

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MOVIMIENTO PARA
UNA UNIDAD EXPERIMENTAL DE SEGUIMIENTO SOLAR CON DOS GRADOS
DE LIBERTAD APLICADO A GENERACIÓN FOTOVOLTAICA**

**JOTA MARIO MIRANDA GUERRA
JHON JAIME TAMAYO ARGÜELLO
JORGE MANUEL BARRIOS SÁNCHEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MOVIMIENTO PARA
UNA UNIDAD EXPERIMENTAL DE SEGUIMIENTO SOLAR CON DOS GRADOS
DE LIBERTAD APLICADO A GENERACIÓN FOTOVOLTAICA**

**JOTA MARIO MIRANDA GUERRA
JHON JAIME TAMAYO ARGÜELLO
JORGE MANUEL BARRIOS SÁNCHEZ**

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

**GERMAN ALFONSO OSMA PINTO
Ph.D. Ingeniería - Área Ingeniería Eléctrica**

Co-director

**RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA
Ph.D. Tecnologías de la información**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A Dios por las bendiciones que otorgo a mis padres, mis compañeros y a mi persona durante este tiempo y me brindó la salud suficiente para poder estar hoy en el punto en que me encuentro, a él, infinitas gracias.

A mi amada madre Marlene Argüello Martínez y mi querido padre Jaime Alberto Tamayo Medina quienes estuvieron en todos y cada uno de los momentos difíciles por los que pase, su incondicional apoyo y sus oraciones, me permiten decirles hoy en día que sus esfuerzos se ven reflejados en la gran persona y excelente profesional en que me he convertido.

A todos quienes me tendieron su mano siendo un foráneo y me hicieron sentir como uno de los suyos brindándome su amistad, apoyo y cariño.

A todos mil y mil gracias, Que Dios los llene de bendiciones.

Jhon J. Tamayo Argüello.

DEDICATORIA

A nuestro benevolente Dios por la vida y la sabiduría prestadas para hacer este sueño realidad, sin su gracia, bendiciones e infinito amor esto sería sencillamente una utopía.

A mis padres Mario Miranda Hernández y Nelly Guerra Ricardo por su gran amor, apoyo incansable y oraciones, ya que ustedes formaron en mí el carácter para convertirme más que en un profesional, en una persona.

A mi amiga y compañera Tatiana Bohórquez por animarme e impulsarme a pedalear hasta la meta y por regalarme una hija, la cual se convirtió en la chispa que le faltaba a mi vida.

A la Familia Bohórquez por su apoyo, generosidad, y compañía en momentos que normalmente eran de soledad.

A todos, gracias.

Jota Mario.

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por regalarme cada día, la vida, la salud, la inteligencia, la prudencia y la fuerza para concretar mis más ansiados sueños y a ese nuestro ángel que está en alguna parte del firmamento, que me llenó de ilusiones haciéndome sentir que cada amanecer es un milagro.

A mis padres Jorge e Irene, mis abuelos Salvador y Maritza, mis hermanos Jhosep Mateo, Jota Mario y John Marlon, a mis tíos Marlon, Manuel y Alan; por su apoyo incondicional, sus consejos, por aquellos momentos de amor, entrega, y comprensión durante todos estos años, por alentarme cada día a seguir luchando por mis ideales, sin importar las circunstancias adversas de la vida.

A mis profesores y amigos que, con sus conocimientos, sus consejos y compañía hicieron llevaderos todos estos años, inculcando en mí el conocimiento que hoy en día me permiten ser y hacer lo que siempre anhele.

Eternamente, gracias.

Jorge Barrios Sánchez.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su gracia y bendiciones.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS) y en especial a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, por brindarnos la formación necesaria para convertirnos en profesionales íntegros.

Al PhD. German Osma y al PhD. Rodolfo Villamizar por su dirección, orientación, dedicación, apoyo y valiosos aportes para la consecución de este proyecto de grado.

A cada uno de los docentes, compañeros y amigos con quienes compartimos experiencias enriquecedoras tanto a nivel académico como personal.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN | 18 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 22 |
| 1.1. ENERGÍA SOLAR Y PANELES FOTOVOLTAICOS | 22 |
| 1.2. MOVIMIENTOS TERRESTRES RESPECTO AL SOL | 23 |
| 1.2.1. TRASLACIÓN..... | 23 |
| 1.2.2. ROTACIÓN..... | 24 |
| 1.2.3. PRECESIÓN..... | 24 |
| 1.2.4 NUTACIÓN..... | 24 |
| 1.3. CÁLCULO DE LA POSICIÓN SOLAR | 24 |
| 1.4. ESTRUCTURAS DE SEGUIMIENTO SOLAR | 27 |
| 1.4.1 ESTRUCTURAS FIJAS Y ESTÁTICAS | 27 |
| 1.4.2 SEGUIDORES DE UN EJE..... | 28 |
| 1.4.3 SEGUIDORES DE DOS EJES..... | 28 |
| 1.4.4 SEGUIDORES PASIVOS..... | 29 |
| 1.4.5 SEGUIDORES ACTIVOS..... | 30 |
| 1.5. TÉCNICAS DE CONTROL EN SEGUIDORES SOLARES..... | 31 |
| 2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SISTEMA ELECTROMECHANICO..... | 32 |
| 2.1 REQUERIMIENTOS Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO | 32 |
| 2.1.1 PANEL FOTOVOLTAICO..... | 32 |
| 2.1.2 VELOCIDAD MÍNIMA DE MOVIMIENTO | 33 |
| 2.1.3 POTENCIA MÁXIMA CONSUMIDA..... | 33 |
| 2.1.4 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LUGAR DE INSTALACIÓN..... | 33 |
| 2.2 PRESELECCIÓN DE DISEÑOS EXISTENTES..... | 35 |
| 2.2.1 ALTERNATIVA DE DISEÑO 1..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2 ALTERNATIVA 2. | 39 |
| 2.3 SELECCIÓN DEL DISEÑO..... | 42 |
| 2.4 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO | 42 |
| 2.4.1 SOPORTE DEL PANEL..... | 42 |
| 2.4.2 MÓDULO BASE Y PROTECCIÓN. | 43 |
| 2.4.3 ACTUADORES..... | 43 |
| 2.4.5 JUSTIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA. | 46 |
| 2.4.4 UNIDADES DE GIRO. | 47 |
| 2.4.5 TRANSMISIÓN AL EJE BASE DE SOPORTE DEL PANEL FV..... | 50 |
| 2.5 CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD..... | 52 |
| | |
| 3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL | 54 |
| 3.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL..... | 54 |
| 3.1.1 SELECCIÓN DEL HARDWARE DE PROCESAMIENTO. | 54 |
| 3.1.2 ELEMENTOS DE SENSADO | 59 |
| 3.1.3 PROCESAMIENTO DE SEÑALES ANALÓGICAS..... | 60 |
| 3.2 SISTEMA DE CONTROL..... | 60 |
| 3.3 DISEÑO DEL MÓDULO DE POTENCIA | 62 |
| 3.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIRCUITO IMPRESO..... | 63 |
| 3.5 CARACTERIZACIÓN DE MOVIMIENTOS | 64 |
| 3.5.1 ALTURA SOLAR (INCLINACIÓN). | 64 |
| 3.5.2 ACIMUT (ORIENTACIÓN)..... | 65 |
| 3.6 SOFTWARE DE PROCESAMIENTO | 67 |
| | |
| 4. PUESTA EN MARCHA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS | 69 |
| 4.1 ESPECIFICACIONES DE LAS PRUEBAS | 69 |
| 4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO | 70 |
| 4.2.1 PRUEBA DE SEGUIMIENTO DEL SOL. | 70 |
| 4.2.2 PRUEBA DE POSICIONAMIENTO A PETICIÓN DEL USUARIO. | 72 |

| | |
|--|----|
| 4.2.3 PRUEBAS DE CONSUMO DE POTENCIA..... | 73 |
| 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... | 77 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 77 |
| 5.2 OBSERVACIONES..... | 78 |
| 5.3 TRABAJOS FUTUROS..... | 80 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 81 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 85 |
| ANEXOS..... | 91 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Posición solar respecto a un observador en tierra..... | 27 |
| Figura 2. Movimiento de un seguidor solar de dos ejes..... | 28 |
| Figura 3. Eficiencias de seguidores solares (simulaciones e implementaciones) alrededor del mundo..... | 29 |
| Figura 4. Panel fotovoltaico Upsolar UP-250M..... | 32 |
| Figura 5. Media de precipitaciones por meses..... | 34 |
| Figura 6. Rosa de vientos Bucaramanga..... | 34 |
| Figura 7. Lugar de instalación..... | 35 |
| Figura 8. Distribución espacial del lugar de instalación..... | 35 |
| Figura 9. Unidad de giro y motorreductores cotizados..... | 37 |
| Figura 10. Estrategia de movimiento alternativa 1..... | 38 |
| Figura 11. Actuador lineal HFM-LAD12..... | 39 |
| Figura 12. Unidad de giro SE3C..... | 40 |
| Figura 13. Estrategia de movimiento alternativa 2..... | 41 |
| Figura 14. Soporte de la carga (Esquema realizado en SolidWorks)..... | 43 |
| Figura 15. Soporte de la carga (Esquema realizado en SolidWorks)..... | 43 |
| Figura 16. Motorreductor de los fabricantes Parvalux..... | 44 |
| Figura 17. Motorreductor modelo (DFS10G-05) fabricado en Japón..... | 45 |
| Figura 18. Motorreductores seleccionados según movimiento..... | 47 |
| Figura 19. Mecánica de reductores tipo sinfín corona..... | 48 |
| Figura 20. Reductor de velocidad 16:1..... | 49 |
| Figura 21. Reductor de velocidad 30:1..... | 49 |
| Figura 22. Reductor de velocidad reemplazo..... | 50 |
| Figura 23. Transmisión de movimiento al soporte..... | 51 |
| Figura 24. Seguidor solar ubicado al norte (Esquema realizado en SolidWorks)..... | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 25. Seguidor solar ensamblado. | 53 |
| Figura 26. PLC Siemens Simatic S7–1200. | 55 |
| Figura 27. Tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 Modelo B. | 56 |
| Figura 28. Tarjeta de desarrollo Intel Edison + Board Arduino. | 57 |
| Figura 29. Potenciómetro lineal BOURNS 3852. | 59 |
| Figura 30. Potenciómetro lineal de BOURNS 3540. | 59 |
| Figura 31. Circuito de recolección de datos. | 60 |
| Figura 32. Sistema de control de seguidor solar en lazo abierto. | 61 |
| Figura 33. Principio operacional de seguidor solar en lazo abierto. | 62 |
| Figura 34. Diagrama del módulo de potencia. | 63 |
| Figura 35. Resultado diseño circuito impreso | 63 |
| Figura 36. Linealización de los resultados del potenciómetro lineal de altura solar. | 65 |
| Figura 37. Linealización de los resultados del potenciómetro lineal de acimut solar. | 66 |
| Figura 38. Seguidor solar dispuesto para pruebas de campo. | 69 |
| Figura 39. Pruebas en lugar de instalación. | 76 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Especificaciones a considerar del módulo Upsolar UP-M250..... | 33 |
| Tabla 2. Características nominales de unidad de giro (SDE3) y motorreductor (engranaje planetario)..... | 36 |
| Tabla 3. Cotización unidad de giro SDE3 y motorreductor de engranaje planetario. | 37 |
| Tabla 4. Características nominales del actuador lineal HFM-LAD12..... | 39 |
| Tabla 5. Cotización alternativa 2..... | 40 |
| Tabla 6. Características del motorreductor Parvalux (PM50GWS)..... | 44 |
| Tabla 7. Características del servo-motorreductor DFS10G-05. | 45 |
| Tabla 8. Cuadro comparativo actuadores. | 46 |
| Tabla 9. Datos técnicos del PLC Simatic S7–1200 CPU 1214C..... | 55 |
| Tabla 10. Datos técnicos de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3..... | 56 |
| Tabla 11. Datos técnicos de la tarjeta de desarrollo Intel Edison..... | 58 |
| Tabla 12. Caracterización del potenciómetro lineal altura solar..... | 64 |
| Tabla 13. Caracterización del potenciómetro lineal acimut solar. | 66 |
| Tabla 14. Resultados en grados acimut y altura solar horas de la mañana..... | 70 |
| Tabla 15. Resultados en grados acimut y altura solar horas de la tarde. | 71 |
| Tabla 16. Pruebas de funcionamiento del posicionamiento del panel FV a petición del usuario en grados acimut y altura solar respectivamente. | 72 |
| Tabla 17. Consumo de potencia eléctrica instantánea de la tarjeta de desarrollo. | 74 |
| Tabla 18. Consumo de potencia eléctrica instantánea de los potenciómetros. | 74 |
| Tabla 19. Tiempo de operación por movimiento. | 74 |
| Tabla 20. Consumo de potencia eléctrica instantánea por movimiento. | 75 |
| Tabla 21. Consumo de potencia eléctrica durante un día de operación. | 75 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| ANEXO A. DATASHEET PANEL UP SOLAR 250..... | 91 |
| ANEXO B. DIMENSIONES GENERALES DE LA ESTRUCTURA | 93 |
| ANEXO C. DATASHEET L298N..... | 94 |
| ANEXO D. DATASHEET TLC2543..... | 97 |
| ANEXO E. CONEXIÓN Y DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO | 100 |
| ANEXO F. ADECUACIÓN DE ECUACIONES INTERFAZ DE PYTHON | 102 |
| ANEXO G. ESQUEMA DE CONEXIÓN PARTE ELECTRÓNICA | 109 |
| ANEXO H. DIAGRAMA Y CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN..... | 110 |
| ANEXO I MANUAL DE USUARIO | 140 |

RESUMEN

TÍTULO: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MOVIMIENTO PARA UNA UNIDAD EXPERIMENTAL DE SEGUIMIENTO SOLAR CON DOS GRADOS DE LIBERTAD APLICADO A GENERACIÓN FOTOVOLTAICA”.

AUTORES: JOTA MARIO MIRANDA GUERRA, JHON JAIME TAMAYO ARGUELLO, JORGE MANUEL BARRIOS SÁNCHEZ**.

PALABRAS CLAVES: Seguimiento solar, radiación, control, posicionamiento, motorreductor.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo describe el diseño e implementación de una unidad de seguimiento solar con dos grados de libertad para un panel fotovoltaico (FV) Upsolar UP-M250P de 250 Wp, ubicada en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. Esta unidad consiste en una estructura electromecánica que posee un sistema de control de posición angular el cual permite por medio de dos motorreductores, modificar la orientación e inclinación del panel FV, con el objetivo de aumentar la captación de radiación solar incidente sobre éste.

Este sistema tiene dos modos de funcionamiento: el primer modo es de seguimiento estático, en el cual un usuario determina la orientación e inclinación del panel FV según su interés de análisis, y el segundo modo es de seguimiento automático, en el cual es necesario establecer parámetros iniciales como: fecha, hora, latitud y longitud del lugar de instalación; a partir de lo cual el movimiento será autónomo estimando la posición aparente del sol (acimut y altura solar) mediante el uso de un algoritmo de posicionamiento solar. Finalizada la jornada de seguimiento, la unidad reubica al panel FV en una posición próxima a la de partida del día siguiente.

El rango angular de excursión y velocidad de cada movimiento es de 0 - 360° y 0,047 rpm para acimut y 40° - 120° y 0,1667 rpm para altura solar, con un consumo de corriente por cada actuador entre 340 mA y 500 mA a 20 V, dependiendo de factores como la posición angular, velocidad y dirección del viento.

Este trabajo es producto del esfuerzo del grupo de investigación GISEL y constituye un punto de partida para investigaciones en condiciones ambientales reales que contribuyan al proceso de formación, incentivando el estudio de la eficiencia en sistemas FV instalados en zonas próximas a la línea ecuatorial mediante una herramienta funcional de objetivo pedagógico.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto, Ph.D. Ingeniería - Área Ingeniería Eléctrica. Co-director: Rodolfo Villamizar Mejía, Ph.D. Tecnologías de la información.

ABSTRACT

TITLE: "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE STRATEGY OF MOVEMENT FOR AN EXPERIMENTAL UNIT WITH TWO DEGREES OF FREEDOM APPLIED TO PHOTOVOLTAIC GENERATION".*

AUTHORS: JOTA MARIO MIRANDA GUERRA, JHON JAIME TAMAYO ARGÜELLO, JORGE MANUEL BARRIOS SÁNCHEZ**

KEYWORDS: Solar tracking, radiation, control, positioning, gear motor.

DESCRIPTION:

This work describes the design and implementation of a unit of solar tracking with two degrees of freedom for a photovoltaic panel (FV) Upsolar UP-M250P 250 Wp, located in the Electrical building. This unit consists of a structure electromechanical that has a control system of angular position, which allows through two gear motors modify the orientation and inclination of the panel with the objective of increasing the uptake of solar radiation incident on it.

This system has two modes of operation: the first mode is of static tracking, at which a user determines the orientation and inclination of the panel in accordance with the interest of analysis, and the second mode is of automatic tracking, in which it is necessary to establish initial parameters such as: date, time, latitude and longitude of the place of installation; from this is defined periodically the tilt and the orientation by estimating the apparent position of the sun (azimuth and solar height) through a solar positioning algorithm. After the day of follow-up, the unit repositions to the panel in a position next to the heading, avoiding make long journeys to the start of the next day.

The angular range of tour and speed of each movement is 0 - 360° and 0.047 rpm (azimuth) and 40° - 120° and 0,1667 rpm (solar height), with a current consumption per each actuator between 340 and 500 mA @ 20 V, depending on factors such as the angular position, wind speed and direction.

This work is the product of the effort of the investigation group GISEL and constitutes a starting point for investigations in real environmental conditions which contribute to the process of training, encouraging the study of efficiency in PV systems installed in areas close to the equatorial line through a functional tool pedagogical objective.

* Bachelor Thesis

** Physico-mechanical Engineering Faculty. School of Electrical and Electronical Engineerings, and of Telecommunications. Director: German Alfonso Osma Pinto, Ph.D. Engineering - Electrical Engineering Area. Co-director: Rodolfo Villamizar Mejía, Ph.D. Information Technology.

INTRODUCCIÓN

El sol es virtualmente una fuente inagotable de energía, por esto la energía solar es considerada renovable; esta energía puede ser transformada a través de procesos fototérmicos, fotoquímicos y fotovoltaicos, siendo este último el proceso de conversión de la radiación solar en corriente eléctrica [1].

En abril de 1954 Bell Telephone Company presentó al mundo la "Batería Solar", este sistema producía 50 Watts pico por metro cuadrado (W_p/m^2) de celdas fotovoltaicas [2], donde W_p es una unidad de potencia utilizada para asociar el valor máximo de potencia que puede generar un panel fotovoltaico expuesto a condiciones específicas. Esta invención constituyó un aporte significativo para el desarrollo de este tipo de energía renovable, así como a la toma conciencia del gran daño ambiental producido por el uso continuo de combustibles para la generación de energía, hasta tal punto que en Colombia se sancionó la ley 1715 del 2014 con el objetivo de impulsar el uso de energías renovables como reemplazo de otras fuentes de energía, contribuyendo con esto a la reducción de agentes contaminantes en el ambiente.

Aumentar la eficiencia de los sistemas FV se ha convertido en un gran reto, por esta razón se construyen sistemas de seguimiento solar (*Sun-Tracking*), los cuales pueden ser estáticos o dinámicos (de un grado y dos grados de libertad), siendo estos últimos según [3] capaces de aumentar la eficiencia anual de un panel fotovoltaico entre 20% y 50%.

Dada la conveniencia de aumentar la eficiencia de los sistemas FV por incremento del aprovechamiento de la radiación solar incidente y teniendo en cuenta que Bucaramanga cuenta con un potencial solar de $4,9 \text{ kWh}/m^2/\text{día}$ [3] en la Escuela

de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander, se considera de interés estudiar la temática del seguimiento solar a través del diseño y construcción de una unidad experimental con dos grados de libertad que opere bajo las condiciones reales, la cual servirá como base para la evaluación de técnicas de seguimiento solar y la monitorización de dispositivos asociados a la generación de energía FV y el almacenamiento de datos, con lo que se podría fortalecer el estudio de estos sistemas de generación a nivel de pregrado.

Esta unidad se encuentra diseñada para soportar y mover un panel fotovoltaico UPSOLAR de 250 Wp y 18,5 kg, en dos grados de libertad: altura solar (inclinación), cuyo rango de operación es entre 40° y 120°, y acimut (orientación), que opera en los 360°. Este sistema tiene dos modos de funcionamiento: modo de seguimiento estático, en el cual un usuario determina la orientación e inclinación del panel FV según su interés de análisis y el modo de seguimiento automático, el cual está configurado para operar entre las 09:00 am y 05:00 pm. En este modo el consumo de potencia eléctrica según datos técnicos y mediciones realizadas con equipos de laboratorio tales como: multímetro, osciloscopio y pinza amperimétrica es de 46,92 Wh/día de los cuales el 93% es suministrado al módulo de control, aclarando que la cantidad de potencia consumida por este módulo obedece a que el algoritmo de control se ejecuta sobre un sistema operativo Linux Yocto y el protocolo de comunicación WiFi está habilitado continuamente, con el fin de garantizar soporte para fines pedagógicos.

Formulación del proyecto de grado

Existen un sinnúmero de factores que inciden directamente en la disminución de la eficiencia de un sistema de generación fotovoltaica, algunos de estos factores, son propios de los paneles fotovoltaicos, como, por ejemplo: materiales, errores, e incertidumbres de fabricación, pérdidas óhmicas en las conexiones, temperatura

de operación de los semiconductores, etc. Además de los factores anteriormente mencionados, existen otros que son externos, tales como: ubicación geográfica, intensidad y ángulos de la radiación solar incidente, condiciones climáticas, polvo y suciedades, entre otros.

Ubicar los paneles fotovoltaicos de tal forma que su superficie se enfrente al máximo a los rayos del sol, incrementa considerablemente la cantidad de potencia producida comparada con la potencia que generaría un panel fotovoltaico instalado en una posición estática; el aumento de potencia generado por un sistema de seguimiento solar de dos grados de libertad está entre el 20% y el 50%, dependiendo de la zona geográfica [3], las técnicas utilizadas, así como la exactitud y precisión del sistema.

Con este trabajo se busca diseñar e implementar una unidad electromecánica que permita orientar un panel solar de 250 Wp, para que esta estructura se convierta en una herramienta de experimentación, aprendizaje e investigación de la generación fotovoltaica en la E3T, puesto que la ausencia de una unidad experimental dificulta la realización de trabajos en este tema.

Para la realización de este trabajo de grado se planteó como objetivo general *Diseñar e implementar la estrategia de movimiento para una unidad experimental de seguimiento solar con dos grados de libertad para un panel fotovoltaico de 250 Wp (UPSOLAR 250)*. Con el fin de lograr esto se da cumplimiento a los siguientes objetivos específicos.

