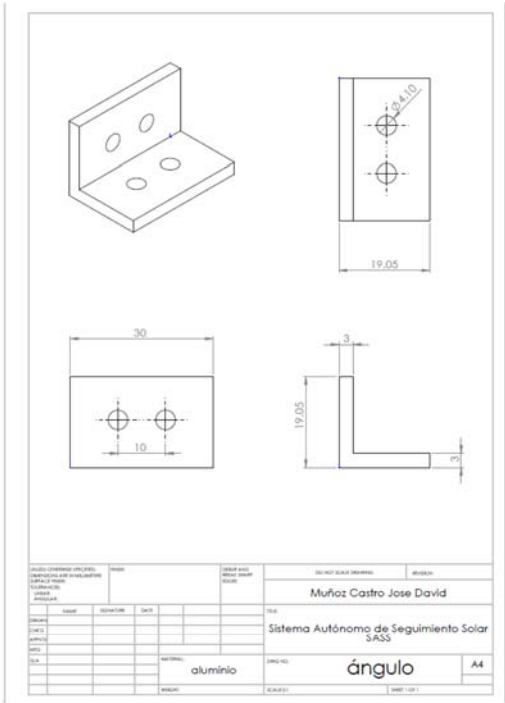
```

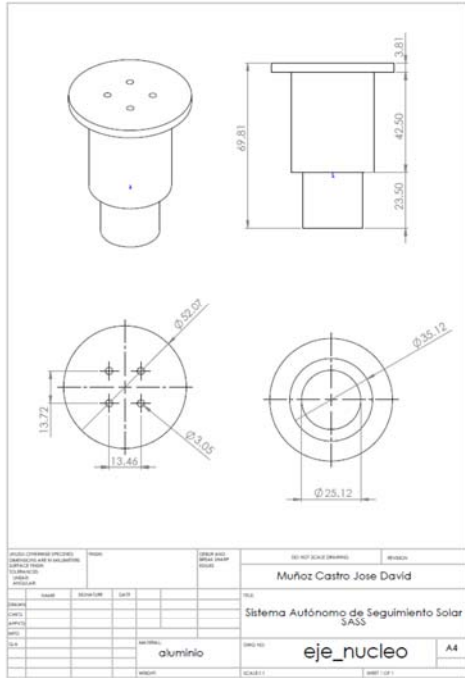
```

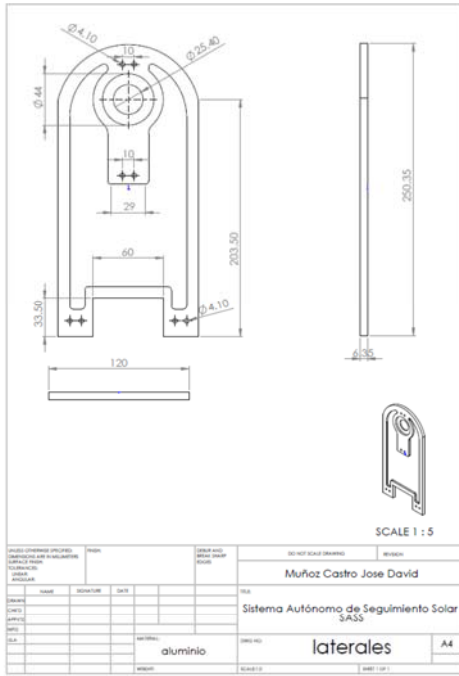
void calWatt1()
{ watt1 = amps1 * volt1;
  Serial.print("Watts : ");
  Serial.print(watt1);
  Serial.println("W");}