- Diseñar una estructura electromecánica con movimiento en dos grados de libertad, la cual soporte y posibilite el movimiento de un panel UPSOLAR 250.
- Diseñar el sistema que permita controlar la posición angular (acimut y altura solar) de un panel UPSOLAR 250.

- Llevar a cabo la puesta en marcha del sistema de seguimiento solar, el cual permitirá posicionar al panel FV según ángulos de acimut y altura solar previamente calculados.

Alcance

En este trabajo de grado se diseñó y construyó un sistema electromecánico, con movimiento en dos ejes (acimut y altura solar), resistente a las condiciones ambientales locales, el cual soporta un panel fotovoltaico de 250 Wp y controla el movimiento del mismo, de tal forma que se lograría aumentar la generación de energía eléctrica.

Se realizó una revisión de la literatura técnica, dando especial importancia a los trabajos de investigación realizados en condiciones geográficas y climáticas similares a las presentadas en la ciudad de Bucaramanga. Basados en esto se seleccionaron los materiales de construcción, se utilizó un algoritmo de posicionamiento solar para estimar la posición sol y ajustar la del panel FV. Adicionalmente, se consideraron aspectos que faciliten el posterior acople con otras etapas de la unidad experimental como: monitorización, interfaz de usuario, análisis de datos etc.

El diseño y construcción de este seguidor está enfocado desde la perspectiva académica y de investigación; y la consecución de esta unidad experimental será de utilidad para posteriores estudios sobre seguimiento solar que involucren la monitorización y utilización de la energía producida por el panel FV con el objetivo de contribuir al análisis del comportamiento de sistemas fotovoltaicos en Bucaramanga.

1. MARCO TEÓRICO

En 1962 Finster construyó el primer seguidor solar [4], el cual es utilizado para paneles fotovoltaicos comunes, de alta concentración y reflectores ubicando estos elementos de tal forma que los rayos solares incidan lo más perpendicularmente posible respecto a la superficie de éstos, logrando así un aumento en la cantidad de radiación captada [5].

En esta sección se tratan conceptos básicos sobre la energía solar, los diferentes movimientos terrestres respecto al sol, así como los tipos de seguidores solares diseñados a nivel mundial, los cuales se convierten en base necesaria para el desarrollo de esta temática.

1.1. ENERGÍA SOLAR Y PANELES FOTOVOLTAICOS

La generación fotovoltaica (FV) fue descubierta por el científico de origen Francés Alexandre Edmon Becquerel en el año 1839, por medio de un experimento que consistía en sumergir una pila electrolítica en una sustancia de características similares y expuesta a la luz, observando que esta pila generaba más energía eléctrica. Posterior a esto, en 1893 el inventor Charles Fritts creó la primera celda solar, la cual estaba formada de láminas con revestimiento de selenio con una delgada capa de oro, esta celda operaba con una eficiencia del 1%.

En el año 1941 Russell Ohl, inventor estadounidense construyó y patentó la primera celda de silicio disminuyendo así el costo de fabricación de estas; en posteriores experimentos Gerald Pearson creó una celda fotovoltaica más eficiente. Aprovechando el resultado de estos experimentos Daryl Chaplin y Calvin

Fuller elaboraron estas celdas de forma más práctica y serían ellos quienes comenzaran con la producción de estas hacia el año 1954 [6].

El funcionamiento propiamente dicho de una celda solar debe cumplir con tres criterios específicos; primero que exista una unión p-n; segundo que la incidencia de los fotones contenga una energía superior o por lo menos igual a la que posee el semiconductor en su banda prohibida; y tercero, debe existir una generación de portadores de cargas libres (electrones y huecos), los cuales deben ser recolectados por los electrodos correspondientes de la celda solar [7]. La celda solar es un dispositivo que convierte la radiación solar que incide sobre ella, en un voltaje entre sus terminales y por medio de un circuito externo produce una corriente dando origen a una potencia, la cual puede ser suministrada a un dispositivo eléctrico. [9] [10].

1.2. MOVIMIENTOS TERRESTRES RESPECTO AL SOL

En la práctica se asume que el sol ocupa una posición fija en el espacio, sin embargo, la tierra realiza movimientos respecto al sol de manera simultánea los cuales describiremos a continuación:

1.2.1. Traslación. La tierra se mueve en una órbita elíptica alrededor del sol, cada vuelta tarda 365 días, 6 horas, 9 minutos y 9,76 segundos, por lo cual cada 4 años se ajusta el calendario haciendo un año de 366 días. La distancia media entre el planeta tierra y el sol es de 1 AU (1 Unidad astronómica= 149.597.871 km), esta distancia varía entre 0,983 AU (Perihelio) y 1,017 AU (Afelio). En la trayectoria de la tierra alrededor del sol hay que destacar las siguientes fechas: El solsticio de verano (máxima duración del día), solsticio de invierno (mínima duración del día) y los equinoccios de primavera y otoño en el cual tiene igual duración de día y de noche en estas épocas del año [8].

1.2.2. Rotación. Es el movimiento que realiza la tierra entorno a un eje denominado polar, este eje se encuentra inclinado $23,45^\circ$ respecto a una línea perpendicular a la eclíptica (esta inclinación da lugar a las estaciones). La rotación de la tierra sobre su eje dura 23 horas, 56 minutos y 4 segundos y su consecuencia más directa es la existencia del día y la noche [6].

1.2.3. Precesión. Es el movimiento de cabeceo asociado al cambio de dirección en el espacio que experimenta el eje de rotación de la tierra. Una vuelta completa tiene una duración de 26 000 años [6].

1.2.4 Nutación. Es el movimiento de balanceo en la precesión, el máximo y mínimo en la onda de balanceo se alcanza cada 18,6 años, su consecuencia es un ligero cambio en la inclinación del eje de rotación [6].

1.3. CÁLCULO DE LA POSICIÓN SOLAR

Es posible calcular la posición relativa del sol respecto a una posición terrestre utilizando ecuaciones astronómicas de posicionamiento solar. Los datos necesarios para estos cálculos son principalmente la fecha, hora, zona horaria y posición en términos de latitud y longitud del observador.

A continuación, se muestran los pasos y ecuaciones de un algoritmo aproximado para el cálculo de la posición solar respecto a un observador [11].

Primeramente, es necesario calcular la fracción del año transcurrida (Ecuación 1).

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \left(day - 1 + \frac{hour - 12}{24} \right) [^\circ] \quad (1)$$

A partir de γ es posible medir:

- La diferencia entre el tiempo solar medio (TSM) y el tiempo solar aparente (TSV). Tomando como referencia el tiempo solar medio, el tiempo solar aparente se encuentra adelantado 16 minutos y 33 segundos aproximadamente el 16 de noviembre y está atrasado 14 minutos y 6 segundos el 12 de febrero, estas diferencias son nulas aproximadamente los días 15 de abril, 14 de junio, 1 de septiembre y el 25 de diciembre, cerca de los equinoccios y solsticios. A esta diferencia se le conoce como ecuación del tiempo (Ecuación 2).

$$EQ_{time} = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos \gamma - 0,032077 \sin \gamma - 0,014615 \cos 2\gamma - 0,040849 \sin 2\gamma) \text{ [min]} \quad (2)$$

- La declinación solar (Ecuación 3) el cual es un ángulo formado entre el plano ecuatorial de la tierra y la línea tierra sol, este varía entre $-23,45^\circ$ y $23,45^\circ$.

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \gamma + 0,070257 \sin \gamma - 0,006758 \cos 2\gamma + 0,000907 \sin 2\gamma - 0,00269758 \cos 3\gamma + 0,00148 \sin 3\gamma \text{ [}^\circ\text{]} \quad (3)$$

- La distancia relativa de la tierra al sol (Ecuación 4).

$$\left(\frac{R_0}{R}\right)^2 = 1,00011 + 0,034221 \cos \gamma - 0,00128 \sin \gamma + 0,000719 \cos 2\gamma + 0,000077 \sin 2\gamma \quad (4)$$

Es posible calcular el tiempo solar aparente o verdadero como se muestra en la Ecuaciones 5 y 6.

$$time_{offset} = EQ_{time} - 4 * longitud + 60 * timezone [min] \quad (5)$$

Donde la longitud debe expresarse en grados y timezone es la zona horaria [\pm horas]

$$TSV = Hora * 60 + minutos + \frac{segundos}{60} + time_{offset} [min] \quad (6)$$

Ahora es posible calcular el ángulo horario (Ecuaciones 7 y 8), el cual es la abertura formada por la intersección entre el meridiano del observador y el meridiano del sol.

$$\omega = \frac{TSV}{4} - 180 [^\circ], \quad si \frac{TSV}{4} \geq 0 \quad (7)$$

$$\omega = \frac{TSV}{4} + 180 [^\circ], \quad si \frac{TSV}{4} < 0 \quad (8)$$

Finalmente es posible hallar la altura solar (Ecuación 9), la cual es la distancia angular entre el sol y el punto de intersección entre la vertical que pasa por el sol y el horizonte (ver Figura 1).

$$\alpha = \cos^{-1}(\sin(latitud) \cdot \sin(\delta) + \cos(latitud) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (9)$$

$$h = 90 - \alpha$$

y el acimut (Ecuaciones 10 y 11), que es el ángulo comprendido entre el punto cardinal Norte y un punto P siguiendo el sentido de las agujas del reloj (ver Figura 1).

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\sin(\text{latitud}) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\delta)}{\cos(\text{latitud}) \cdot \sin(\alpha)} \right) + 180 [^\circ], \text{ si } \omega > 0 \quad (10)$$

$$\beta = -\cos^{-1} \left(\frac{\sin(\text{latitud}) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\delta)}{\cos(\text{latitud}) \cdot \sin(\alpha)} \right) + 540 [^\circ], \text{ si } \omega \leq 0 \quad (11)$$

Figura 1. Posición solar respecto a un observador en tierra.

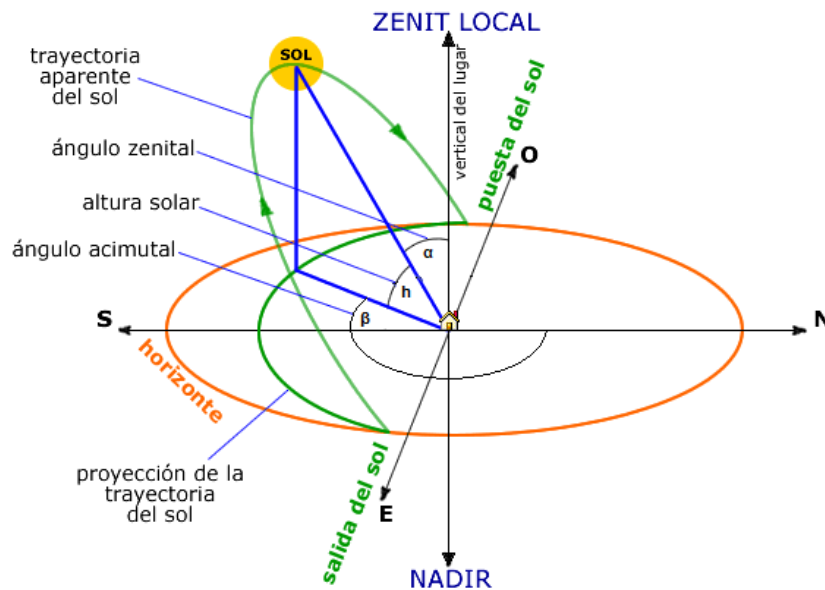


Imagen tomada de [39].

1.4. ESTRUCTURAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

Los seguidores solares se pueden clasificar por su capacidad de movimiento en estructuras fijas, seguidores de un eje y seguidores de dos ejes [9].

1.4.1 Estructuras fijas y estáticas. Como su nombre lo indica, no tienen ningún movimiento, pero estas estructuras son robustas, flexibles, de bajo costo y larga vida útil. Estas características convierten a este tipo de estructuras en una solución rápida y eficiente, principalmente en terrenos con inclinaciones superiores

al 5%. Los seguidores solares estáticos maximizan la captación de radiación solar de los paneles FV cuando se inclinan el número de grados de la latitud del lugar y se orientan de manera opuesta al sentido de esta. Para el caso Bucaramanga los paneles deberán inclinarse aproximadamente 7° y orientarse hacia el sur [12].

1.4.2 Seguidores de un eje. También se conocen como seguidores de un grado de libertad (1 gdl), en la mayoría de los casos realizan un movimiento de este a oeste y aumentan la eficiencia entre un 5% a 30% respecto a un sistema estático [3]. Dependiendo de la dirección de la orientación del panel pueden subclasificarse en: Horizontales, Horizontales inclinados, Verticales, Verticales inclinados y Polares [14].

1.4.3 Seguidores de dos ejes. También se conocen como seguidores de dos grados de libertad (2 gdl) y le permiten al panel FV realizar movimientos a través de una trayectoria acimutal (giro respecto a un eje vertical) y altura solar o elevación (giro respecto a un eje horizontal).

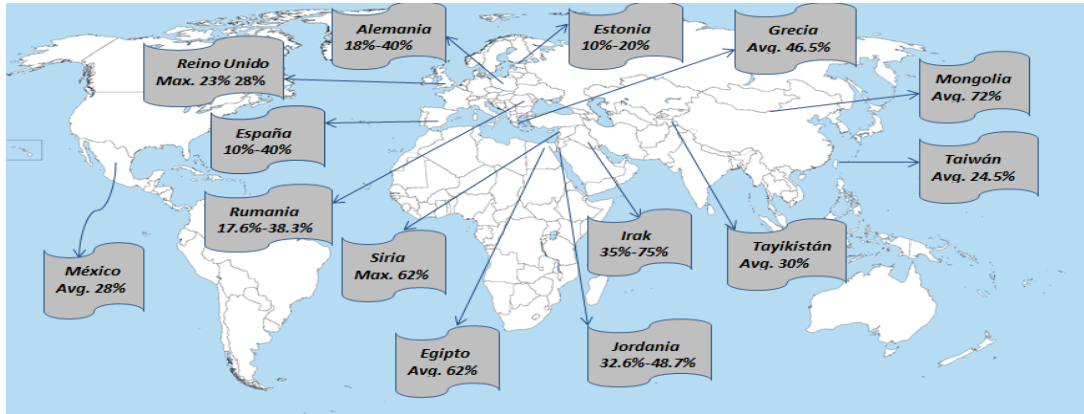
Figura 2. Movimiento de un seguidor solar de dos ejes.



La Figura 3 muestra los potenciales aumentos en generación en diversos lugares del mundo respecto a un sistema estático en dichas ubicaciones. Como se ha mencionado, éstos aumentos dependen de la posición geográfica, paisaje local,

estaciones o condiciones climáticas, así como la precisión y exactitud en el posicionamiento de los paneles, sin embargo, la mayoría de las eficiencias reportadas oscilan entre 30% y 45% [14].

Figura 3. Eficiencias de seguidores solares (simulaciones e implementaciones) alrededor del mundo.



Los seguidores solares también son clasificados de acuerdo a las características de sus actuadores en pasivos y activos [1].

1.4.4 Seguidores pasivos. Se denominan pasivos ya que no necesitan de una fuente de alimentación externa ni un control electrónico para su funcionamiento. Al no consumir potencia para su funcionamiento, estas unidades pudiesen ser más eficientes que otros tipos de seguidores, pero lamentablemente este tipo de unidades tienen baja exactitud, precisión y solo un grado de libertad [1]. En [13] y [15] se destacan dos métodos:

Expansión térmica de un material: Este tipo de sistemas usa líquidos con temperaturas de ebullición bajas (generalmente Freón), estos sistemas poseen dos tanques alineados de este a oeste e interconectados entre sí, el líquido contenido en un tanque se evapora al recibir los rayos del sol y el gas viaja a

través de un ducto hacia el otro tanque donde el material se condensa, la diferencia de pesos genera el movimiento.

Aleaciones con memoria de forma: Estas aleaciones son capaces de realizar un movimiento, el cual es inducido por un estímulo térmico, ejerciendo una fuerza significativa en un elemento móvil. El Nitinol es la aleación más conocida entre las aleaciones con memoria de forma (SMA^{*}), estas aleaciones se usan normalmente en aplicaciones militares, médicas y robóticas. En 1985, Hashizume presentó la patente de un seguidor solar basado en SMA, sin embargo, en ese diseño no se abordó el regreso del seguidor al terminar el día, así como el comportamiento cíclico del sistema. N. Jeya Ganesh, en [15] muestran el diseño y construcción de un prototipo de seguimiento solar usando AMF.

1.4.5 Seguidores activos. La mayoría de los seguidores solares construidos en la actualidad son activos, ya que la presencia de motores, servomotores, motorreductores y/o actuadores lineales aportan flexibilidad para implementar diversos tipos de control y métodos de seguimiento. Dependiendo de la potencia nominal de los sistemas fotovoltaicos (por ende, su tamaño y peso), se pueden utilizar actuadores eléctricos de corriente directa (bajas potencias) o corriente alterna (potencias altas). Los actuadores lineales pueden ser eléctricos, neumáticos o una combinación de estos. En el diseño de este tipo de seguidores es de vital importancia asegurar que la potencia consumida por los actuadores, sea considerablemente menor a la potencia extra generada por el sistema de seguimiento solar [1].

^{*} Del ingles Shape memory alloy.

1.5. TÉCNICAS DE CONTROL EN SEGUIDORES SOLARES

Los seguidores solares activos, requieren de un sistema de control (comúnmente digital), estos sistemas pueden ser de lazo abierto o lazo cerrado.

Como se puede constatar en [16], existen sistemas de seguimiento solar que utilizan sensores para determinar la posición en la cual se capta la mayor radiación solar. Para esto se utilizan fotoceldas o fotodetectores ubicadas matricialmente de esta forma es posible obtener diferencias en la cantidad de radiación solar percibida, o bien pueden utilizarse sensores industriales de sol, los cuales miden el ángulo de incidencia de los rayos solares, la radiación solar, y son capaces de entregar mediante una señal digital la posición del sol.

Algunos seguidores solares utilizan técnicas de tratamiento digital de imágenes para ubicar de manera perpendicular el panel fotovoltaico respecto a los rayos solares [17]. A diferencia de los sistemas de seguimiento anteriormente mencionados, en [18] los autores utilizan métodos astronómicos (mapas solares, ecuaciones de posicionamiento solar) para calcular la posición angular del sol (acimut y altura solar), para los cuales son necesarios datos como la latitud, longitud, fecha, hora y zona horaria, los cuales pueden ser suministrados manualmente o por medio de un GPS (sistema de posicionamiento global).

En cuanto al hardware utilizado, para realizar control sobre los actuadores, se destacan los microcontroladores, PLCs*, y FPGAs*. En estos se pueden implementar desde controles ON/OFF, controladores PID* digitales, y técnicas de optimización, redes neuronales o sistemas embebidos [1], [19].

* Controlador lógico programable.

* Del inglés Field Programmable Gate Array.

* Proporcional, integral, derivativo.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SISTEMA ELECTROMECHANICO

Este capítulo expone el proceso de diseño de la estructura, la selección de componentes y la construcción de la unidad experimental de seguimiento solar, tomando como punto de partida las características del panel FV UP-M250P, los requerimientos técnicos de este tipo de sistemas y el lugar de instalación.

2.1 REQUERIMIENTOS Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO

2.1.1 Panel fotovoltaico. La unidad experimental de seguimiento solar, debe soportar y mover un panel FV Upsolar UP-M250P (Figura 4) en dos grados de libertad con el objetivo de aumentar la captación de radiación solar incidente sobre él. Este componente es un módulo compuesto por 60 celdas fotovoltaicas elaboradas a base de silicio policristalino, las principales especificaciones técnicas de este módulo FV se detallan en la Tabla 1.

Figura 4. Panel fotovoltaico Upsolar UP-250M.



Tabla 1. Especificaciones a considerar del módulo Upsolar UP-M250.

| Característica | Descripción |
|---------------------------------|--|
| Potencia máxima [Wp] | 250 |
| Voltaje a potencia máxima [V] | 30,9 |
| Corriente a potencia máxima [A] | 8,10 |
| Voltaje de circuito abierto [V] | 38,2 |
| Corriente de corto circuito [A] | 8,45 |
| Eficiencia | 15,4% |
| Rango de temperatura [°C] | -40 – 90 |
| Dimensiones [in/mm] | 64,57 x 39,06 x 1,38 / 1640 x 992 x 35 |
| Peso [lb/kg] | 40,8 / 18,5 |

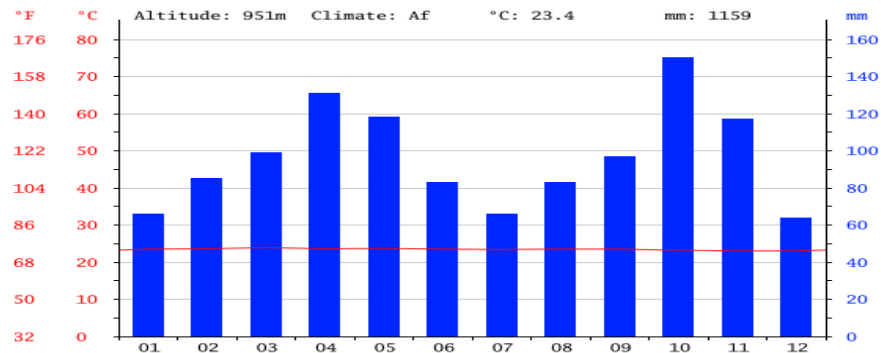
2.1.2 Velocidad mínima de movimiento. Este requerimiento depende exclusivamente de la velocidad relativa del sol respecto a la tierra, la mínima velocidad necesaria puede estimarse como 180° en 12 horas lo cual es aproximadamente $694,5 \times 10^{-6}$ rpm, por lo cual superar esta velocidad no es una limitante.

2.1.3 Potencia máxima consumida. Como el objetivo final de un sistema de seguimiento solar aplicado a generación FV es aumentar la potencia eléctrica generada, y teniendo en cuenta que para un seguidor solar de dos grados de libertad instalado en la ciudad de Bucaramanga se espera un incremento de 20% en la potencia generada respecto a un panel FV instalado en una posición estática [3], es necesario que la potencia consumida por la unidad de seguimiento durante un día sea inferior a la potencia generada adicionalmente durante ese mismo lapso de tiempo; sin embargo dado que la unidad tiene fines académicos y que el análisis de impacto y efecto sobre el incremento de captación de radiación solar son objeto de estudios posteriores a este trabajo.

2.1.4 Condiciones climáticas en lugar de instalación. Bucaramanga es la capital del departamento de Santander, se encuentra ubicado en el noreste del

país en una terraza inclinada de la cordillera oriental a los 7°08' de latitud norte y 73°08' de longitud al Oeste de Greenwich y 951 msnm de altitud, tiene un clima tropical cuya temperatura media es de 23,4 °C. Hay precipitaciones durante todo el año y su media anual es de 1159 mm, el mes más seco es diciembre y el mes con más precipitaciones es octubre como se muestra en la Figura 5 [20].

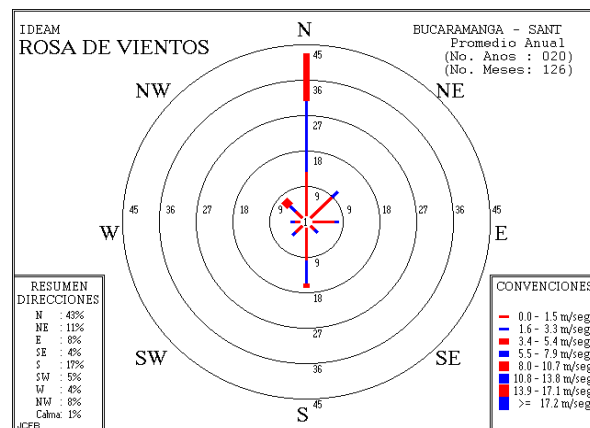
Figura 5. Media de precipitaciones por meses.



Fuente: Imagen tomada de [20].

Bucaramanga es una ciudad con vientos de baja magnitud, en el punto de instalación no superan los 2 m/s [3], la dirección predominante de los vientos que llegan a la ciudad es el norte, tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Rosa de vientos Bucaramanga.



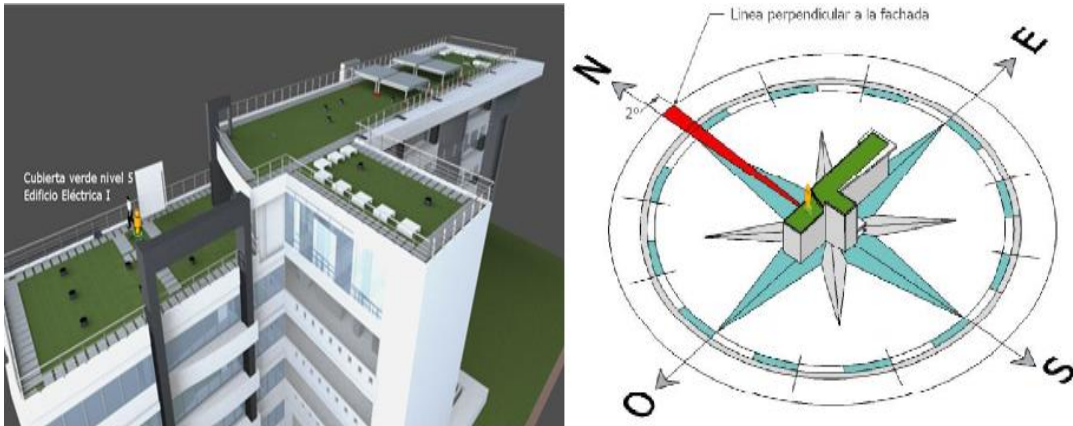
Fuente: Imagen tomada de [21].

La unidad de seguimiento solar se instaló en una base de concreto de la cubierta verde (nivel 5) del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander tal como se muestra en las Figuras 7 y 8, la cual está ubicada a $7^{\circ}14'$ latitud norte y $73^{\circ}12'$ longitud Oeste.

Figura 7. Lugar de instalación.



Figura 8. Distribución espacial del lugar de instalación.



Fuente: Imagen tomada de [22].

2.2 PRESELECCIÓN DE DISEÑOS EXISTENTES

Después de una revisión de seguidores solares activos con dos grados de libertad, existentes en el mercado y desarrollados a nivel académico se han preseleccionado dos diseños cuyas características se resumen a continuación.

2.2.1 Alternativa de diseño 1 Consiste en una unidad de giro de dos ejes (*Dual axis slewing drive*), la cual es fabricada como solución en aplicaciones de posicionamiento para paneles fotovoltaicos, platos satelitales, brazos robóticos, entre otros. Los fabricantes de estas unidades ofrecen una gama de posibilidades donde los criterios principales de selección son el torque y la velocidad de salida.

Se realizaron cotizaciones con diferentes fabricantes de una unidad con un eje de salida de 3" de diámetro y dos motorreductores (engranaje planetario) de 24 VDC.

Las principales características del sistema electromecánico cotizado se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características nominales de unidad de giro (SDE3) y motorreductor (engranaje planetario).

| Características nominales unidad de giro (SDE3) | |
|--|--------------------|
| Característica | Descripción |
| Relación de reducción | 62:1 |
| Torque nominal de salida [N.m] | 400 |
| Carga axial máxima [kN] | 30 |
| Carga radial máxima [kN] | 15 |
| Error de posicionamiento | $\leq 0,2^\circ$ |
| Características nominales motorreductores | |
| Voltaje nominal [V] | 24 |
| Corriente nominal [A] | < 1,2 |
| Velocidad de salida [rpm] | 3 |
| Relación de reducción | 575:1 |
| Encoder | Cuadratura |

Al utilizar el conjunto de elementos descritos anteriormente se obtendría una velocidad máxima a la salida de 0,048 rpm, superando ampliamente la velocidad aparente del sol, además se consumiría una potencia instantánea máxima de 28,8 W.

Las unidades de giro fueron cotizadas en China y EE. UU, sus costos sin incluir envío, impuestos y aranceles se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cotización unidad de giro SDE3 y motorreductor de engranaje planetario.

| Dalian Running Engineering (China). | | | |
|---|----------|----------------------|----------------|
| Concepto | Cantidad | Costo unitario [USD] | Subtotal [USD] |
| Unidad de giro SDE3-62-R | 1 | 438,00 | 438,00 |
| Motorreductor 24H30.33 | 2 | 138,00 | 276,00 |
| Total | | | 714,00 |
| Kinematics Manufacturing, Inc (EE. UU). | | | |
| Concepto | Cantidad | Costo unitario [USD] | Subtotal [USD] |
| Unidad de giro SDE3-62MHQ | 1 | 438,00 | 698,75 |
| Motorreductor 24H30.33 | 2 | 223,00 | 446,00 |
| Total | | | 1144,75 |

Figura 9. Unidad de giro y motorreductores cotizados.



Fuente: Imagen tomada de [23].

La selección de esta alternativa podría tener como resultado una estructura similar a la mostrada en la Figura 10.

Figura 10. Estrategia de movimiento alternativa 1.



Fuente: Imagen tomada de [23].

Ventajas: Estas unidades están fabricadas bajo sofisticados procesos industriales y cumpliendo altas normas de calidad, logrando alta eficiencia y precisión en los movimientos. Los actuadores están diseñados para operar durante largos periodos de tiempo de manera intermitentemente, su alta relación reducción con engranajes planetarios, le brinda baja velocidad, alto par y precisión, además cuentan con un *encoder* de cuadratura de efecto hall de 2 ppr** en motor que multiplicado por la relación total de reducción entregaría a la salida una resolución teórica de $0,005^\circ$. Finalmente, toda la unidad está debidamente sellada lo que le brinda alta resistencia a la intemperie y le entrega una expectativa de vida útil de hasta 30 años.

Desventajas: Como se ha mencionado anteriormente estas unidades están diseñadas para aplicaciones de seguimiento solar, sin embargo, se aprecian como limitantes el precio de la unidad, ya que puede ascender a \$3'000.000 COP. Dado que la opción económicamente más rentable es importar la unidad desde China y transportarla vía marítima, el tiempo de entrega puede ascender a 4 meses, tiempo que resulta vital en el desarrollo de este proyecto. Para esta unidad, las especificaciones de par máximo, carga axial y radial resultan sobredimensionadas

* Sensor rotativo encargado de transformar un movimiento rotacional en una señal digital

* Unidad que expresa pulsos por revolución

ya que esta unidad está en capacidad de soportar y mover hasta 3 paneles FV Upsolar UP-M250P.

2.2.2 Alternativa 2. En esta segunda alternativa se plantea un diseño híbrido, el cual consta de un actuador lineal para el movimiento de altura solar y una unidad de giro para el movimiento acimutal.

El actuador lineal preseleccionado para realizar el movimiento de altura solar dada la carga a soportar y la distancia recorrer es el HFM-LAD12, del cual se muestran sus características principales en la Tabla 4.

Tabla 4. Características nominales del actuador lineal HFM-LAD12.

| Características nominales HFM-LAD12 | |
|-------------------------------------|-------------|
| Característica | Descripción |
| Corriente nominal [A] | 4,5 |
| Voltaje nominal [V] | 12 |
| Longitud mínima [mm] | 501,65 |
| Longitud máxima [mm] | 806,45 |
| Empuje máximo [kg] | 102 |
| Velocidad [mm/s] | 9 |
| Relación de reducción | 10:1 |
| Encoder | No |

Figura 11. Actuador lineal HFM-LAD12.



Fuente: Imagen tomada de [24]

Para realizar el movimiento acimutal se preselecciono la unidad de giro SE3C cuyas características son iguales a las presentadas en la Tabla 2.

Figura 12. Unidad de giro SE3C.



Fuente: Imagen tomada de [25].

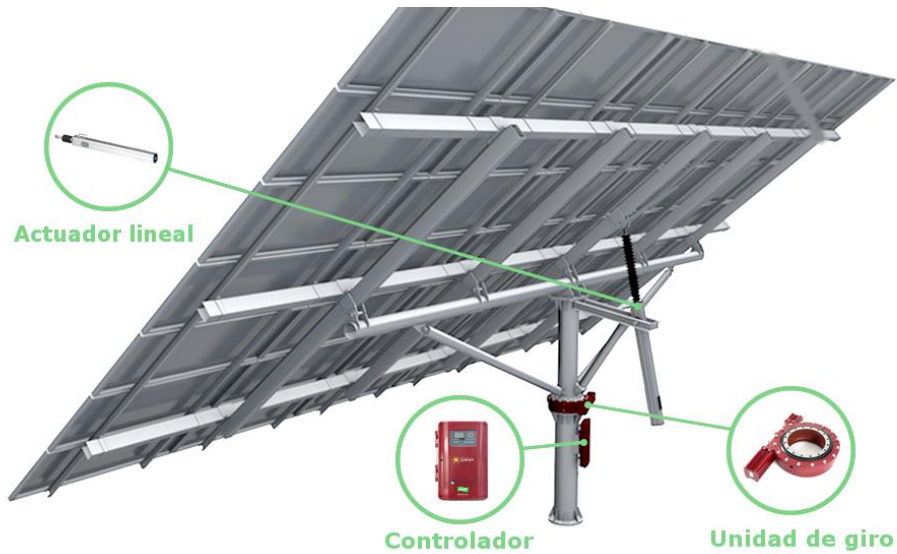
Los costos principales de esta alternativa se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Cotización alternativa 2.

| Concepto | Cantidad | Costo unitario [USD] | Subtotal [USD] |
|---------------------------|----------|----------------------|----------------|
| Actuador lineal HFM-LAD12 | 1 | 142,00 | 142,00 |
| SE3C-62-R | 1 | 245,00 | 245,00 |
| 24H.30.33 | 1 | 138,00 | 138,00 |
| Total | | | 525,00 |

La selección de esta alternativa podría tener como resultado una estructura similar a la de la Figura 13.

Figura 13. Estrategia de movimiento alternativa 2.



Fuente: Imagen tomada de [26].

Ventajas: El acople mecánico entre el soporte y la unidad de giro es sencillo, la velocidad que se alcanza en el movimiento acimutal puede ser alto, lo cual es conveniente para unidades experimentales o para ubicar rápidamente el panel en una posición de defensa tras un cambio brusco en la velocidad y dirección del viento.

Desventajas: Los actuadores lineales están normalmente diseñados para realizar apertura y cierre de su brazo de manera rápida, velocidad que es directamente proporcional al consumo de potencia; para el caso particular del HFM-LAD12 puede ser de hasta 54 W. Las distancias mínima y máxima del brazo de un actuador lineal pueden limitar el ángulo de altura solar o aumentar la potencia necesaria para realizar el trabajo en este grado de libertad, al tener que ubicar el actuador en un lugar próximo al eje de rotación. El precio de estos elementos principales puede ascender a \$2'300.000 COP, al asumir el valor base, transporte e impuestos. Además, el tiempo de entrega sería de 4 meses ya que estos elementos serían adquiridos en China y transportados vía marítima.

2.3 SELECCIÓN DEL DISEÑO

Tomando como referencia las ventajas y desventajas de las alternativas de diseño preseleccionadas y las consideraciones de diseño, se determina que la alternativa 1 es la que más se ajusta a los requerimientos de este proyecto, debido a que características como la baja velocidad, la cual está relacionada directamente con la potencia eléctrica consumida, hacen de esta opción la más atractiva.

Dado que para el desarrollo de este proyecto se cuenta con un presupuesto limitado, y que para que la implementación de seguidores solares en la zona ecuatorial sea financieramente atractiva, se optó por la elaboración y fabricación propia, utilizando elementos y materiales de bajo costo, fácil adquisición y basando el diseño en la estrategia de movimiento planteada en la alternativa 1.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

La fase inicial del diseño se basó en la mecánica de movimiento del sistema, la adquisición o fabricación de cada elemento se plantea a partir múltiples factores, entre los cuales se destacan el peso, consumo de potencia, costo, modularidad, transporte, instalación, resistencia a la intemperie y durabilidad.

2.4.1 Soporte del panel. A partir de las especificaciones del panel descritas en la Tabla 1 y sus puntos de anclaje (Anexo A), se diseñó una estructura en forma de H a base de ángulos de hierro de 1", que permita soportar y asegurar el panel FV de forma horizontal como se muestra en la Figura 14 y el Anexo B.

Figura 14. Soporte de la carga (Esquema realizado en SolidWorks).



2.4.2 Módulo base y protección. Este módulo se diseñó a partir de un esqueleto en forma de cubo el cual almacena en su interior el módulo encargado del movimiento acimutal y el circuito de control, razón por las cual debe estar debidamente cubierta. Cuenta con una puerta de acceso frontal y celosías de ventilación ubicadas en las vistas laterales, con el fin de permitir la ventilación y el flujo de aire en su interior tal como se aprecia en la Figura 15.

Figura 15. Soporte de la carga (Esquema realizado en SolidWorks).



2.4.3 Actuadores. Los actuadores representan uno de los elementos vitales en el diseño y construcción de este sistema de seguimiento solar. Debido a que previamente se ha seleccionado un diseño mecánico el cual se basa en el uso de

motores, en este apartado se muestran las opciones contempladas y la selección de los mismos.

Alternativa 1: Se contempló el uso de dos motorreductores Parvalux (PM50GWS), estos son comúnmente usados en seguidores solares de dos grados de libertad. Las principales características del motorreductor se constatan en [30] y se describen en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del motorreductor Parvalux (PM50GWS)

| Características nominales Parvalux (PM50GWS) | |
|--|-------------|
| Característica | Descripción |
| Potencia nominal [W] | 80 |
| Voltaje nominal [V] | 12 |
| Velocidad [rpm] | 3 |
| Carga radial [N] | 667 |
| Carga axial [N] | 353 |
| Torque [Nm] | 21 |
| Encoder | No |

Figura 16. Motorreductor de los fabricantes Parvalux.



Fuente: Imagen tomada de [30].

Ventajas: Este motorreductor tiene una velocidad de salida baja (3 rpm) lo que lo hace ideal para realizar los movimientos de un seguidor solar ya que es capaz de entregar un alto par a un coste bajo de potencia y tiene un amplio rango de alimentación, características que garantizan un buen desempeño del sistema.

Desventajas: El costo del producto es elevado y está fuera del presupuesto del proyecto, la potencia consumida es alta en referencia a los requerimientos de la aplicación y no cuenta con encoder el cual puede ser útil para determinar la posición angular.

Alternativa 2: Se contempló el uso del servomotor DFS-10G-05 fabricado por Japan Servo y originalmente usado en impresoras y fotocopiadoras láser de referencias HP2686A y HP2686D. Este actuador está compuesto por un servomotor y una caja reductora que disminuye su velocidad y aumenta su torque con una alta eficiencia. A continuación, se pueden observar las principales características del servo-motorreductor [31].

Tabla 7. Características del servo-motorreductor DFS10G-05.

| Características nominales del servo-motorreductor DFS10G-05 | |
|---|-------------------------------------|
| Característica | Descripción |
| Potencia nominal [W] | 13 |
| Voltaje nominal [V] | 24 |
| Corriente maxima [A] | 0,54 |
| Relación de reducción | 1:25 |
| Velocidad de motor [rpm] | 2400 |
| Velocidad de salida [rpm] | 96 |
| Masa [kg] | 1,4 |
| Torque [Nm] | 10 Nm |
| Encoder | 48 ppr (Señal senoidal diferencial) |

Figura 17. Motorreductor modelo (DFS10G-05) fabricado en Japón



Ventajas: Este servo-motorreductor posee un consumo de potencia bajo, su caja reductora le otorga baja velocidad a la salida y un aumento proporcional del torque, su precio en el mercado es bajo en comparación con las alternativas antes mencionadas y puede encontrarse (usado) en el mercado local por un precio aproximado de \$50.000 COP o importarlo desde Asia con un costo de \$40.000 COP (No incluye gastos de envío). Posee un *encoder* en motor 48 *ppr*, el cual emite una señal senoidal diferencial la cual puede resultar de gran utilidad para realizar un sistema de control de posición.

Desventajas: Es de difícil adquisición en el mercado local y es un motor de escobillas lo cual puede convertirse en un inconveniente al tener que programar un mantenimiento para hacer reemplazo de estos.

2.4.5 Justificación de la alternativa seleccionada. Para la selección de los actuadores adecuados se tuvo en cuenta la potencia eléctrica consumida en cada uno de los movimientos (acimut y altura solar), precio, facilidad de control, torque; a continuación, se presenta una tabla comparativa que muestre los tipos de actuadores anteriormente mencionados.

Tabla 8. Cuadro comparativo actuadores.

| Actuadores | Torque [N/m] | Costo [COP] | Velocidad [rpm] | Potencia [w] | Encoder |
|----------------------------------|--------------|-------------|-----------------|--------------|---------|
| Motorreductor Parvalux (PM50GWS) | 21 | 600.000 | 3 | 80 | No |
| Servo-Motorreductor (DFS10G-05) | 10 | 50.000 | 96 | 13 | Si |

De la Tabla 9 es posible concluir que el motorreductor DFS10G-05 posee mejores características, principalmente su costo y potencia consumida son relativamente bajos, posee encoder el cual puede resultar útil en cualquier etapa del proyecto y a pesar de que el motor es de escobillas al no operar de manera continua, lo hace un elemento ideal para la realización del proyecto.

Los servo-motorreductores del movimiento acimut y de altura solar fueron obtenidos de una fotocopiadora de marca HP que se encontraba en desuso, siendo adquiridas en el mercado local por un costo de \$50.000 COP por unidad. Uno de los servo-motorreductores presentó un daño en su caja reductora y se hace necesario reemplazarla; sin embargo, teniendo en cuenta que el eje que mueve el acimut está ubicado verticalmente y la carga se ubica axialmente a este el movimiento acimutal es el de menor par requerido; se optó por la utilización de este servomotor sin la reducción original para este movimiento.

Figura 18. Motorreductores seleccionados según movimiento.



Altura solar



Acimut solar

2.4.4 Unidades de giro. Tal y como se describe en la alternativa de diseño 1, para permitir el movimiento en dos grados de libertad se requieren dos unidades de giro. Estas unidades fueron replicadas a partir del acople de dos reductores de velocidad tipo sinfín corona.

Se seleccionó este tipo de reductores debido a que cuando el ángulo de acople entre la corona y el tornillo “sinfín” es cercano a 90° o existen relaciones de transformación altas se otorga a estas una capacidad de “bloqueo” al movimiento, cuando este se pretende ejercer desde su eje de salida; esta característica es vital dado que el panel fotovoltaico debe ubicarse en una posición angular y debe permanecer ahí hasta cuando se realice el siguiente ajuste posicional. Con la

ausencia de este tipo de reducción sería necesario aplicar una excitación continua en los actuadores para conservar una posición. La mecánica de este tipo de reductores se muestra en la Figura 19.

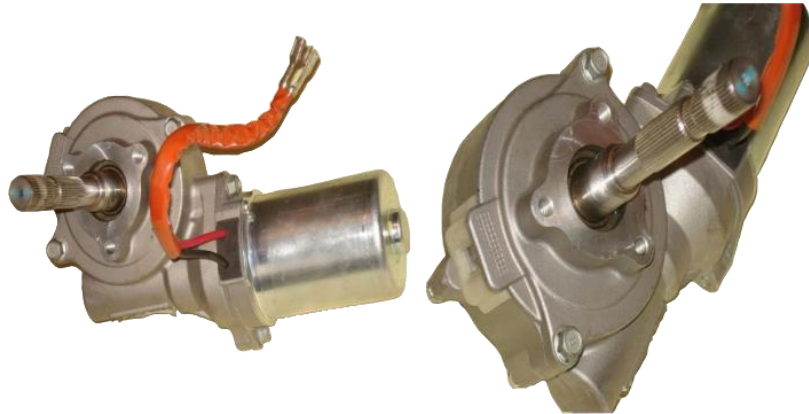
Figura 19. Mecánica de reductores tipo sinfín corona.



Teniendo en cuenta que la potencia consumida en los sistemas de seguimiento solar depende directamente de la velocidad de los actuadores y que estos tienen una velocidad nominal de 2400 rpm a 24 V, se hace necesaria una relación de reducción de al menos 4800:1 para obtener una velocidad máxima de 0,5 rpm. Para cumplir con este requerimiento se seleccionaron dos reductores cuyas referencias y especificaciones se detallan a continuación:

Reductor de velocidad 16:1 (módulo 563001e500). El módulo 563001e500 es utilizado por la industria automotriz (Ford, Hyundai, Mitsubishi) como columna de direcciones electrónicamente asistidas (EPS). Este posee una corona a base de teflón y un tornillo que normalmente es accionado por un motor de 12 VDC a 1600 rpm, el cual para su propósito consume una corriente promedio de 13 A, por lo cual para nuestra aplicación es solo de utilidad la caja reductora, la cual posee una relación de transformación de 16:1, este elemento se puede observar en la Figura 20.

Figura 20. Reductor de velocidad 16:1.



Fuente: Imagen tomada de [27].

Reductor de velocidad con relación 30:1

La caja reductora seleccionada (Figura 18), es una caja Bonfiglioli Riduttori tipo MVF 27/N con relación 30:1, de eje de salida hueco y piñones de bronce.

Figura 21. Reductor de velocidad 30:1



Fuente: Imagen tomada de [28].