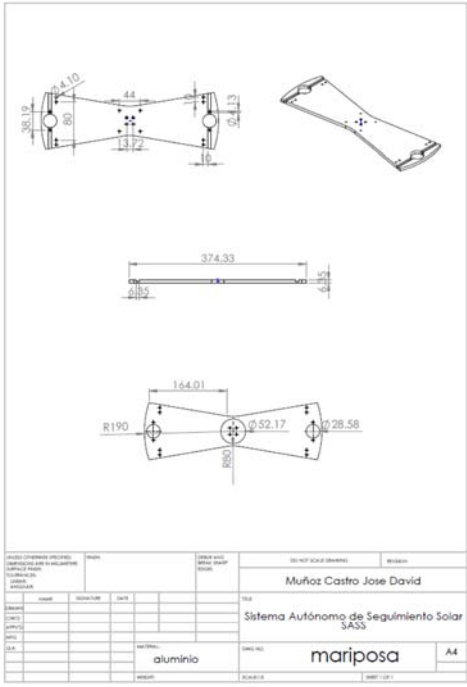
```

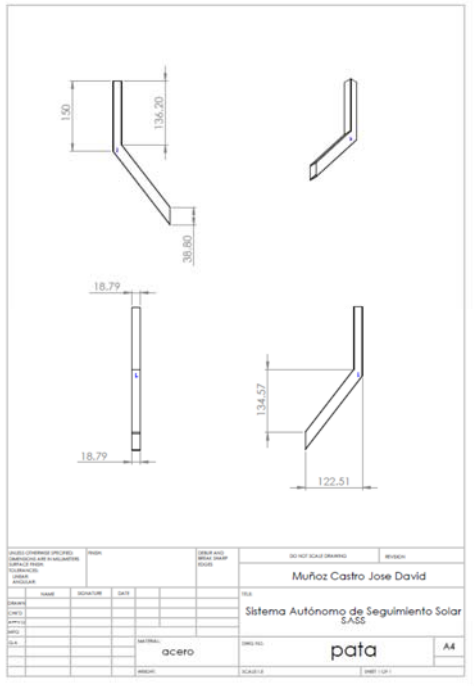
APÉNDICE G: DIBUJOS TÉCNICOS DEL LABORATORIO SOLAR



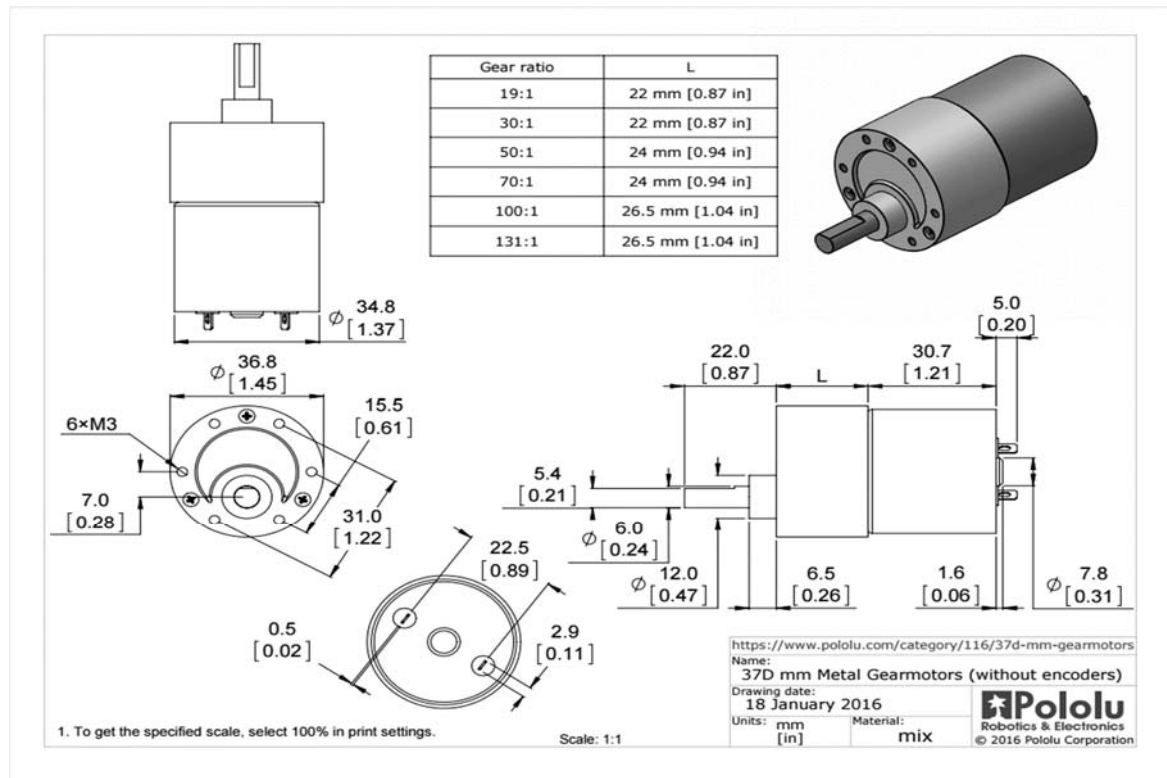








APÉNDICE H: MOTOR DC POLOLU 131:1



Dimensiones

Tamaño: 37Dx57L mm
 Peso: 205g
 Dimensión de la flecha: 6 mm

Especificaciones generales

Relación de engranaje: 131:1
 Velocidad sin carga @6V: 40 rpm
 Corriente sin carga @6V: 250 mA
 Corriente de detención @6V: 2500 mA
 Torque de detención @6V: 125 oz-in
 Velocidad sin carga @12V: 80 rpm
 Corriente sin carga @12V: 300 mA
 Corriente de detención @12V: 5000 mA
 Torque de detención @12V: 250 oz-in

APÉNDICE I: CÓDIGO ECUACIONES MATLAB

```
clear all
clc

%Factores de conversion
d2r = 0.0174;
r2d = 57.2957;