Reductor de velocidad adicional. Como se mencionó, para el movimiento acimutal se hace necesario el uso de un reductor adicional debido al daño de la caja reductora original acoplada al servo-motor. Para reemplazarla se seleccionó y acopló a este actuador una caja reductora HFC-775 (Figura 22) con relación de transformación de 100:1.

Figura 22. Reductor de velocidad reemplazo.



Fuente: Imagen tomada de [29].

Después de acoplar el módulo 563001e500 con la caja reductora MVF 27/N y sus servo-motorreductores, para cada uno de los grados de libertad, se puede determinar la relación de reducción total como se muestra en las Ecuaciones 12 y 13:

$$\text{Reduccion total acimut} = \frac{1}{100} * \frac{1}{30} * \frac{1}{16} = \frac{1}{48000} \quad (12)$$

$$\text{Reduccion total altura solar} = \frac{1}{25} * \frac{1}{30} * \frac{1}{16} = \frac{1}{12000} \quad (13)$$

De las ecuaciones 12 y 13 se puede estimar que las velocidades de salida son inferiores a 0,05 rpm y 0,2 rpm para los movimientos de acimut y de altura solar respectivamente.

2.4.5 Transmisión al eje base de soporte del panel FV. Dada la necesidad de realizar la transmisión del movimiento desde el motorreductor de altura solar al soporte del panel se hace necesario el diseño de un mecanismo de transmisión. Se contempló el uso de un sistema de poleas dentadas y un mecanismo cadena-piñon con relación de transmisión 1:1; finalmente, se seleccionó la segunda opción dado que estos mecanismos tienen una alta vida útil y son económicamente accesibles. Este sistema requirió de una base para soportar los rodamientos, y

estos a su vez el eje que soportara e inclinara el panel como se observa en la Figura 23.

Figura 23. Transmisión de movimiento al soporte.

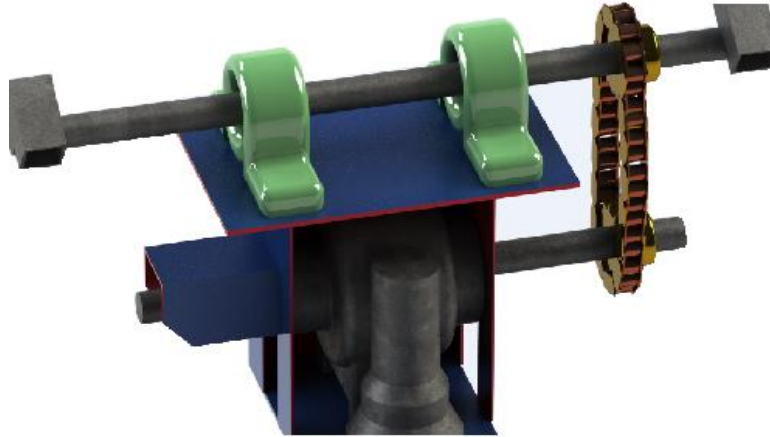
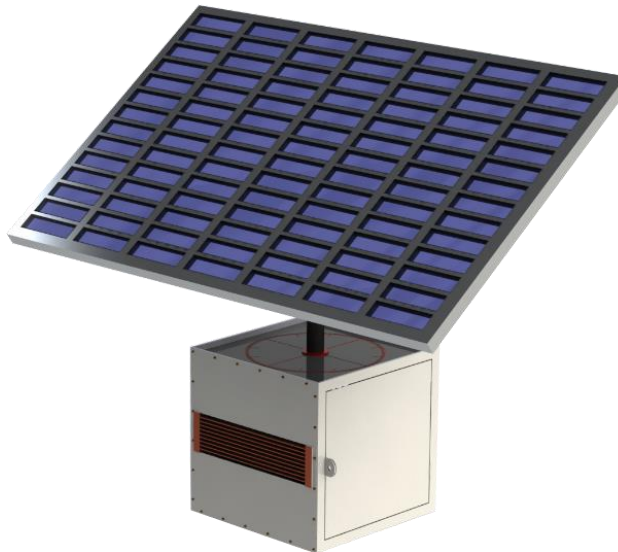


Figura 24. Seguidor solar ubicado al norte (Esquema realizado en SolidWorks).



2.5 CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD

La unidad experimental de seguimiento solar fue construida en varios talleres de metalmecánica de la ciudad de Bucaramanga y en el taller de la Escuela de Diseño Industrial de la Universidad Industrial de Santander. La fase inicial de construcción consistió en la fabricación de acoples en bronce y acero inoxidable que permitieran la correcta unión y transmisión de movimientos entre los actuadores y las cajas reductoras seleccionadas.

Posteriormente se realizaron los cortes y la soldadura de acero estructural en L para la construcción del soporte del panel y el modulo base. Para el modulo base se recortaron de 4 platinas de acero (4 mm de espesor), con el objetivo de proteger el interior del módulo de la intemperie; a dos de estas platinas (vistas laterales) se les realizaron cortes (celosías) para permitir el flujo de aire dentro de la caja.

Para transmitir el movimiento desde el servo-motorreductor de altura solar al soporte del panel se construyó una base con platinas de acero (7 mm de espesor), a la cual se atornillaron dos rodamientos que brindan rotación al eje, el cual fue fresado en sus puntas para permitir que el soporte del panel descansa sobre él. Entre este eje y el eje de salida del motorreductor de altura solar se acoplo un sistema de transmisión cadena-piñon con relación 1:1.

Finalmente se realizó un proceso de lijado, para remover corrosión y suciedades, se aplicaron dos capas de pintura anticorrosiva y dos de pintura negra.

Las dimensiones de la unidad ensamblada (Figura 25) se encuentran en el Anexo B.

Figura 25. Seguidor solar ensamblado.



3. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

Este capítulo expone el diseño y selección de componentes para la implementación del sistema electrónico, tanto del módulo de control, como del módulo de potencia, tomando como base las características de los actuadores seleccionados, los fines experimentales de la unidad de seguimiento solar y el lugar de instalación. Se revisa la estrategia de control usada por el sistema de seguimiento solar en modo automático, así como la integración del software y el hardware seleccionado.

3.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL

3.1.1 Selección del hardware de procesamiento. Para realizar el control de posición de un sistema de seguimiento solar, existe un sinnúmero de opciones entre las cuales se destacan los PLCs, FPGAs y plataformas de desarrollo basadas en microcontroladores o microprocesadores.

Dado que esta unidad es experimental y su diseño está enfocado a fines pedagógicos resulta útil seleccionar y adquirir un hardware con alta capacidad de procesamiento, memoria, flexibilidad en el uso de lenguajes de programación, soporte para distintos protocolos de comunicación, en la cual sea posible desarrollar una interfaz amigable para el usuario final y que brinde un fácil acceso a los puertos analógicos y digitales.

A continuación, se mostrarán las opciones de hardware preseleccionado para realizar la ejecución del software de procesamiento:

Alternativa 1 (PLC Siemens S7-1200 – CPU 1214C). Es un controlador lógico programable muy utilizado en la industria para realizar tareas de automatización y control. La CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, ranura para *memory card*, circuitos de entrada y salida en una carcasa compacta (la cual brinda resistencia a condiciones propias de la industria y el trabajo de campo), un puerto para la comunicación en una red PROFINET, entre otros. Además, es posible ampliar las prestaciones básicas de la CPU instalando módulos de señales y de comunicación adicionales [38].

Figura 26. PLC Siemens Simatic S7–1200.



Fuente: Imagen tomada de [38].

Tabla 9. Datos técnicos del PLC Simatic S7–1200 CPU 1214C.

| Datos técnicos de la CPU 1214C DC/DC/DC | | | |
|---|--------------------------|--|--------------------|
| Característica | Descripción | Característica | Descripción |
| Dimensiones [mm] | 110 x 100 x 75 | Entradas de captura de impulsos | 14 |
| Peso [g] | 415 | Precisión del reloj en tiempo real [s/mes] | +/- 60 |
| Disipación de potencia [W] | 12 | Respaldo del reloj en tiempo real [días] | 10 |
| Memoria de usuario | 50KB | Velocidad de ejecución booleana | 0,1 µs/instrucción |
| E/S digitales | 14 entradas / 10 salidas | Tipo comunicación | Ethernet |
| E/S analógicas | 2 entradas | Transferencia de datos [Mb/s] | 10/100 |
| Contadores rápidos | 6 | Salida fuente de alimentación [VDC] | 20,4 – 28,8 |
| Salidas de impulsos | 2 | Costo [COP] | 1'400.000 |

Alternativa 2 (Raspberry Pi 3 Modelo B). Es un ordenador de placa simple (*SBC*^{*}) basado en un microprocesador *ARM*^{*} Broadcom BCM2837, su sistema

^{*} Del inglés Single Board Computer

^{*} Del inglés Advanced RISC Machine

operativo (SO) oficial es una versión adaptada de Debian basado en GNU/Linux denominado Raspbian pero permite la instalación de otros sistemas operativos como Ubuntu y Windows 10 IOT [32].

Figura 27. Tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 Modelo B.



Fuente: Imagen tomada de [32].

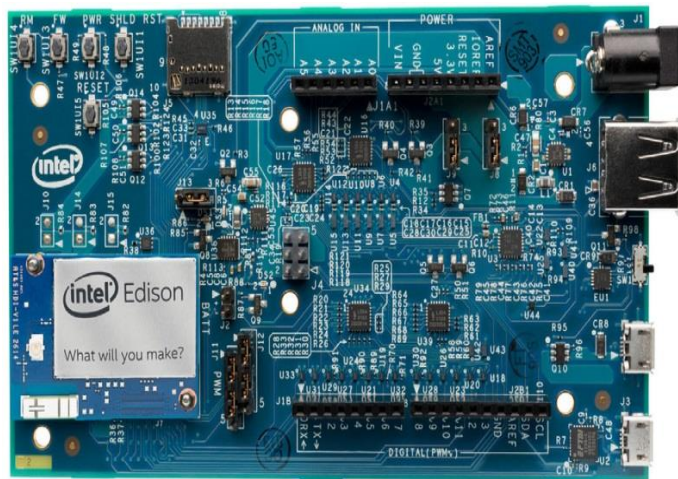
Tabla 10. Datos técnicos de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3.

| Característica | Descripción |
|----------------------------|--|
| Procesador | Broadcom BCM2837 |
| CPU Core | Quadcore ARM Cortex-A53,64Bit |
| Velocidad de reloj | 1.2 GHz |
| Ram | 1 GB |
| GPU | 400 MHz VideoCore IV |
| Conectividad (Cableada) | 1 x 10 / 100 Ethernet (RJ45 Port) |
| Conectividad (Inalámbrica) | 802.11n wireless LAN (WiFi), Bluetooth 4.1 |
| Puertos USB | 4 x USB 2.0 |
| GPIOs | 2 x 20 Pin Header |
| Interfaz de Cámara | 15-pin MIPI |
| Interfaz de Display | DSI 15 Pin / HDMI Out / Composite RCA |
| Interfaz de audio | 3.5 mm, HDMI |
| Almacenamiento | 32 GB MicroSD |
| Consumo energético | 800 mA, (4.0 W) |
| Costo [COP] | 250.000 |

Alternativa 3 (Intel Edison). La plataforma de desarrollo Intel Edison es un sistema SoC*, con la capacidad de realizar funciones propias de una computadora, es popular debido a su tamaño reducido, bajo consumo de energía, velocidad de procesamiento, durabilidad y diseño simplificado. El módulo Intel Edison utiliza un Intel Atom SoC de 22 nm, incluye una CPU Intel dual core a 500 MHz y un microcontrolador Intel Quark de 32 bits a 100 MHz, admite 40 GPIO e incluye 1 GB de LPDDR3*, 4 GB de EMMC*, WiFi Dual-band (2.45 and 5 GHz) y Bluetooth 4.0.

El sistema operativo (SO) oficial es Yocto basado en GNU/Linux, sobre el cual se pueden ejecutar algoritmos descritos en lenguajes de programación de alto nivel como Python, C/C++. Adicionalmente Intel brinda soporte en herramientas como eclipse e Intel XDK, en esta última es posible usar node.js y HTML5 para el diseño de aplicativos web y móviles [34].

Figura 28. Tarjeta de desarrollo Intel Edison + Board Arduino.



Fuente: Imagen tomada de [34].

* Del inglés System on a Chip.
* Del inglés Low Power double data rate.
* Del inglés embedded multimedia card.

Tabla 11. Datos técnicos de la tarjeta de desarrollo Intel Edison.

| Característica | Descripción |
|----------------------------|---|
| Procesador | Dual-core Atom processor 32 bit; 100MHz Quark MCU |
| Velocidad de reloj | 500 MHz |
| Ram | 1 GB |
| Conectividad (Inalámbrica) | 802.11n wireless LAN (WiFi), Bluetooth 4.0 |
| Puertos USB | 1 x USB 2.0 |
| GPIOs | 70 pins on 0.4mm mezzanine header |
| Interfaces | SPI, UART, I2C, PWM |
| Almacenamiento | 4 GB eMMC |
| Consumo energético | 3.3V - 4.5V @ <1W |
| Costo [COP] | 450.000 |

Justificación de la selección de tarjeta de desarrollo

De las alternativas preseleccionadas el hardware idóneo para la unidad experimental de seguimiento solar es el PLC S7-1200, ya que está diseñado para este tipo de aplicaciones. Este PLC está disponible en el mercado local a un precio de aproximadamente \$1'400.000 COP, a nivel industrial es considerado de bajo costo, pero dado el bajo presupuesto con el que se cuenta, el precio es una limitante para su implementación.

Por lo anterior y considerando que las plataformas de desarrollo Raspberry Pi 3 e Intel Edison, están en capacidad de ejecutar un sistema operativo embebido que permita la consulta continua de datos en servidores, convertirse en un servidor web, la ejecución simultánea de algoritmos o tareas, entre otros; la selección del hardware se limita a estas dos alternativas.

Dado que las alternativas 2 y 3 tienen muchas similitudes se construye una figura de mérito con los parámetros costo y consumo energético, donde finalmente predomina la tarjeta de desarrollo Intel Edison por su bajo consumo energético,

porque cumple con los requisitos de procesamiento y comunicación previamente establecidos y por la familiaridad y conocimiento de los autores con esta plataforma de desarrollo.

3.1.2 Elementos de sensado. Para determinar la posición angular en la que se encuentra la estructura se usan dos potenciómetros lineales de $10\text{ k}\Omega \pm 5\%$, para el movimiento de altura solar se seleccionó el potenciómetro cerámico-metálico (cermet) BOURNS 3852, una vuelta, 2 W, y rango de excursión mecánico de $280\pm 5^\circ$, características suficientes para sensar el ángulo de altura solar.

Figura 29. Potenciómetro lineal BOURNS 3852.



Fuente: Imagen tomada de [37].

Para determinar la posición angular acimutal de la unidad experimental de seguimiento solar, se seleccionó un potenciómetro metálico (wirewound) BOURNS 3540, diez vueltas, 2 W, y rango de excursión mecánico de $3600\pm 10^\circ$.

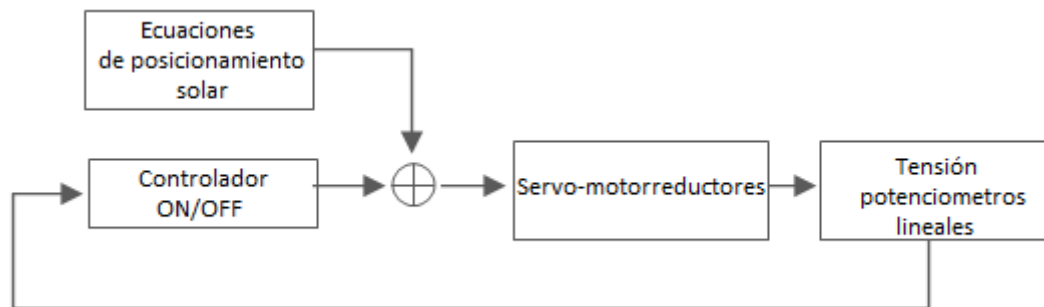
Figura 30. Potenciómetro lineal de BOURNS 3540.



Fuente: Imagen tomada de [37].

basado en ecuaciones de posicionamiento solar, las variables de entrada de estas ecuaciones son: fecha, hora, zona horaria, latitud y longitud del lugar de instalación; a partir de esto se estima la posición aparente del sol en términos de acimut y altura solar y se efectúa cada intervalo de tiempo Δt un reajuste en la posición si este es necesario y el desplazamiento no está restringido por el rango de excursión de cada uno de los grados de libertad. El diagrama de bloques de este sistema de control se describe en la Figura 32.

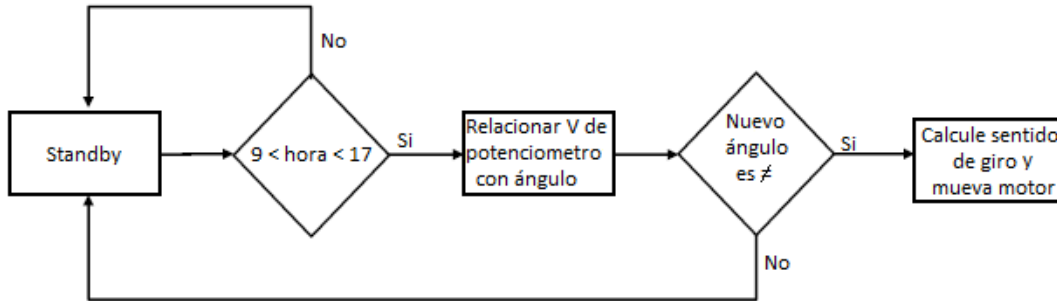
Figura 32. Sistema de control de seguidor solar en lazo abierto.



Dado de que no existe realimentación de la variable de interés (radiación solar directa), el sistema puede reducirse a un sistema de control de posición angular en lazo cerrado, teniendo en cuenta que existe realimentación a través de la relación voltaje-ángulo establecida por los potenciómetros lineales acoplados al eje de salida de cada servo-motorreductor. Para este sistema se consideran despreciables perturbaciones producto del viento o de terceros ya que la alta relación de reducción otorga bloqueo mecánico en cada uno de los ejes.

El principio operacional de cada uno de los grados de libertad ejecutado cada intervalo de tiempo Δt se describe en la Figura 33.

Figura 33. Principio operacional de seguidor solar en lazo abierto.

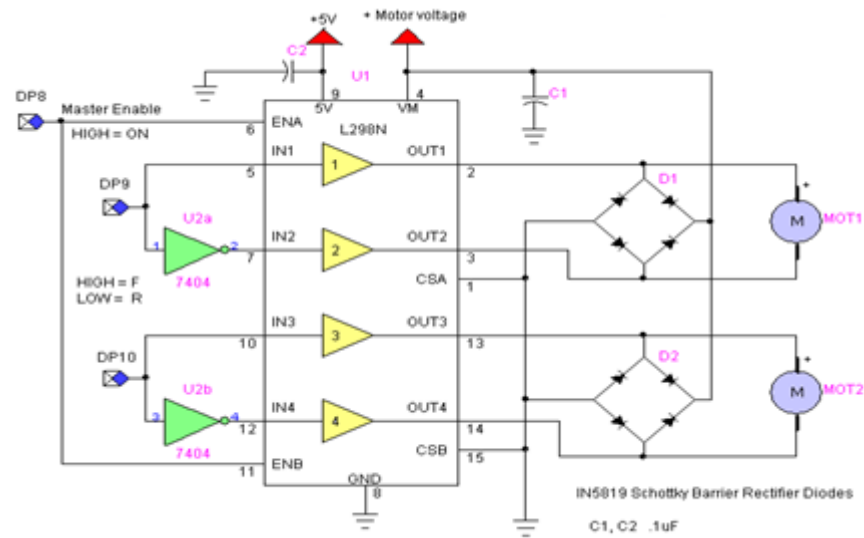


3.3 DISEÑO DEL MÓDULO DE POTENCIA

Dado que el consumo de potencia por parte de los actuadores es superior al que puede proporcionar la tarjeta de desarrollo, se hace necesario el diseño y selección de un sistema que permita suministrar la potencia eléctrica y controlar el sentido de giro de los actuadores, un circuito muy utilizado para este propósito es el denominado puente H. Este circuito debe ser capaz de suministrar picos de corriente de 1,7 A para suplir la potencia requerida por los actuadores en el arranque, luego de esto requieren una corriente constante de 350-500 mA.

Dados los requerimientos mencionados anteriormente se seleccionó el circuito integrado L298N, el cual cuenta con dos canales lo que lo hace ideal dado que es el número de actuadores que se desean controlar, soporta una operación continua de 2 A por canal, picos no repetitivos de corriente de hasta 3 A y 50 V de alimentación (Anexo C), el diagrama del circuito de potencia se muestra en la Figura 34.

Figura 34. Diagrama del módulo de potencia.

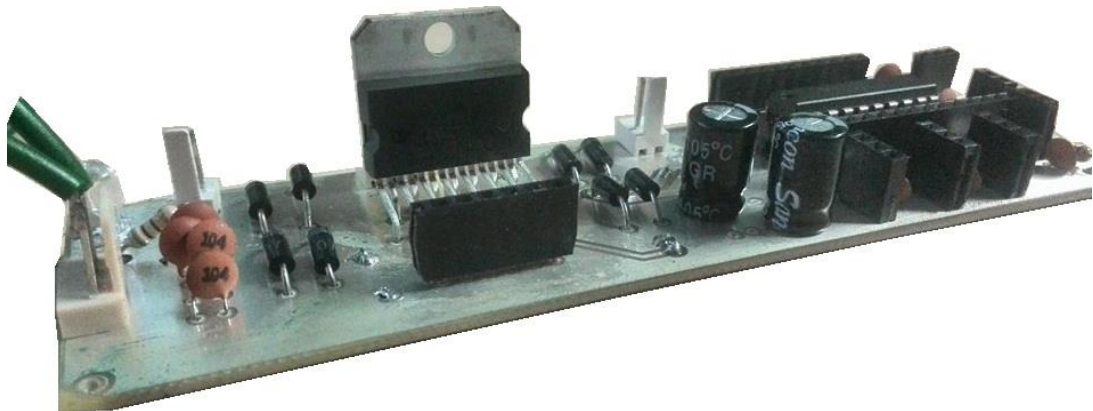


Fuente: Imagen tomada de [35].

3.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIRCUITO IMPRESO

Con la necesidad de implementar los circuitos de las Figuras 31 y 34 se diseña a través de la herramienta Kicad un circuito impreso. Los resultados de este diseño y construcción se muestran en la Figura 35 y en el Anexo E.

Figura 35. Resultado diseño circuito impreso



3.5 CARACTERIZACIÓN DE MOVIMIENTOS

Después de acoplar cada uno de los potenciómetros lineales en el eje de salida de los motorreductores, estos son alimentados con un voltaje regulado de 5 V y se procede a realizar tomas de datos que permitan establecer una relación lineal entre la tensión medida en cada uno de los potenciómetros y la posición angular en cada uno de los grados de libertad

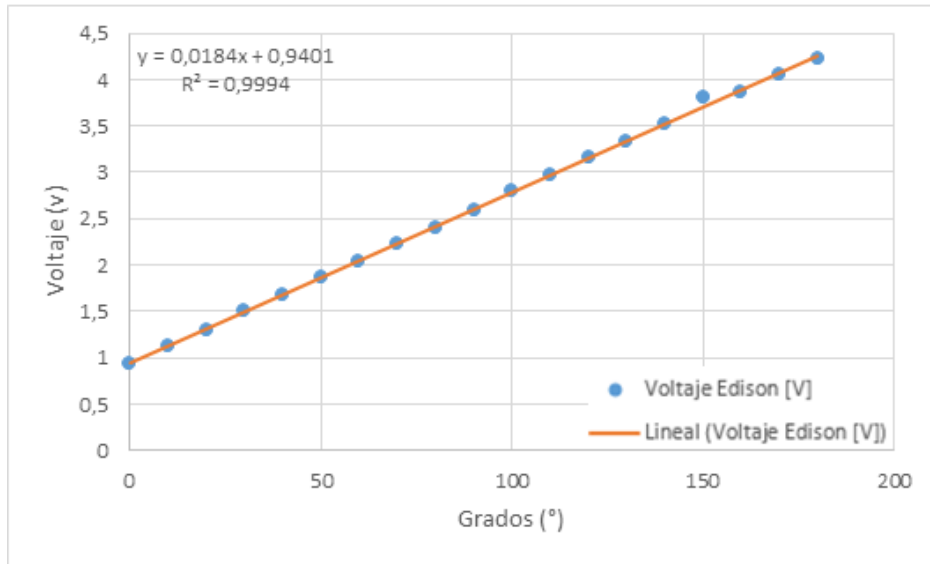
3.5.1 Altura solar (inclinación). La caracterización se realizó por medio del ADC y la tarjeta de desarrollo, relacionando la tensión del potenciómetro con la altura solar dada en grados. En la Tabla 12 se pueden observar los resultados de esta caracterización.

Tabla 12. Caracterización del potenciómetro lineal altura solar.

| Grados [°] | Voltaje Edison [V] | Grados [°] | Voltaje Edison [V] |
|------------|--------------------|------------|--------------------|
| 0 | 0,94 | 90 | 2,59 |
| 10 | 1,12 | 100 | 2,8 |
| 20 | 1,3 | 110 | 2,98 |
| 30 | 1,5 | 120 | 3,16 |
| 40 | 1,68 | 130 | 3,34 |
| 50 | 1,86 | 140 | 3,52 |
| 60 | 2,04 | 150 | 3,8 |
| 70 | 2,23 | 160 | 3,87 |
| 80 | 2,4 | 170 | 4,05 |
| 90 | 2,59 | 180 | 4,22 |

En la Figura 36 se pueden observar los datos de tensión medida en el potenciómetro Lineal encargado del movimiento de altura solar.

Figura 36. Linealización de los resultados del potenciómetro lineal de altura solar.



Al realizar una regresión lineal para determinar la ecuación que rige el comportamiento del potenciómetro se obtiene la tensión en función de los grados tal como se muestra en la Ecuación 14.

$$V = 0,0184 \alpha + 0,9401 \quad (14)$$

$$R^2 = 0,9994$$

Donde “V” es la tensión medida y “α” la altura solar en grados del potenciómetro y R^2 corresponde al coeficiente de linealidad.

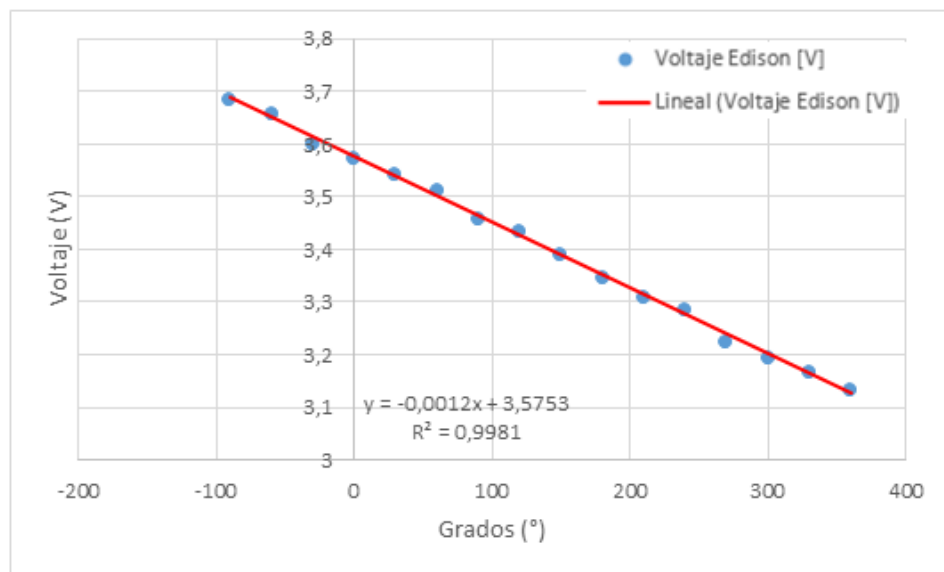
3.5.2 Acimut (orientación). Al igual que el potenciómetro utilizado en el movimiento de altura solar, su caracterización se llevó a cabo por medio del ADC de la tarjeta de desarrollo comparando la tensión sensada con el acimut solar en grados, datos que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Caracterización del potenciómetro lineal acimut solar.

| Ángulo [°] | Voltaje Edison [V] | Ángulo [°] | Voltaje Edison [V] |
|------------|--------------------|------------|--------------------|
| -90 | 3,683 | 150 | 3,386 |
| -60 | 3,646 | 180 | 3,346 |
| -30 | 3,608 | 210 | 3,309 |
| 0 | 3,577 | 240 | 3,271 |
| 30 | 3,532 | 270 | 3,225 |
| 60 | 3,493 | 300 | 3,1943 |
| 90 | 3,457 | 330 | 3,156 |
| 120 | 3,424 | 360 | 3,113 |

En la Figura 37 se pueden observar los datos de tensión medida en el potenciómetro Lineal encargado del movimiento de acimut solar.

Figura 37. Linealización de los resultados del potenciómetro lineal de acimut solar.



Una vez consignados estos datos se procede a determinar una ecuación que identifique el comportamiento de este mecanismo (Ecuación 15).

$$V = - 0,0012 \beta + 3,5753 \quad (15)$$
$$R^2 = 0,9981$$

Donde “V” corresponde a la tensión medida y “β” al acimut solar en grados del potenciómetro y R^2 es el coeficiente de linealidad.

3.6 SOFTWARE DE PROCESAMIENTO

Con la implementación del hardware para el módulo de control y potencia, se da paso al desarrollo del software a integrar, el cual se basa en los dos modos de funcionamiento requeridos, el modo de seguimiento estático, y el modo de seguimiento automático. Para este último se desarrolla un algoritmo haciendo uso del lenguaje de programación Python, este algoritmo se basa en las ecuaciones de posicionamiento solar antes mencionadas, estas ecuaciones se enuncian en el Anexo F.

El algoritmo de posicionamiento solar estima la posición del sol (altura solar y acimut solar) y genera un archivo de texto con esta información, el cual es almacenado en una memoria micro SD de la tarjeta Intel Edison.

Una vez se tiene el archivo de texto con los datos de posicionamiento calculados por el algoritmo o suministrados por el usuario final a través del modo de seguimiento estático, se desarrolla e implementa un algoritmo que permite determinar el sentido de giro en el cual se realizara el reajuste de posición y generar las señales que controlan el puente H y por ende los actuadores; mediante el monitor serial se muestran resultados en tiempo real del posicionamiento del panel.

El algoritmo brinda al usuario final dos opciones, la primera con la instrucción "INICIO" comenzará el seguimiento automático, y mediante el formato de inclusión de datos de posicionamiento estático "AT(°altura)BT(°acimut)" comenzará con el modo de seguimiento estático. Este formato funciona de la siguiente manera:

Una vez cargado y ejecutado el algoritmo (se explica con mayor detalle en el Anexo G), se mostrará el monitor serial de Arduino donde se puede aplicar cualquiera de los siguientes casos:

Caso1: La palabra "Inicio" y se corre, entonces comenzará con el modo de seguimiento automático.

Caso2: "AT "grados altura solar" BT "grados acimut"", por ejemplo: Suponiendo que el usuario desee ubicar el panel a 45° altura solar y 90° acimut, entonces lo que deberá escribir será: "AT45BT90" y seleccionar la opción correr, seguido de esto el panel se posicionará en el punto establecido.

El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en el Anexo I.

4. PUESTA EN MARCHA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se realiza un resumen de las pruebas de funcionamiento realizadas a la unidad experimental de seguimiento solar, para garantizar el correcto posicionamiento, tanto en el movimiento de acimut como en el de elevación y evaluar la resistencia de la unidad en funcionamiento a las condiciones ambientales propias del lugar de instalación.

4.1 ESPECIFICACIONES DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se realizaron en la ciudad de Bucaramanga, más exactamente en la cubierta verde (nivel 5) del edificio Eléctrica I de la Universidad Industrial de Santander ($7^{\circ}14'$ latitud norte y $73^{\circ}12'$ longitud Oeste), estas se llevaron a cabo en su mayoría entre 8:00 am a 6:00 pm. Con la ayuda de una brújula se ubicó la estructura de manera tal que la línea norte-sur pase por 0 y 180 grados acimut respectivamente (Figura 38).

Figura 38. Seguidor solar dispuesto para pruebas de campo.



Primeramente, se realizaron pruebas para calibrar cada uno de los movimientos, los cuales son generados por motorreductores de corriente continua y controlados por la tarjeta de desarrollo Intel Edison.

4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Se realizaron dos tipos de pruebas: seguimiento solar mediante el algoritmo de posicionamiento solar y seguimiento estático donde el usuario final indica la inclinación y orientación del panel FV según su interés.

4.2.1 Prueba de seguimiento del sol. Esta prueba se realizó en el mes de Julio; la toma de datos del seguidor solar se programó cada 10 minutos. Como elemento de medida se utilizaron dos graduadores ubicados en cada uno de los movimientos de giro, los mismos que permitieron visualizar la posición en grados del movimiento acimut y altura solar, así mismo se realizó la comparación entre el código implementado, el seguidor solar y la página NOAA para determinar el correcto funcionamiento de la unidad experimental.

Se pueden apreciar en las Tablas 14 y 15 los datos obtenidos en dicha experimentación el día 2 de julio del presente año.

Tabla 14. Resultados en grados acimut y altura solar horas de la mañana.

| Fecha: 2 de Julio | NOAA (°) | Ecuaciones del sol (°) | Seguidor solar (°) Sistema graduador-plomada |
|-------------------|---------------|------------------------|---|
| 9:00 | 64,56 y 44,75 | 64,47 y 44,62 | 65 y 45 |
| 9:10 | 63,76 y 46,99 | 63,78 y 46,94 | 64 y 47 |
| 9:20 | 62,83 y 49,2 | 62,9 y 49,3 | 63 y 42 |
| 9:30 | 61,75 y 51,4 | 61,82 y 51,5 | 62 y 51 |
| 9:40 | 60,5 y 53,57 | 60,5 y 53,4 | 61 y 54 |
| 9:50 | 59,6 y 55,71 | 59,7 y 55,78 | 60 y 56 |
| 10:00 | 57,38 y 57,82 | 57,4 y 57,85 | 57 y 58 |

| Fecha: 2 de Julio | NOAA (°) | Ecuaciones del sol (°) | Seguidor solar (°) Sistema graduador-plomada |
|-------------------|----------------|------------------------|---|
| 10:10 | 55,42 y 59,89 | 55,52 y 59,9 | 56 y 60 |
| 10:20 | 53,13 y 61,9 | 53,17 y 61,9 | 53 y 62 |
| 10:30 | 50,44 y 63,85 | 50,5 y 63,89 | 50 y 64 |
| 10:40 | 47,29 y 65,72 | 47,3 y 65,73 | 47 y 66 |
| 10:50 | 43,58 y 67,49 | 43,6 y 67,52 | 44 y 68 |
| 11:00 | 39,22 y 69,13 | 39,25 y 69,16 | 39 y 69 |
| 11:10 | 34,1 y 70,61 | 34,2 y 70,63 | 34 y 71 |
| 11:20 | 28,15 y 71,89 | 28,18 y 71,9 | 28 y 72 |
| 11:30 | 21,36 y 72,93 | 21,39 y 72,98 | 21 y 73 |
| 11:40 | 13,78 y 73,69 | 13,82 y 73,72 | 13 y 73 |
| 11:50 | 5,61 y 74,1 | 5,67 y 74,2 | 6 y 74 |
| 12:00 | 357,19 y 74,17 | 357,13 y 74,2 | 357 y 74 |

Tabla 15. Resultados en grados acimut y altura solar horas de la tarde.

| Fecha: 2 de Julio | NOAA (°) | Ecuaciones del sol (°) | Seguidor solar (°) Sistema graduados-plomada |
|-------------------|----------------|------------------------|---|
| 12:10 | 348,9 y 73,87 | 348,92 y 73,9 | 349 y 74 |
| 12:20 | 341,09 y 73,22 | 341,1 y 73,25 | 341 y 73 |
| 12:30 | 334,02 y 72,27 | 334,06 y 72,3 | 334 y 72 |
| 12:40 | 327,78 y 71,07 | 327,84 y 71,1 | 328 y 71 |
| 12:50 | 322,39 y 69,65 | 322,4 y 69,65 | 322 y 70 |
| 13:00 | 317,79 y 68,05 | 317,8 y 68,12 | 317 y 68 |
| 13:10 | 313,87 y 66,33 | 313,88 y 66,3 | 314 y 66 |
| 13:20 | 310,54 y 64,49 | 310,5 y 64,34 | 309 y 64 |
| 13:30 | 307,7 y 62,56 | 307,8 y 62,6 | 308 y 63 |
| 13:40 | 305,29 y 60,57 | 305,31 y 60,6 | 305 y 61 |
| 13:50 | 303,22 y 58,52 | 303,27 y 58,5 | 303 y 59 |
| 14:00 | 301,45 y 56,43 | 301,67 y 56,8 | 300 y 56 |
| 14:10 | 299,93 y 54,29 | 299,96 y 54,3 | 299 y 54 |
| 14:20 | 298,62 y 52,13 | 298,63 y 52,1 | 297 y 52 |
| 14:30 | 297,49 y 49,94 | 297,67 y 49,3 | 296 y 48 |
| 14:40 | 296,51 y 47,73 | 296,9 y 48,1 | 295 y 48 |
| 14:50 | 295,67 y 45,51 | 296,12 y 45,8 | 295 y 46 |
| 15:00 | 294,94 y 43,27 | 294,87 y 43,4 | 294 y 43 |

Los resultados obtenidos muestran un error porcentual inferior al 1%, en este caso, en cada una de las medidas tomadas se tiene como patrón de medida los datos arrojados por el simulador de la página NOAA; así mismo se puede apreciar que en el movimiento de altura solar existe una decadencia a partir de las 12:00 pm; y en el movimiento acimut, se aprecian variaciones cada vez más cortas sobre las horas de la tarde.

4.2.2 Prueba de posicionamiento a petición del usuario. Las pruebas se realizaron en el mes de julio, comparando la posición de la unidad experimental con la posición requerida por el usuario. Los datos obtenidos durante las pruebas se muestran en grados y están resumidos en la Tabla 16.

Tabla 16. Pruebas de funcionamiento del posicionamiento del panel FV a petición del usuario en grados acimut y altura solar respectivamente.

| Posición solicitada acimut y altura (°) | Posición Unidad experimental (°) | Error porcentual en acimut Solar (%) | Error porcentual en altura solar (%) |
|--|--|---|--|
| 0 y 90 | 0 y 90 | 0 | 0 |
| 311 y 82 | 310 y 82 | 0,324 | 0 |
| 305 y 74 | 304 y 74 | 0,327 | 0 |
| 302 y 65 | 302 y 66 | 0 | 1,538 |
| 296 y 53 | 296 y 53 | 0 | 0 |
| 55 y 45 | 56 y 45 | 1,818 | 0 |
| 92 y 39 | 94 y 39 | 2,174 | 0 |
| 334 y 104 | 333 y 103 | 0,299 | 0,9615 |
| 309 y 112 | 309 y 111 | 0 | 0,8928 |
| 272 y 120 | 272 y 120 | 0 | 0 |
| 236 y 116 | 235 y 118 | 0,4237 | 0,7633 |
| 230 y 106 | 229 y 107 | 0,4347 | 0,944 |
| 183 y 104 | 183 y 104 | 0 | 0 |
| 162 y 96 | 162 y 96 | 0 | 0 |
| 135 y 83 | 135 y 83 | 0 | 0 |
| 104 y 76 | 104 y 76 | 0 | 0 |

| Posición solicitada acimut y altura (°) | Posición Unidad experimental | Error porcentual en acimut Solar | Error porcentual en altura solar |
|--|---------------------------------|--|-------------------------------------|
| 98 y 69 | 99 y 69 | 1,01 | 0 |
| 44 y 54 | 45 y 54 | 2,2727 | 0 |
| 23 y 42 | 22 y 42 | 4,3478 | 0 |
| 0 y 35 | 0 y 35 | 0 | 0 |
| 315 y 102 | 316 y 103 | 0,3174 | 0,984 |
| 333 y 115 | 333 y 114 | 0 | 0.869 |
| 342 y 96 | 341 y 96 | 0,2923 | 0 |
| 0 y 90 | 0 y 90 | 0 | 0 |

Se puede concluir que el error porcentual en promedio del movimiento de altura solar es de 0,2896%, mientras que el movimiento acimut presenta un porcentaje de error promedio, de 0,5850%, siendo mayor al movimiento de altura solar, pese a ello cumple con los objetivos del proyecto.

4.2.3 Pruebas de consumo de potencia. Con la estructura debidamente instalada y en funcionamiento se realizaron pruebas de consumo de potencia de nuestro sistema, las cuales se dividieron en dos módulos: módulo de control y módulo de potencia (actuadores acimut y altura solar) los resultados se detallan a continuación:

Módulo de control

Este módulo funciona con una fuente de tensión de 5 V, la cual alimenta la tarjeta de control Intel Edison, potenciómetros, circuito ADC y relés. La potencia consumida medida para la tarjeta de control Intel Edison, operando con un sistema operativo Linux Yocto, con el wifi activado y sin él se muestra en la Tabla 17 y la de los potenciómetros en la Tabla 18.

Tabla 17. Consumo de potencia eléctrica instantánea de la tarjeta de desarrollo.

| Modo de operación | Voltaje [V] | Corriente [mA] | Potencia [mW] |
|-------------------|-------------|----------------|---------------|
| Sin Wifi | 5,08 | 110 | 558,8 |
| Con Wifi | 5,02 | 185 | 928,7 |

Tabla 18. Consumo de potencia eléctrica instantánea de los potenciómetros.

| Potenciómetros | Voltaje [V] | Corriente [mA] | Potencia [mW] |
|------------------------------|-------------|----------------|---------------|
| Altura solar (1 K Ω) | 4,96 | 4,7 | 23,3 |
| Acimut (10 K Ω) | 5,01 | 0,48 | 2,4 |

La corriente consumida por el circuito de relés y ADC a 5,1 V es de 160 mA lo cual genera un consumo de potencia de 816 mW.

El módulo de control operando en conjunto y con el wifi activado tiene un consumo de potencia de 360 mA a 5,1 V para un total de 1,836 W, como este módulo opera las 24 horas del día, presenta un consumo de potencia de 44 Wh por día de funcionamiento.

Módulo de potencia

Este módulo integra los actuadores que realizan el movimiento de acimut y altura solar, para este módulo se asumió un movimiento constante de 360° en acimut y 120° de altura solar, trayectorias que representan aproximadamente el recorrido diario de un día de seguimiento solar en modo automático así:

Tabla 19. Tiempo de operación por movimiento.

| Movimiento | Velocidad [°/s] | Recorrido [°] | Tiempo [s] |
|--------------|-----------------|---------------|------------|
| Acimut | 0,2826 | 360 | 1274 |
| Altura Solar | 1 | 120 | 120 |

Tabla 20. Consumo de potencia eléctrica instantánea por movimiento.

| Movimiento | Voltaje [V] | Corriente [mA] | Potencia [mW] |
|--------------|-------------|----------------|---------------|
| Acimut | 20,2 | 350 | 7070 |
| Altura Solar | 20,2 | 380 | 7676 |

Tabla 21. Consumo de potencia eléctrica durante un día de operación.

| Movimiento | Potencia [W] | Tiempo [h] | Potencia [Wh/día] |
|--------------|--------------|------------|-------------------|
| Acimut | 7,070 | 0,354 | 2,5 |
| Altura Solar | 7,676 | 0,034 | 0,26 |

Si se consideran 7 horas de funcionamiento con intervalos de tiempo de 15 minutos para cada reajuste de posición se tendrían 56 arranques de motor los cuales tienen picos de corriente de 2,5 A a 20,2 V durante aproximadamente 0,2 segundos cada uno, tendríamos un consumo de 50,5 W durante 11,2 segundos, lo que es aproximadamente 0,16 Wh/día.

Los cálculos anteriores arrojan como resultado que el consumo de potencia diario del sistema de seguimiento en modo automático es en promedio de 46,92 Wh/día, siendo el módulo de control el de más alto consumo por las prestaciones ofrecidas en capacidad de procesamiento, monitorización y control en una unidad con carácter investigativo. La Figura 39 muestra algunas evidencias de las pruebas desarrolladas en el punto de instalación con el panel FV acoplado y en movimiento.

Figura 39. Pruebas en lugar de instalación.



5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

Se logró diseñar, implementar e instalar una unidad experimental de seguimiento solar con dos grados de libertad con el fin de movilizar un panel FV UPSOLAR 250, lo que permitiría captar una mayor cantidad de energía.

A partir de la aplicación de las ecuaciones de posicionamiento solar, se consiguió realizar una estrategia de seguimiento automático que permite posicionar el panel FV perpendicularmente a la mayor radiación solar durante un día, lo cual genera una mayor eficiencia en cuanto a la energía captada por el panel.

Se logró implementar un sistema de seguimiento estático que permite a quien desee entrar en interacción con el seguidor ubicar el panel en una posición determinada en grados acimut y altura solar con el fin de realizar posteriores análisis.