%Datos
lat= 'Cuál es la latitud?';
latitud = input(lat);

lon = 'Cuál es la longitud?';
longitud = input(lon);

hor= 'Cuál es la hora(formato 24hrs)?';
hora = input(hor);

min= 'Cuáles son los minutos?';
minuto = input(min);

dia= 'Qué día del mes es hoy ?';
diames = input(dia);

mes= 'Qué mes es este (en número)?';
mesyear = input(mes);

GMT='Cuál es tu zona horaria?';
gmttoff=input(GMT);

%Primera conversión
latrad=latitud*d2r;
lonrad=longitud*d2r;

%Ecuaciones
diayear = ((mesyear-1)* 30) + diames;
LSTM = (15*gmttoff)*d2r;
B = (360/365)*(diayear - 81) * d2r;
EoT = (9.87 * sin(2*B)) - (7.53 * cos(B)) - (1.5 * sin(B));
TC = (4 * (r2d)*(lonrad - LSTM)) + EoT;
fac = minuto/60;
LT = hora + fac;
LST = LT + (TC/60);
HRA=(15*(LST-12))* d2r;
declinacion = asin(sin(23.45*d2r)*sin(d2r*(0.9863)*(diayear - 81)));
decligrad=declinacion*r2d;

%Angulos de control
elevacion = asin(sin(declinacion)*sin(latrad) + cos(declinacion)*cos(latrad)*cos(HRA));
```

```

azimuth = acos(((sin(declinacion)*cos(latrad)) -
(cos(HRA)*cos(declinacion)*sin(latrad)))/ cos (elevacion));

%Angulos en grados
elevaciongrad = elevacion*r2d;
azimuthgrad = azimuth*r2d;
azimuthgrad = 360-azimuthgrad;
%Amanecer
S=12-(r2d*(1/15*(acos(-tan(latrad)*tan(declinacion)))-TC/60);
%Anochecer
SS=12+(r2d*(1/15*(acos(-tan(latrad)*tan(declinacion)))-TC/60);

HRA=HRA*r2d;

diayear
EoT
TC
decligrad
HRA
elevaciongrad
azimuthgrad
S
SS

```

APÉNDICE J: CÓDIGO ECUACIONES ARDUINO

```
//Factores de conversion
double d2r = 0.0174;
double r2d = 57.2957;

//Datos
double latitud = 19.0;
double longitud = -98.0;
double hora = 16.0;
double minuto = 10.0;
double diames = 27.0;
double mes = 5.0;
double GMT = -6.0;

void setup()
{Serial.begin(9600);
//Primera conversión
double latrad = latitud * d2r;
double lonrad = longitud * d2r;

//Ecuaciones
double diayear = ((mes-1)* 30) + diames;
double LSTM = (15*GMT)*d2r;
double B = (0.9863)*(diayear - 81) * d2r;
double EoT = (9.87 * sin(2*B)) - (7.53 * cos(B)) - (1.5 * sin(B));
double TC = (4 * (r2d * (lonrad - LSTM))) + EoT;
double LT = hora + (minuto/60);
double LST = LT + (TC/60);
double HRA = (15 * (LST-12))* d2r;
double declinacion = asin(sin(0.4092)*sin(d2r*(0.9863)*(diayear - 81)));

//Angulos de control
double elevacion = asin(sin(declinacion)*sin(latrad) +
cos(declinacion)*cos(latrad)*cos(HRA));
double azimuth = acos((sin(declinacion)*cos(latrad) -
(cos(HRA)*cos(declinacion)*sin(latrad)))/ cos (elevacion));

//Angulos en grados (Perez, 2010)
double elevaciongrad = elevacion*r2d;
double azimuthgrad = azimuth*r2d;

if (hora <=12)
{ azimuthgrad = azimuthgrad;
}
else
{ azimuthgrad = 360 - azimuthgrad;
}

//Calculo de la duración del día
double s0 = (-tan(latrad)*tan(declinacion));
```

```

double s1 = (0.0666 * acos(s0)) * r2d;
double s2 = s1-(TC/60);

//Amanecer
double amanecer = 12 - s2;

//Anocheecer
double anocheecer = 12 + s2;

delay(1000);
Serial.print("Diayear: ");Serial.println(diayear);
Serial.print("EoT: ");Serial.println(EoT);
Serial.print("TC: ");Serial.println(TC);
Serial.print("Declin: ");Serial.println(declinacion*r2d);
Serial.print("HRA: ");Serial.println(HRA*r2d);
Serial.print("Elevacion: ");Serial.println(elevaciongrad);
Serial.print("Azimut: ");Serial.println(azimuthgrad);
Serial.print("Amanecer: ");Serial.println(amanecer);
Serial.print("Anochece: ");Serial.println(anocheecer);
}

void loop()
{
}

```