El diseño y construcción de este seguidor se enfocó teniendo en cuenta una perspectiva académica y de investigación cuyos resultados serán de utilidad para posteriores estudios que conlleven a la determinación de la mejor estrategia de seguimiento solar, la mejora porcentual de la eficiencia de este sistema con respecto a estructuras estáticas, así como el desarrollo de investigaciones sobre el comportamiento de paneles fotovoltaicos en un entorno tropical caso Bucaramanga.

5.2 OBSERVACIONES

La unidad experimental de seguimiento solar que se implementó cuenta con algunas observaciones las cuales se establecen a partir de que se da por terminada su elaboración puesta en marcha y pruebas realizadas, estas observaciones son:

Se manejaron tres aspectos predominantes en la selección de los motores y/o motorreductores encargados de generar los dos movimientos, el primero de ellos fue que estos motores tuviesen un bajo consumo de potencia eléctrica en operación, el segundo fue que en condiciones de operación tuviesen el par requerido para garantizar los movimientos y el tercero fue que estos deberían tener un mecanismo de sensado incorporado para controlar su velocidad y de esta manera lograr controlar la posición del panel FV.

En cuanto a este último aspecto, se logró conseguir que los motores contaran con este mecanismo de sensado, el cual resultó más complejo de lo que se esperaba por ser un mecanismo de sensado de señal analógica, debido a esto se requeriría la adecuación de la señal proveniente del mismo mediante un hardware adicional, razón por la que se seleccionó un sistema de sensado más económico que consistió en la implementación de dos potenciómetros lineales acoplados al eje de salida de cada movimiento, los cuales varían su tensión en relación con el movimiento del eje y esta tensión indicará la posición en la que se encontrará finalmente el panel solar.

Tras varios días de operación de seguimiento automático por parte de la unidad, se presentó un daño a nivel electrónico atribuido al dispositivo de manejo de potencia correspondiente al puente H. Este daño se ocasionó debido a que el pico de corriente que para el movimiento de acimut solar se había establecido en 1,7 A, se incrementó a 2,5 A, dicho incremento se debe a variaciones de carga mecánica

a diferentes horas del día, adicionalmente las corrientes de viento durante el tiempo en que el panel FV se encuentra en una posición casi vertical incrementan estas variaciones.

Por esta razón se decide suspender el uso del puente H e implementar un circuito de potencia conformado por 4 relés cuya salida soporta hasta 30 VDC y una corriente de 10 A, lo cual es suficiente para suplir los requerimientos de potencia producidos por el pico de corriente mencionado, adicionalmente se incorpora una etapa de protección conformada por 4 resistencias de 1 k Ω y 4 transistores 2N3904 cada uno acoplado a un relé con el fin de aislar la tarjeta de desarrollo de corrientes inversas que se pueden producir en los relés. El esquema correspondiente a este circuito, así como su conexión con la tarjeta de desarrollo y el ADC externo se muestra en el Anexo G.

Durante el montaje de la unidad de movimiento uno de los actuadores (motorreductor acimut) presentó una avería de tipo mecánico hacia la parte de su reductor, razón por la cual se mantiene el motor, pero dicho reductor tuvo que ser retirado e instalado uno nuevo de características diferentes con respecto a su relación, esto generó un cambio en la velocidad del movimiento inicialmente estipulada.

Inicialmente se implementó un sistema de poleas y correa de caucho con el fin transmitir el movimiento de altura solar desde el eje de salida de este movimiento hacia un eje ubicado de forma paralela, pero este sistema falló debido a que la correa se deslizaba sobre las poleas ante la presencia de un peso semejante al del panel y no se conseguía transmitir el movimiento, por esta razón se decidió cambiar este sistema por uno de piñones y una cadena con una relación 1:1 el cual resultó adecuado para la transmisión del movimiento.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

Al ser una unidad experimental se pensó en que la selección de los elementos podría estar ligeramente sobredimensionada con el fin de aplicar sobre ellos nuevos trabajos con fines de investigación. Desde este punto de vista se establecen algunas ventajas con las que cuenta esta unidad:

La unidad cuenta con la capacidad de movilizar un peso tres veces mayor que el peso para el cual se diseñó, indistintamente del eje de movimiento. Teniendo esto en cuenta, es posible que la estructura en su parte mecánica pueda ser modificada con el fin de adecuar otros mecanismos de sensado de movimiento mecánico, así como sensores que permitan determinar la posición del sol.

El circuito impreso elaborado cuenta con algunas ventajas que permiten adecuar otros tipos de dispositivos como, por ejemplo: posee dos pines que proporcionan 20 V, si se desea acoplar nuevos elementos, también el ADC implementado cuenta con 11 canales adicionales para entradas analógicas, si es que se desean implementar.

La tarjeta de desarrollo seleccionada forma parte fundamental en el desarrollo de nuevas aplicaciones como: es posible desarrollar una interfaz gráfica para el usuario que permita mediante una pantalla táctil o un teclado y un display seleccionar ya sea la posición a la que se desea ubicar el panel o si se desea instaurar el modo automático de seguimiento.

Una vez instalado el panel sobre la unidad es posible desarrollar un sistema que permita leer la captación de la energía eléctrica que está generando el panel FV, así como desarrollar un sistema de monitorización sacándole provecho a la tarjeta de desarrollo y de esta forma crear un aplicativo móvil que permita al usuario llevar un control de este seguimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. RHIF, Ahmed. A position control review for a photovoltaic system: Dual axis Sun Tracker. IETE Technical Review, 2011, vol. 28, no 6, p. 479-485.
- [2]. PERLIN, John. Silicon solar cell turns 50. National Renewable Energy Lab., Golden, CO. (US), 2004.
- [3]. OSMA, German. Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander. s.l. : Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [4]. FERNANDÉZ, Julio. *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. s.l. : Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [5]. MURCIA, H. Rodríguez. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de Ingeniería, 2008, vol. 28, p. 83-89.
- [6]. LOAYZA OCHOA, Frank Roger. Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector Scheffler. 2015
- [7]. SIERRA, F.; CARO, E.; MEJÍA, F. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [8]. LAKEOU, Samuel, et al. Design of a low-cost solar tracking photo-voltaic (PV) module and wind turbine combination system. En 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2006. p. 4-8.
- [9]. ANAYA, Luis y ACOSTA, Fabian. *Caracterización eléctrica de grafeno químicamente reducido (GQR) y evaluación de su potencial aplicación en celdas solares*. s.l. : Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [10]. PLESZ, Balázs; SÁGI, Péter; TIMÁR-HORVÁTH, Veronika. Enhancement of solar panels power generation by the usage of solar tracking. Proceedings of ECOpole, 2009, vol. 3, no 1, p. 15--22.

- [11]. Duffie, Jhon A ; Beckmann, Willian A. (2006) : solar Engineering of thermal processes.
Ed. Jhon Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New JerseyN.
- [12] OSMA, German y ORDOÑEZ, Gabriel. *Análisis técnico para la implementación de seguidores solares en sistemas de generación fotovoltaica en la ciudad de Bucaramanga. s.l. : IEEE, 2011.*
- [13]. MAATALLAH, Taher; EL ALIMI, Souheil; NASSRALLAH, Sassi Ben. Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no 8, p. 4053-4066.
- [14]. LEE, J. F.; RAHIM, Nasrudin Abd. Performance comparison of dual-axis solar tracker vs static solar system in Malaysia. En *Clean Energy and Technology (CEAT)*, 2013 IEEE Conference on. IEEE, 2013. p. 102-107.
- [15] GANESH, N. Jeya, et al. Design and development of a sun tracking mechanism using the direct sma actuation. *Journal of Mechanical Design*, 2011, vol. 133, no 7, p. 075001.
- [16]. PRINSLOO, Gerhardus Johannes. Automatic positioner and control system for a motorized parabolic solar reflector. 2014. Tesis Doctoral. Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering, University of Stellenbosch.
- [17]. AZIZI, Kianoosh; GHAFARI, Ali. Design and Manufacturing of a High-Precision Sun Tracking System Based on Image Processing. *International Journal of Photoenergy*, 2013, vol. 2013.
- [18]. SIDEK, M. H. M., et al. GPS based portable dual-axis solar tracking system using astronomical equation. En *Power and Energy (PECon), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014. p. 245-249.
- [19]. HUANG, Y. J., et al. Solar tracking fuzzy control system design using FPGA. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2009. p. 1-3.
- [20] CLIMATE-DATA.ORG “Datos Climaticos Mundiales,” Disponible en : <http://es.climate-data.org/>.

- [21]** Informacion Aeronautica “Climatologia regimen anual del viento,” Disponible en : <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>.
- [22]** PULIDO, Oscar y MENESES, Marvin. Evaluación de las estrategias de confort visual y térmico establecidas para el edificio de ingeniería eléctrica según lineamientos del sistema de certificación leed a partir de la herramienta Designbuilder. Creación del modelo Virtual,2012.
- [23]** DUAL AXIS “SDE Dual- Axis Positioner,” Disponible en : <http://www.kinematicsmfg.com/products/sde-dual-axis-positioner/>
- [24]** SUMMIT “ Autoloc Linear Actuators LAD12,” Disponible en : <https://www.summitracing.com/int/parts/hfm-lad12/overview/>
- [25]** ACO Solar “ H-fang slewing Drive For Solar Tracker SE9A-61-12R (with motor),” Disponible en : <https://www.acosolar.com/h-fang-slewing-drive-for-solar-tracker-se9a-61-12r-with-motor>
- [26]** TRACKER “ Single Axis Tracker,” Disponible en <http://www.iparu.com/#!/tracker/cyel>
- [27]** Steering system “ MAS_35C-EPS “ Disponible en : http://www.mandochina.com/eng/product/03_steeringsystem_02_01.asp
- [28]** BONGLIFIOLI “ C-A-F-S SERIES,” Disponible en : ://www.bonfiglioli.com/media/products/attachments/BR_CAT_CAFS_STD_ENG_R01_0.pdf
- [29]** Reductor “Europa Total,” Disponible en: www4.total.fr/Europe/Spain
- [30]** PARVALUX “PM50GWS,” Disponible en: <http://www.parvalux.com/dload/ebrochures/pm-catalogue-2009/files/assets/downloads/page0142.pdf>
- [31]** gkx “SERVO – DFS 10G-05” Disponible en : <http://gkx1688.cn.makepolo.com/product/100324447005.html>
- [32].** Raspberry Pi 3 Model B, Disponible en: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seed%20Technology/Raspberry_Pi_3_Model_B_WikiWeb.pdf.

- [33]** UNOCERO “Galileo, interesante tarjeta de desarrollo de Intel,” Disponible en: <https://www.unocero.com/2014/02/25/galileo-interesante-tarjeta-de-desarrollo-de-intel/>
- [34]** Intel Edison Development Platform, Disponible en: https://communities.intel.com/servlet/JiveServlet/downloadBody/23139-102-3-27268/edison_PB_331179-001.pdf.
- [35]** ELEKTRONIK HOBI “ N298N_dual_motor,” Disponible en : Imagen tomada de: http://elektronikhobi.net/l298n-motor-denetleyici-ilkesi-ve-projeleri/l298n_dual_motor/
- [36]** DATASHEETDIR “Automotive Catalog 12_Bit Analog_to_Digital Converters with Serial Control And 11 Analog Input,” Disponible en: <http://www.datasheetdir.com/TLC2543-Q1+12bit-Analog-Digital-Converter>
- [37]** BOURNS, Disponible en: <http://www.mouser.com/ds/2/54/85126-776477.pdf>
- [38]** S71200-MANUAL DEL SISTEMA. Disponible en: <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>
- [39]** EL SOL EN LA ARQUITECTURA – POSICIÓN SOLAR. Disponible en: <http://scsarquitecto.cl/el-sol-en-la-arquitectura-posicion-solar/>

BIBLIOGRAFIA

ACO Solar “ H-fang slewing Drive For Solar Tracker SE9A-61-12R (with motor),” [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: <https://www.acosolar.com/h-fang-slewing-drive-for-solar-tracker-se9a-61-12r-with-motor>

ANAYA, Luis y ACOSTA, Fabian. *Caracterización eléctrica de grafeno químicamente reducido (GQR) y evaluación de su potencial aplicación en celdas solares*. s.l. : Universidad Industrial de Santander, 2014.

AZIZI, Kianoosh; GHAFARI, Ali. Design and Manufacturing of a High-Precision Sun Tracking System Based on Image Processing. *International Journal of Photoenergy*, 2013, vol. 2013.

BONGLIFIOLI “C-A-F-S SERIES,” [en línea] [citado 19 de septiembre de 2016] Disponible en: [//www.bonfiglioli.com/media/products/attachments/BR_CAT_CAFS_STD_ENG_R01_0.pdf](http://www.bonfiglioli.com/media/products/attachments/BR_CAT_CAFS_STD_ENG_R01_0.pdf)

BOURNS, Disponible en: <http://www.mouser.com/ds/2/54/85126-776477.pdf>

CLIMATE-DATA.ORG “Datos Climaticos Mundiales,” Disponible en : <http://es.climate-data.org/>.

DATASHEETDIR “Automotive Catalog 12_Bit Analog_to_Digital Converters with Serial Control And 11 Analog Input,” [en línea] [citado 21 de septiembre de 2016] Disponible en: <http://www.datasheetdir.com/TLC2543-Q1+12bit-Analog-Digital-Converter>

DUAL AXIS “SDE Dual- Axis Positioner,” [en línea] [citado 22 de septiembre de 2016] Disponible en: <http://www.kinematicsmfg.com/products/sde-dual-axis-positioner/>

DUFFIE, JHON A; BECKMANN, WILLIAN A. solar Engineering of thermal processes.2006

ED. JHON WILEY & SONS, Inc. Hoboken, New JerseyN.

EL SOL EN LA ARQUITECTURA – POSICIÓN SOLAR. [en línea] [citado 22 de septiembre de 2016] Disponible en: <http://scsarquitecto.cl/el-sol-en-la-arquitectura-posicion-solar/>

ELEKTRONIK HOBI “ N298N_dual_motor,” [en línea] [citado 19 de septiembre de 2016] Disponible en: http://elektronikhobi.net/l298n-motor-denetleyici-ilkesi-ve-projeleri/l298n_dual_motor/

FERNANDÉZ, Julio. *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. s.l. : Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

GANESH, N. Jeya, et al. Design and development of a sun tracking mechanism using the direct sma actuation. *Journal of Mechanical Design*, 2011, vol. 133, no 7, p. 075001.

GKX “SERVO – DFS 10G-05” [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: <http://gkx1688.cn.makepolo.com/product/100324447005.html>

HUANG, Y. J., et al. Solar tracking fuzzy control system design using FPGA. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2009. p. 1-3.

INFORMACION AERONAUTICA “Climatología regimen anual del viento,” [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>.

INTEL Edison Development Platform, [en línea] [citado 17 de septiembre de 2016] Disponible en: https://communities.intel.com/servlet/JiveServlet/downloadBody/23139-102-3-27268/edison_PB_331179-001.pdf.

LAKEOU, Samuel, et al. Design of a low-cost solar tracking photo-voltaic (PV) module and wind turbine combination system. En 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2006. p. 4-8.

LEE, J. F.; RAHIM, Nasrudin Abd. Performance comparison of dual-axis solar tracker vs static solar system in Malaysia. En Clean Energy and Technology (CEAT), 2013 IEEE Conference on. IEEE, 2013. p. 102-107.

LOAYZA OCHOA, Frank Roger. Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector Scheffler. 2015

MAATALLAH, Taher; EL ALIMI, Souheil; NASSRALLAH, Sassi Ben. Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, vol. 15, no 8, p. 4053-4066.

MURCIA, H. RODRÍGUEZ. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de Ingeniería, 2008, vol. 28, p. 83-89.

OSMA, German y ORDOÑEZ, Gabriel. *Análisis técnico para la implementación de seguidores solares en sistemas de generación fotovoltaica en la ciudad de Bucaramanga. s.l. : IEEE, 2011.*

OSMA, German. Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander. s.l. : Universidad Industrial de Santander, 2011.

PARVALUX “PM50GWS,” [en línea] [citado 21 de septiembre de 2016] Disponible en: <http://www.parvalux.com/dload/ebrochures/pm-catalogue-2009/files/assets/downloads/page0142.pdf>

PERLIN, John. Silicon solar cell turns 50. National Renewable Energy Lab., Golden, CO. (US), 2004.

PLESZ, Balázs; SÁGI, Péter; TIMÁR-HORVÁTH, Veronika. Enhancement of solar panels power generation by the usage of solar tracking. Proceedings of ECOpole, 2009, vol. 3, no 1, p. 15--22.

PRINSLOO, Gerhardus Johannes. Automatic positioner and control system for a motorized parabolic solar reflector. 2014. Tesis Doctoral. Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering, University of Stellenbosch.

PULIDO, Oscar y MENESES, Marvin. Evaluación de las estrategias de confort visual y térmico establecidas para el edificio de ingeniería eléctrica según lineamientos del sistema de certificación leed a partir de la herramienta Designbuilder. Creación del modelo Virtual,2012.

RASPBERRY Pi 3 Model B, [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016] Disponible en: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seed%20Technology/Raspberry_Pi_3_Model_B_WikiWeb.pdf.

REDUCTOR “Europa Total,” [en línea] [citado 23 de septiembre de 2016]
Disponible en: www4.total.fr/Europe/Spain

RHIF, Ahmed. A position control review for a photovoltaic system: Dual axis Sun Tracker. *IETE Technical Review*, 2011, vol. 28, no 6, p. 479-485.

S71200-MANUAL DEL SISTEMA. [en línea] [citado 18 de septiembre de 2016]
Disponible en: <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>

SIDEK, M. H. M., et al. GPS based portable dual-axis solar tracking system using astronomical equation. En *Power and Energy (PECon), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014. p. 245-249.

SIERRA, F.; CARO, E.; MEJÍA, F. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2008.

STEERING SYSTEM “MAS_35C-EPS [en línea] [citado 24 de septiembre de 2016]
Disponible en: http://www.mandochina.com/eng/product/03_steeringssystem_02_01.asp

SUMMIT “Autoloc Linear Actuators LAD12,” [en línea] [citado 25 de septiembre de 2016] Disponible en: <https://www.summitracing.com/int/parts/hfm-lad12/overview/>


TRACKER “Single Axis Tracker,” [en línea] [citado 23 de septiembre de 2016]
Disponible en: <http://www.iparu.com/#!tracker/cyel>

UNOCERO “Galileo, interesante tarjeta de desarrollo de Intel,” [en línea] [citado 27 de septiembre de 2016] Disponible en:

<https://www.unocero.com/2014/02/25/galileo-interesante-tarjeta-de-desarrollo-de-intel/>

ANEXOS


ANEXO A. DATASHEET PANEL UP SOLAR 250



6" Polycrystalline PV module 60 cells

Key features

- High Quality Bill of Materials
- Reinforced Module Warranty
- Universal design (residential, commercial, ground mounted)
- Best seller for its performance/price ratio



Secure Investment

Upsolar provides industry-leading product coverage for all our modules to ensure our customers achieve superior long-term value from their solar installations. In addition to a 10-year product warranty, which covers unanticipated module damage, Upsolar implements a 25-year performance guarantee known as the Reinforced Module Warranty.


Whereas traditional warranties offer only two trigger points over 25 years, the Reinforced Module Warranty features six trigger points at years 3, 7, 12, 16, 20 and 25. Upsolar also maintains relationships with third-party insurance providers to offer an additional layer of protection for interested parties.

Product guarantee for 10 years
Performance guarantee for 25 years



NOTE:

- STC: Irradiance 1000 W/m²; Module temperature 25°C, AM=1.5
- Nominal Operating Cell Temperature below data is only for reference
- Deviation of V_m (V), I_m (A), V_{oc} (V) and I_{sc} (A) of ±10%



Electrical Characteristics

| MODEL | UP-M235P | UP-M240P | UP-M245P | UP-M250P | UP-M255P |
|---|----------------|----------|----------|----------|----------|
| Max Power P _m (Wp) | 235 | 240 | 245 | 250 | 255 |
| Max Power Voltage V _m (V) | 30.0 | 30.2 | 30.4 | 30.6 | 30.8 |
| Max Power Current I _m (A) | 7.84 | 7.95 | 8.05 | 8.17 | 8.28 |
| Open Circuit Voltage V _{oc} (V) | 37.4 | 37.6 | 37.8 | 38.0 | 38.2 |
| Short-Circuit Current I _{sc} (A) | 8.26 | 8.40 | 8.46 | 8.59 | 8.55 |
| Module Efficiency | 14.4% | 14.6% | 15.1% | 15.4% | 15.7% |
| Maximum System Voltage (V) | 1000VDC(1000V) | | | | |
| Power Tolerance | ±3% | | | | |
| Series Fuse Rating (A) | 20 | | | | |

Components & Mechanical Data

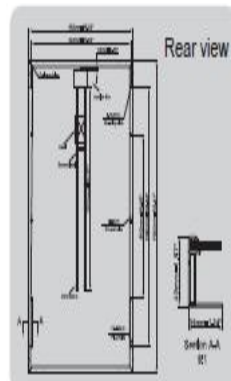
| | |
|------------------------|---|
| Front Glass | High Transparency Tempered Glass 0.125" / 3.2 mm |
| Junction Box | IP 65 or above |
| Diagnose Diode | 3 diodes |
| Output Cables | 1.0 m / IEC, UL approved (4 mm ² , 12AWG) (PV Wire Type) |
| Connectors | MCA PV2, IEC and UL approved |
| Frame | Anodized aluminum alloy type 6063-T5 |
| Encapsulation Material | EVA (0.012" / 0.46 mm ± 0.001" / 0.03 mm thickness) |
| Back Sheet | White multilayer polymer film |
| Temperature Range | -40° to +104° / -40° C to +40° C |
| Max Load | 75 lbs / 4" (UL Standard) / 5400 Pa (IEC Standard) |
| Impact Resistance | Steel ball - 1.10 lbs / 525 g dropped from 5' / 1.5 m high |

Specifications

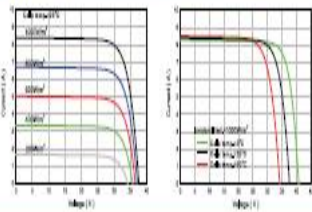
| | |
|----------------------|---|
| Cells | Polycrystalline silicon solar cells 6" x 6" / 155 mm x 155 mm |
| Number of Cells | 60 (6 x 10) |
| Dimensions (in / mm) | 64.57 x 39.06 x 1.57 / 1649x1000x40 |
| Weight (lb / kg) | 41.8 / 19.0 |

Temperature Coefficients


| | |
|---|--------------|
| MPP1 (°C) | 45 ± 2 |
| Temperature Coefficient of I _{sc} (% / °C) | 0.05 ± 0.01 |
| Temperature Coefficient of V _{oc} (% / °C) | -0.32 ± 0.02 |
| Temperature Coefficient of I _m (% / °C) | -0.02 ± 0.02 |
| Temperature Coefficient of V _m (% / °C) | -0.42 ± 0.03 |
| Temperature Coefficient of P _m (% / °C) | -0.43 ± 0.05 |



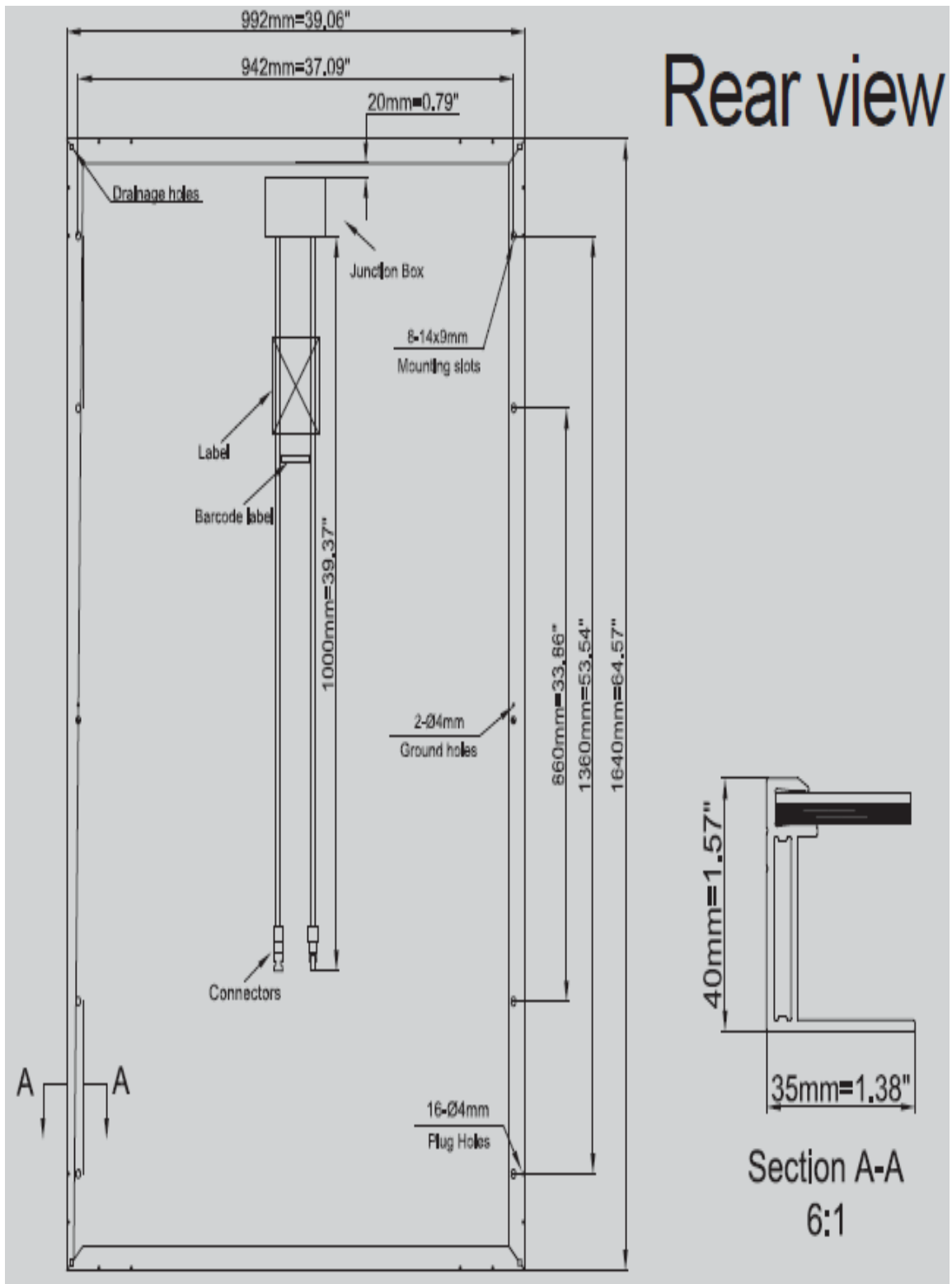
IV Curves



Options available

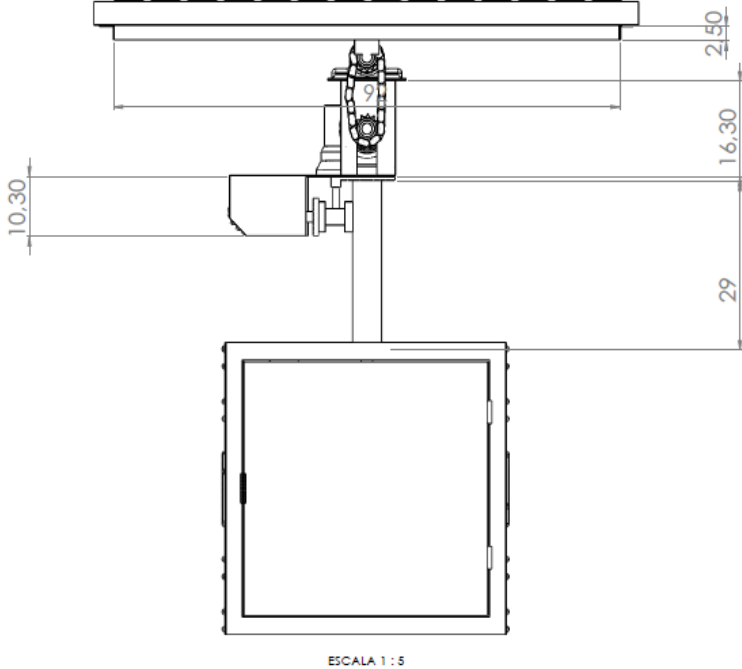


Solar Sales, Distribution & Installation
www.acosolar.com
E-mail : sales@acosolar.com
Tel : 626-575 8822

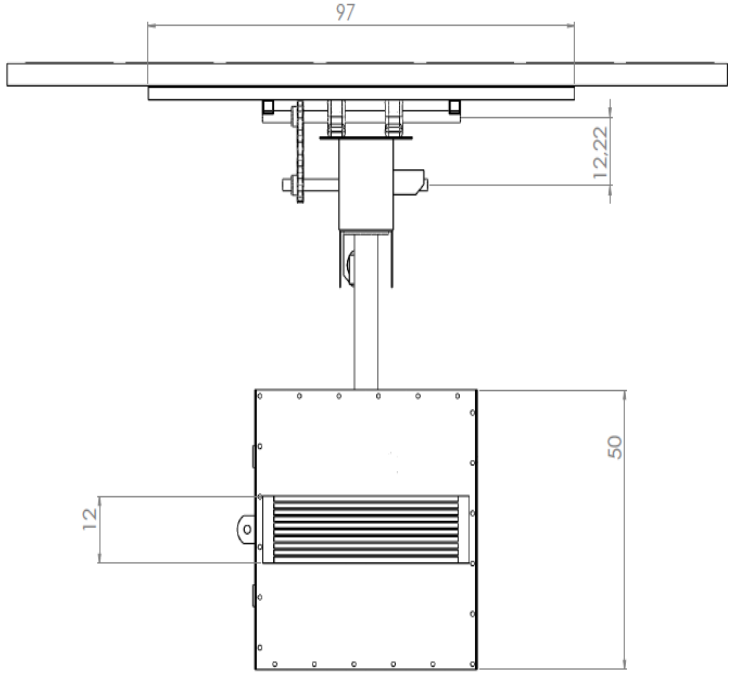


ANEXO B. DIMENSIONES GENERALES DE LA ESTRUCTURA

VISTA FRONTAL:



VISTA LATERAL:



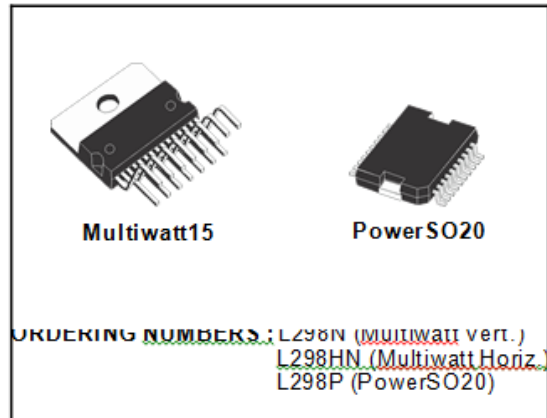


DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

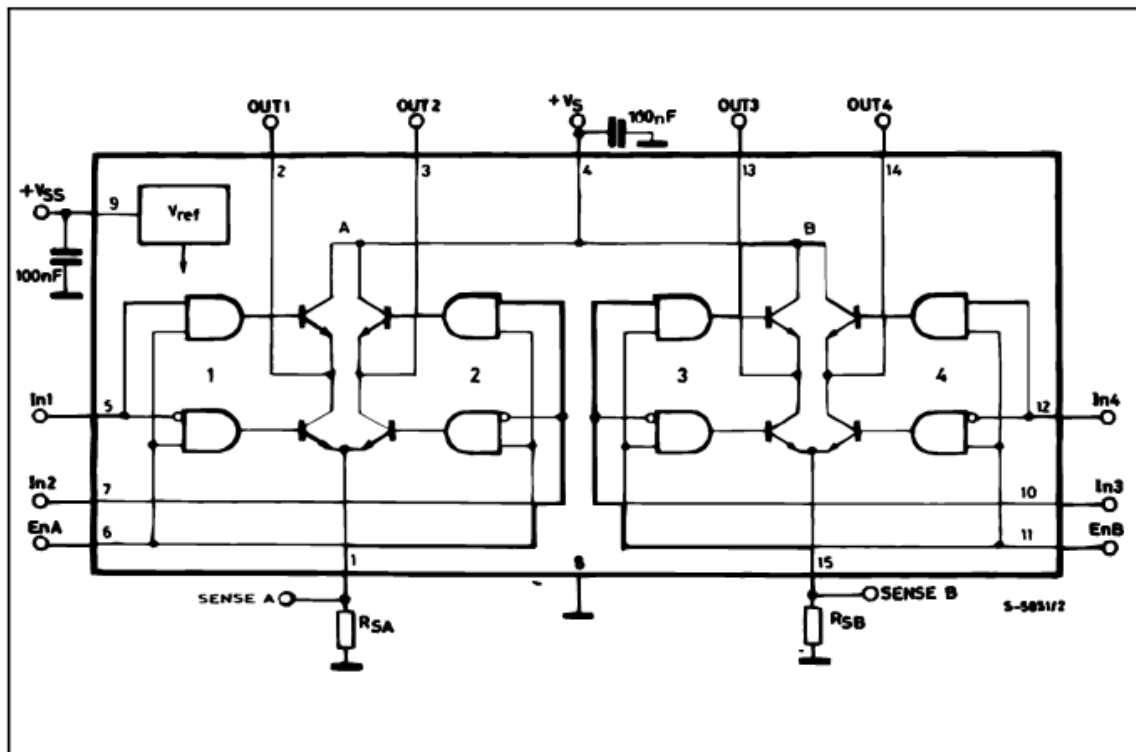
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

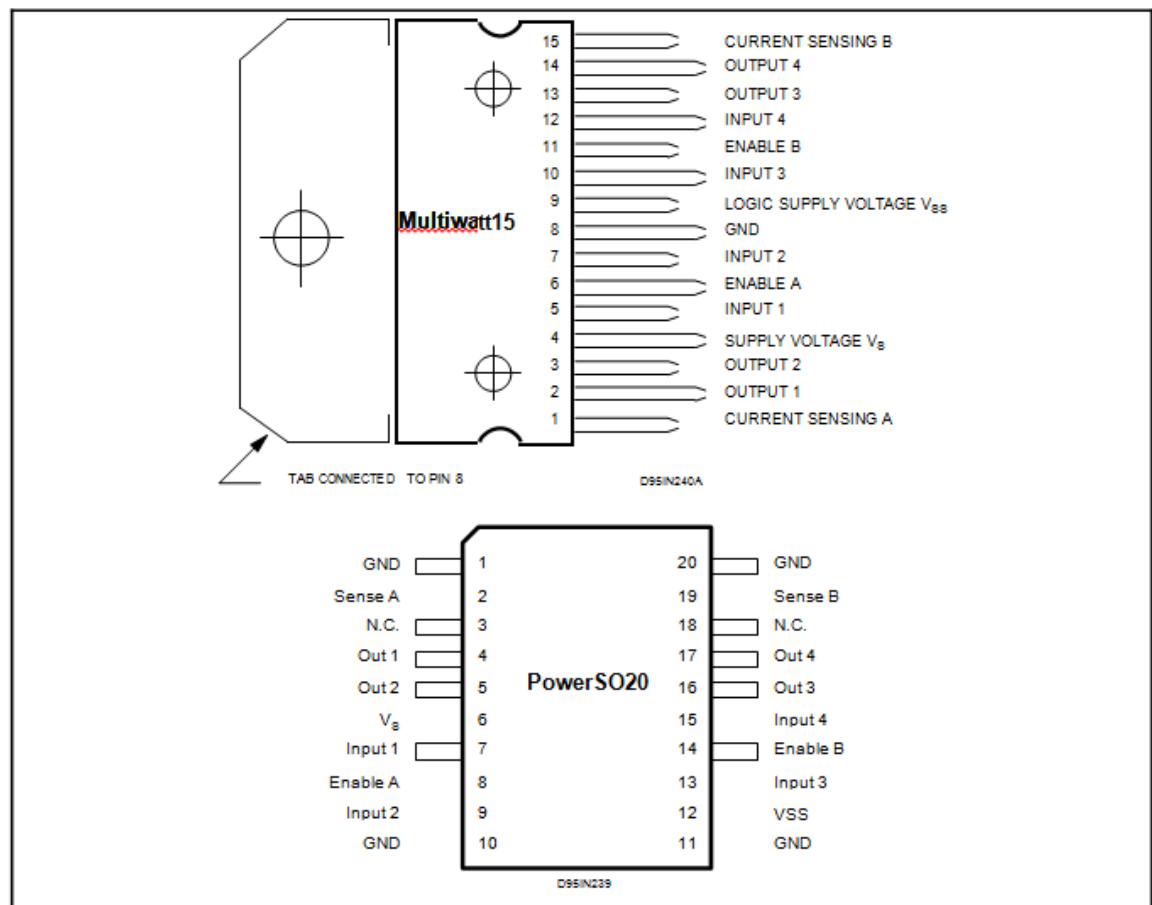
BLOCK DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol | Parameter | Value | Unit |
|----------------|--|---------------|-------------|
| V_S | Power Supply | 50 | V |
| V_{SS} | Logic Supply Voltage | 7 | V |
| V_I, V_{en} | Input and Enable Voltage | -0.3 to 7 | V |
| I_o | Peak Output Current (each Channel) – Non Repetitive ($t = 100 \mu s$) – Repetitive (80% on –20% off, $t_{on} = 10ms$) – DC Operation | 3 2.5 2 | A A A |
| V_{sense} | Sensing Voltage | -1 to 2.3 | V |
| P_{tot} | Total Power Dissipation ($T_{case} = 75 \text{ C}$) | 25 | W |
| T_{op} | Junction Operating Temperature | -25 to 130 | C |
| T_{stg}, T_j | Storage and Junction Temperature | -40 to 150 | C |

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

| Symbol | Parameter | | PowerSO20 | Multiwatt15 | Unit |
|------------------|-------------------------------------|------|-----------|-------------|------|
| $R_{th(j-case)}$ | Thermal Resistance Junction-case | Max. | – | 3 | C/W |
| $R_{th(j-amb)}$ | Thermal Resistance Junction-ambient | Max. | 13 (*) | 35 | C/W |

(*) Mounted on aluminum substrate

PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

| MW.15 | PowerSO | Name | Function |
|--------|------------|--------------------|---|
| 1;15 | 2;19 | Sense A; Sense B | Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load. |
| 2;3 | 4;5 | Out 1; Out 2 | Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1. |
| 4 | 6 | V _s | Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground. |
| 5;7 | 7;9 | Input 1; Input 2 | TTL Compatible Inputs of the Bridge A. |
| 6;11 | 8;14 | Enable A; Enable B | TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B). |
| 8 | 1,10,11,20 | GND | Ground. |
| 9 | 12 | V _{SS} | Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground. |
| 10; 12 | 13;15 | Input 3; Input 4 | TTL Compatible Inputs of the Bridge B. |
| 13; 14 | 16;17 | Out 3; Out 4 | Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15. |
| – | 3;18 | N.C. | Not Connected |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_s = 42V; V_{SS} = 5V, T_j = 25 °C; unless otherwise specified)

| Symbol | Parameter | Test Conditions | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|------------------------|--|---|----------------------|------------|-----------------|----------|
| V _s | Supply Voltage (pin 4) | Operative Condition | V _{IH} +2.5 | | 46 | V |
| V _{SS} | Logic Supply Voltage (pin 9) | | 4.5 | 5 | 7 | V |
| I _s | Quiescent Supply Current (pin 4) | V _{en} = H; I _L = 0 V _i = L V _i = H | | 13 50 | 22 70 | mA mA |
| | | V _{en} = L V _i = X | | | 4 | mA |
| I _{SS} | Quiescent Current from V _{SS} (pin 9) | V _{en} = H; I _L = 0 V _i = L V _i = H | | 24 7 | 36 12 | mA mA |
| | | V _{en} = L V _i = X | | | 6 | mA |
| V _{IL} | Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12) | | -0.3 | | 1.5 | V |
| V _{IH} | Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12) | | 2.3 | | V _{SS} | V |
| I _{IL} | Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12) | V _i = L | | | -10 | A |
| I _{IH} | High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12) | V _i = H V _{SS} -0.6V | | 30 | 100 | A |
| V _{en} = L | Enable Low Voltage (pins 6, 11) | | -0.3 | | 1.5 | V |
| V _{en} = H | Enable High Voltage (pins 6, 11) | | 2.3 | | V _{SS} | V |
| I _{en} = L | Low Voltage Enable Current (pins 6, 11) | V _{en} = L | | | -10 | A |
| I _{en} = H | High Voltage Enable Current (pins 6, 11) | V _{en} = H V _{SS} -0.6V | | 30 | 100 | A |
| V _{CEsat} (H) | Source Saturation Voltage | I _L = 1A I _L = 2A | 0.95 | 1.35 2 | 1.7 2.7 | V V |
| V _{CEsat} (L) | Sink Saturation Voltage | I _L = 1A (5) I _L = 2A (5) | 0.85 | 1.2 1.7 | 1.6 2.3 | V V |
| V _{CEsat} | Total Drop | I _L = 1A (5) I _L = 2A (5) | 1.80 | | 3.2 4.9 | V V |
| V _{sens} | Sensing Voltage (pins 1, 15) | | -1 (1) | | 2 | V |

Fuente: ALLDATASHEET <http://www.alldatasheet.com/>

ANEXO D. DATASHEET TLC2543

TLC2543C, TLC2543I, TLC2543M 12-BIT ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS WITH SERIAL CONTROL AND 11 ANALOG INPUTS

SLAS079F – DECEMBER 1993 – REVISED NOVEMBER 2001

- 12-Bit-Resolution A/D Converter
- 10- μ s Conversion Time Over Operating Temperature
- 11 Analog Input Channels
- 3 Built-In Self-Test Modes
- Inherent Sample-and-Hold Function
- Linearity Error . . . ± 1 LSB Max
- On-Chip System Clock
- End-of-Conversion Output
- Unipolar or Bipolar Output Operation (Signed Binary With Respect to 1/2 the Applied Voltage Reference)
- Programmable MSB or LSB First
- Programmable Power Down
- Programmable Output Data Length
- CMOS Technology
- Application Report Available†

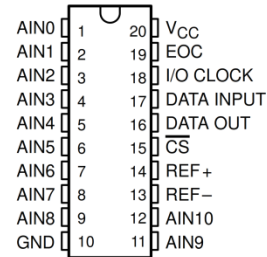
description

The TLC2543C and TLC2543I are 12-bit, switched-capacitor, successive-approximation, analog-to-digital converters. Each device, with three control inputs [chip select (\overline{CS}), the input-output clock, and the address input (DATA INPUT)], is designed for communication with the serial port of a host processor or peripheral through a serial 3-state output. The device allows high-speed data transfers from the host.

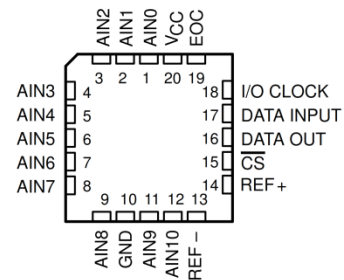
In addition to the high-speed converter and versatile control capability, the device has an on-chip 14-channel multiplexer that can select any one of 11 inputs or any one of three internal self-test voltages. The sample-and-hold function is automatic. At the end of conversion, the end-of-conversion (EOC) output goes high to indicate that conversion is complete. The converter incorporated in the device features differential high-impedance reference inputs that facilitate ratiometric conversion, scaling, and isolation of analog circuitry from logic and supply noise. A switched-capacitor design allows low-error conversion over the full operating temperature range.

The TLC2543C is characterized for operation from $T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C . The TLC2543I is characterized for operation from $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C . The TLC2543M is characterized for operation from $T_A = -55^\circ\text{C}$ to 125°C .

DB, DW, J, OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



FN PACKAGE
(TOP VIEW)



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

† Microcontroller Based Data Acquisition Using the TLC2543 12-bit Serial-Out ADC (SLAA012)

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2001, Texas Instruments Incorporated
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

1

TLC2543C, TLC2543I, TLC2543M
12-BIT ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS
WITH SERIAL CONTROL AND 11 ANALOG INPUTS

SLAS079F – DECEMBER 1993 – REVISED NOVEMBER 2001

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

| | | |
|--|----------|----------------------------|
| Supply voltage range, V_{CC} (see Note 1) | | -0.5 V to 6.5 V |
| Input voltage range, V_I (any input) | | -0.3 V to $V_{CC} + 0.3$ V |
| Output voltage range, V_O | | -0.3 V to $V_{CC} + 0.3$ V |
| Positive reference voltage, V_{ref+} | | $V_{CC} + 0.1$ V |
| Negative reference voltage, V_{ref-} | | -0.1 V |
| Peak input current, I_I (any input) | | ± 20 mA |
| Peak total input current, I_I (all inputs) | | ± 30 mA |
| Operating free-air temperature range, T_A : | TLC2543C | 0°C to 70°C |
| | TLC2543I | -40°C to 85°C |
| | TLC2543M | -55°C to 125°C |
| Storage temperature range, T_{stg} | | -65°C to 150°C |
| Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from the case for 10 seconds | | 260°C |

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTE 1: All voltage values are with respect to the GND terminal with REF- and GND wired together (unless otherwise noted).

recommended operating conditions

| | | MIN | NOM | MAX | UNIT |
|--|---------------------------|----------|----------|----------------|------|
| Supply voltage, V_{CC} | | 4.5 | 5 | 5.5 | V |
| Positive reference voltage, V_{ref+} (see Note 2) | | V_{CC} | | | V |
| Negative reference voltage, V_{ref-} (see Note 2) | | 0 | | | V |
| Differential reference voltage, $V_{ref+} - V_{ref-}$ (see Note 2) | | 2.5 | V_{CC} | $V_{CC} + 0.1$ | V |
| Analog input voltage (see Note 2) | | 0 | | V_{CC} | V |
| High-level control input voltage, V_{IH} | $V_{CC} = 4.5$ V to 5.5 V | 2 | | | V |
| Low-level control input voltage, V_{IL} | $V_{CC} = 4.5$ V to 5.5 V | | | 0.8 | V |
| Clock frequency at I/O CLOCK | | 0 | | 4.1 | MHz |
| Setup time, address bits at DATA INPUT before I/O CLOCK↑, $t_{su}(A)$ (see Figure 4) | | 100 | | | ns |
| Hold time, address bits after I/O CLOCK↑, $t_h(A)$ (see Figure 4) | | 0 | | | ns |
| Hold time, \overline{CS} low after last I/O CLOCK↓, $t_h(CS)$ (see Figure 5) | | 0 | | | ns |
| Setup time, \overline{CS} low before clocking in first address bit, $t_{su}(CS)$ (see Note 3 and Figure 5) | | 1.425 | | | μs |
| Pulse duration, I/O CLOCK high, $t_{WH}(I/O)$ | | 120 | | | ns |
| Pulse duration, I/O CLOCK low, $t_{WL}(I/O)$ | | 120 | | | ns |
| Transition time, I/O CLOCK high to low, $t_t(I/O)$ (see Note 4 and Figure 6) | | | | 1 | μs |
| Transition time, DATA INPUT and \overline{CS} , $t_t(CS)$ | | | | 10 | μs |
| Operating free-air temperature, T_A | TLC2543C | 0 | | 70 | °C |
| | TLC2543I | -40 | | 85 | |
| | TLC2543M | -55 | | 125 | |

NOTES: 2. Analog input voltages greater than that applied to REF+ convert as all ones (1111111111), while input voltages less than that applied to REF- convert as all zeros (0000000000).

3. To minimize errors caused by noise at the \overline{CS} input, the internal circuitry waits for a setup time after \overline{CS} ↓ before responding to control input signals. No attempt should be made to clock in an address until the minimum \overline{CS} setup time has elapsed.

4. This is the time required for the clock input signal to fall from V_{IHmin} to V_{ILmax} or to rise from V_{ILmax} to V_{IHmin} . In the vicinity of normal room temperature, the devices function with input clock transition time as slow as 1 μs for remote data acquisition applications where the sensor and the A/D converter are placed several feet away from the controlling microprocessor.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

TLC2543C, TLC2543I, TLC2543M
12-BIT ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS
WITH SERIAL CONTROL AND 11 ANALOG INPUTS
SLAS079F – DECEMBER 1993 – REVISED NOVEMBER 2001

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range,
 $V_{CC} = V_{ref+} = 4.5 \text{ V to } 5.5 \text{ V}$, $f_{(I/O \text{ CLOCK})} = 4.1 \text{ MHz}$ (unless otherwise noted)

| PARAMETER | TEST CONDITIONS | TLC2543C, TLC2543I | | | UNIT |
|---|--|---|-------|-----|------|
| | | MIN | TYP† | MAX | |
| V _{OH} High-level output voltage | V _{CC} = 4.5 V, I _{OH} = -1.6 mA | 2.4 | | | V |
| | V _{CC} = 4.5 V to 5.5 V, I _{OH} = -20 μA | V _{CC} - 0.1 | | | |
| V _{OL} Low-level output voltage | V _{CC} = 4.5 V, I _{OL} = 1.6 mA | 0.4 | | | V |
| | V _{CC} = 4.5 V to 5.5 V, I _{OL} = 20 μA | 0.1 | | | |
| I _{OZ} High-impedance off-state output current | V _O = V _{CC} , \overline{CS} at V _{CC} | 1 2.5 | | | μA |
| | V _O = 0, \overline{CS} at V _{CC} | 1 -2.5 | | | |
| I _{IH} High-level input current | V _I = V _{CC} | 1 2.5 | | | μA |
| I _{IL} Low-level input current | V _I = 0 | 1 -2.5 | | | μA |
| I _{CC} Operating supply current | \overline{CS} at 0 V | 1 2.5 | | | mA |
| I _{CC(PD)} Power-down current | For all digital inputs, 0 ≤ V _I ≤ 0.5 V or V _I ≥ V _{CC} - 0.5 V | 4 25 | | | μA |
| | Selected channel leakage current | Selected channel at V _{CC} , Unselected channel at 0 V | 1 | | |
| | Selected channel at 0 V, Unselected channel at V _{CC} | | | -1 | μA |
| | Maximum static analog reference current into REF+ | V _{ref+} = V _{CC} , V _{ref-} = GND | 1 2.5 | | μA |
| C _i Input capacitance | Analog inputs | 30 60 | | | pF |
| | Control inputs | 5 15 | | | |

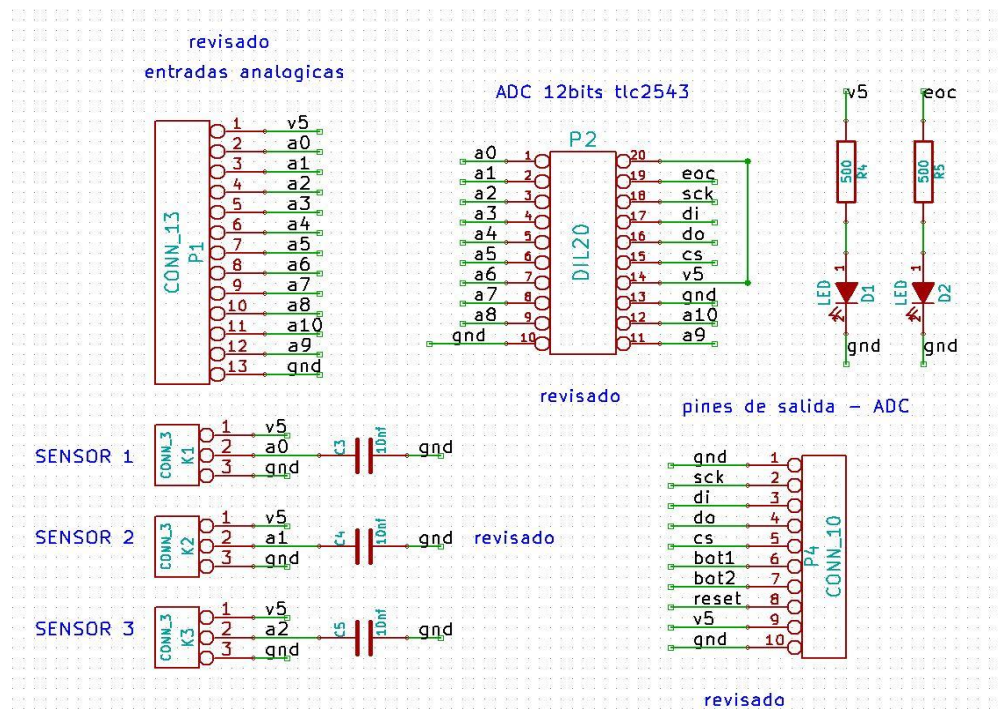
† All typical values are at V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C.

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range,
 $V_{CC} = V_{ref+} = 4.5 \text{ V to } 5.5 \text{ V}$, $f_{(I/O \text{ CLOCK})} = 4.1 \text{ MHz}$ (unless otherwise noted)

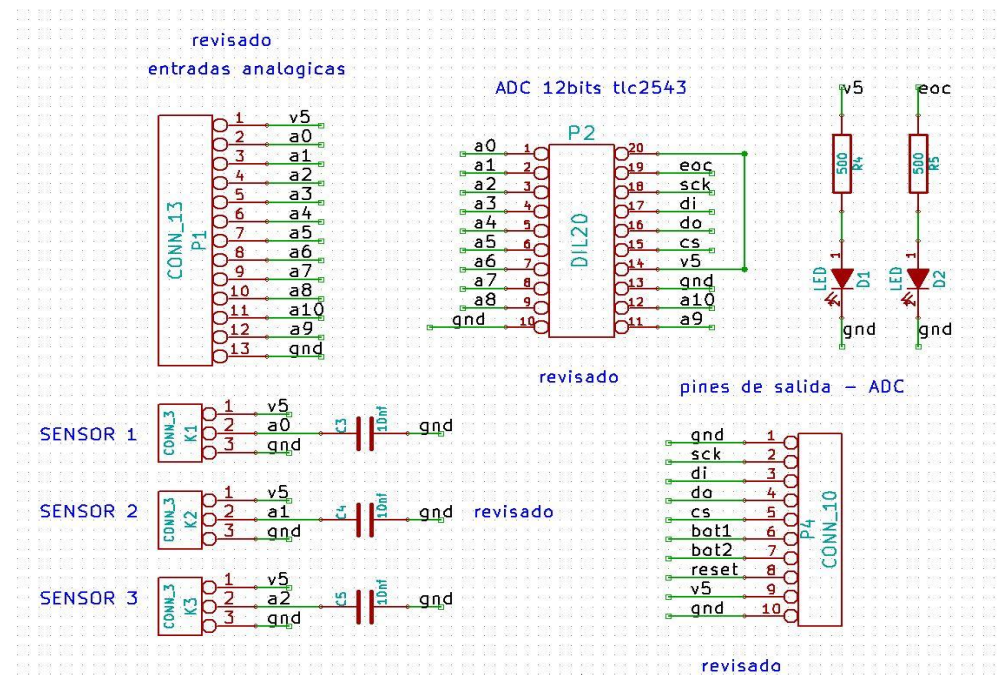
| PARAMETER | TEST CONDITIONS | TLC2543M | | | UNIT |
|---|--|---|-------|-----|------|
| | | MIN | TYP† | MAX | |
| V _{OH} High-level output voltage | V _{CC} = 4.5 V, I _{OH} = -1.6 mA | 2.4 | | | V |
| | V _{CC} = 4.5 V to 5.5 V, I _{OH} = -20 μA | V _{CC} - 0.1 | | | |
| V _{OL} Low-level output voltage | V _{CC} = 4.5 V, I _{OL} = 1.6 mA | 0.4 | | | V |
| | V _{CC} = 4.5 V to 5.5 V, I _{OL} = 20 μA | 0.1 | | | |
| I _{OZ} High-impedance off-state output current | V _O = V _{CC} , \overline{CS} at V _{CC} | 1 2.5 | | | μA |
| | V _O = 0, \overline{CS} at V _{CC} | 1 -2.5 | | | |
| I _{IH} High-level input current | V _I = V _{CC} | 1 10 | | | μA |
| I _{IL} Low-level input current | V _I = 0 | 1 -10 | | | μA |
| I _{CC} Operating supply current | \overline{CS} at 0 V | 1 2.5 | | | mA |
| I _{CC(PD)} Power-down current | For all digital inputs, 0 ≤ V _I ≤ 0.5 V or V _I ≥ V _{CC} - 0.5 V | 4 25 | | | μA |
| | Selected channel leakage current | Selected channel at V _{CC} , Unselected channel at 0 V | 10 | | |
| | Selected channel at 0 V, Unselected channel at V _{CC} | | | -10 | μA |
| | Maximum static analog reference current into REF+ | V _{ref+} = V _{CC} , V _{ref-} = GND | 1 2.5 | | μA |
| C _i Input capacitance | Analog inputs | 30 60 | | | pF |
| | Control inputs | 5 15 | | | |

† All typical values are at V_{CC} = 5 V, T_A = 25°C.

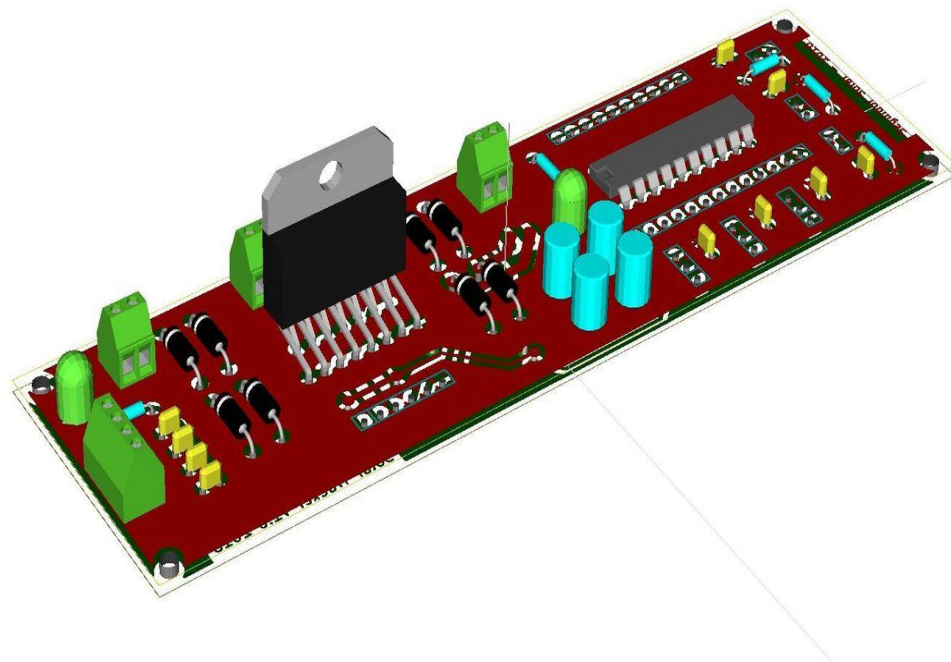
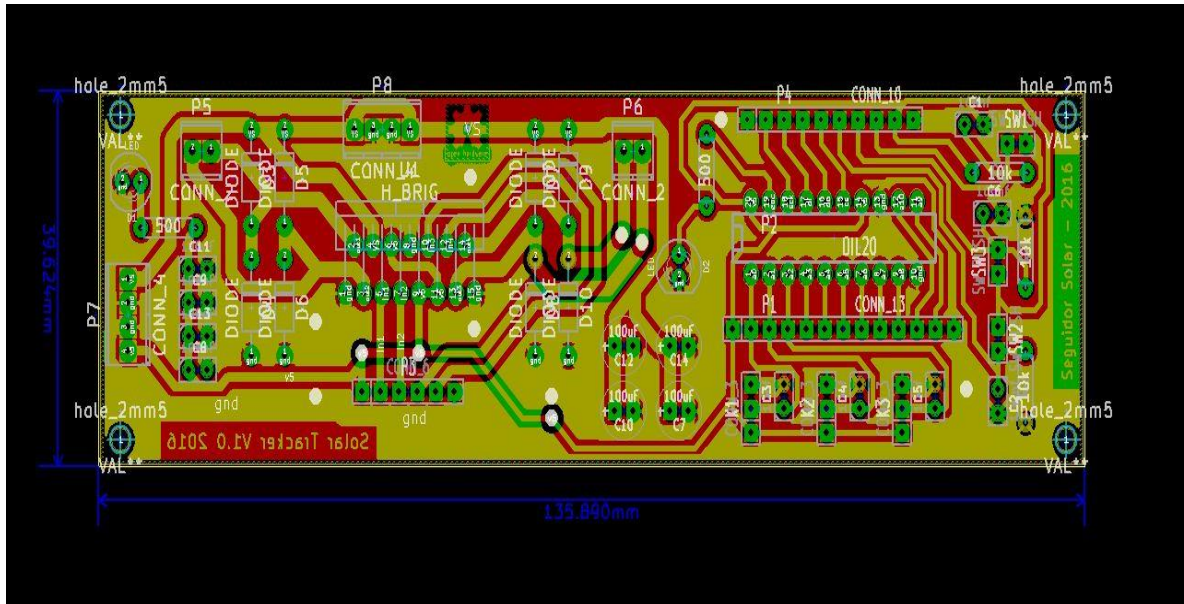
ANEXO E. CONEXIÓN Y DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO CONEXIÓN PARA CIRCUITO IMPRESO ETAPA DE CONTROL Y POTENCIA



CONEXIÓN CIRCUITO PARA CIRCUITO IMPRESO ETAPA DE CONTROL



Una vez hecha la conexión se procede a trazar las rutas bajo las consideraciones de corriente y tensión que se manejan para este circuito con el fin de no sufrir de daños producto de un mal diseño, para lo cual fue necesario el uso de dos capas.



ANEXO F. ADECUACIÓN DE ECUACIONES INTERFAZ DE PYTHON

Las aquí enunciadas son una descomposición de las ecuaciones de posicionamiento solar mencionadas en el Capítulo 2, aplicadas a la interfaz de Python e incluidas en el sistema embebido de la tarjeta de desarrollo.

Ecuación 1: Día juliano

n= fecha del día en formato decimal

h= hora del día en formato decimal

gtm= zona horaria

$$JD = n + 2415018.5 + h - (gtm / 24)$$

Ecuación 2: Siglo juliano

JD= día juliano

$$JS = (JD - 2451545) / 36525$$

Ecuación 3: Longitud media geométrica del sol

JS= siglo juliano

$$GMLS = MOD((280.46646 + JS(36000.76983 + JS \times 0.0003032)), 360)$$

Ecuación 4: Anomalía media geométrica del sol

JS= siglo juliano

$$GMAS = 357.52911 + JS(35999.05029 - 0.0001537 \times JS)$$

Ecuación 5: Excentricidad de órbita terrestre

JS= siglo juliano

$$EEO = 0.016708634 - JS(0.000042037 + 0.0000001267 \times JS)$$

Ecuación 6: Ecuación de sol del centro

JS= siglo juliano

GMAS= anomalía media geométrica del sol

$$ES = \sin(GMAS \times \pi / 180)(1.914602 - JS(0.004817 + JS \times 0.000014)) \\ + \sin(GMAS \times \pi / 90)(0.019993 - 0.000101 \times JS) + \sin(GMAS \times \pi / 60) \times 0.000289$$

Ecuación 7: Longitud solar verdadera

GMLS= longitud media geométrica del sol

ES= ecuación de sol del centro

$$STL = GMLS + ES$$

Ecuación 8: Anomalía solar verdadera

GMAS= anomalía media geométrica del sol

ES= ecuación de sol del centro

$$STA = GMAS + ES$$

Ecuación 9: Vector de radio solar

STA= anomalía solar verdadera

EEO= excentricidad de órbita terrestre

$$SRV = (1.000001018(1 - EEO^2)) / (1 + EEO \times \cos(STA \times \pi / 180))$$

Ecuación 10: Longitud aparente del sol

STL= longitud solar verdadera

JS= siglo juliano

$$SAL = STL - 0.00569 - 0.00478 \times \sin((125.04 - 1934.136 \times JS) \times \pi / 180)$$

Ecuación 11: Oblicuidad eclíptica media

JS= siglo juliano

$$MOE = 23 + 1/60 \times (26 + 1/60 \times ((21.448 - JS(46.815 + JS(0.00059 - JS(0.001813))))))$$

Ecuación 12: Oblicuidad corregida

JS= siglo juliano

MOE= oblicuidad eclíptica media

$$OC = MOE + 0.00256 \times \cos((125.04 - 1934.136 \times JS) \times \pi / 180)$$

Ecuación 13: sun rt ascen

OC= oblicuidad corregida
 SAL= longitud aparente del sol

$$SRA = (180/\pi)(\text{atan2}((\cos(OC \times \pi/180) \times \sin(SAL \times \pi/180)), (\cos(SAL \times \pi/180))))$$

Ecuación 14: Declinación solar

OC= oblicuidad corregida
 SAL= longitud aparente del sol

$$SD = 180/\pi \times (\text{asin}(\sin(OC \times \pi/180) \times \sin(SAL \times \pi/180)))$$

Ecuación 15: Variación y

OC= oblicuidad corregida

$$VY = (\tan(OC/2 \times \pi/180))^2$$

Ecuación 16: Ecuación de tiempo

VY= variación y
 GMLS= longitud media geométrica del sol
 EEO= excentricidad de órbita terrestre
 GMAS= anomalía media geométrica del sol

$$\begin{aligned} ET = & 4 \times 180/\pi \times (VY \times \sin(GMLS \times \pi/90) - 2 \times EEO \times \sin(GMAS \times \pi/180)) \\ & + 4 \times EEO \times VY \times \sin(GMAS \times \pi/180) \times \cos(GMLS \times \pi/90) - 0.5 \times VY^2 \times \sin(GMLS \times \pi/45) \\ & - 1.25 \times EEO^2 \times \sin(GMAS \times \pi/180) \end{aligned}$$

Ecuación 17: Angulo hora de amanecer

SD= declinación solar

Latitud= latitud del lugar en grados

$$HAS = 180/\pi(\arccos(\cos(90.833\pi/180)/(\cos(\text{latitud}\pi/180) \times \cos(\text{SD}\pi/180)) - \tan(\text{latitud}\pi/180) \times \tan(\text{SD}\pi/180)))$$

Ecuación 18: Medio día solar

Longitud= longitud del lugar en grados

ET= ecuación de tiempo

gtm= zona horaria

$$SN = (720 - 4 \times \text{longitud} - ET + \text{gtm} \times 60) / 1440$$

Ecuación 19: Amanecer solar

SN= mediodía solar

HAS= Angulo hora de amanecer

$$SSunrise = SN - HAS \times 4 / 1440$$

Ecuación 20: Atardecer solar

SN= mediodía solar

HAS= Angulo hora de amanecer

$$SSunset = SN + HAS \times 4 / 1440$$

Ecuación 21: Duración luz solar

HAS= Angulo hora de amanecer

$$\text{SunD} = 8 \times \text{HAS}$$

Ecuación 22: Tiempo solar verdadero

h= hora del día en formato decimal

Longitud= longitud del lugar en grados

gtm= zona horaria

ET= ecuación de tiempo

$$\text{TST} = \text{MOD}((h \times 1440 + \text{ET} + 4 \times \text{longitud} - 60 \times \text{gtm}), 1440)$$

Ecuación 23: Angulo de hora

Tst= tiempo solar verdadero

Si $\text{TST}/4 < 0$:

$$\text{hangle} = \text{TST}/4 + 180$$

Para otro caso:

$$\text{hangle} = \text{TST}/4 - 180$$

Ecuación 24: Ángulo zenit solar

SD= declinación solar

Latitud= latitud del lugar en grados

hangle= ángulo de hora

$$\text{SZA} = 180/\pi (\arccos(\sin(\text{latitud} \times \pi/180) \times \sin(\text{SD} \times \pi/180) + \cos(\text{latitud} \times \pi/180) \times \cos(\text{SD} \times \pi/180) \times \cos(\text{hangle} \times \pi/180)))$$

Ecuación 25: Ángulo de elevación solar

SZA= ángulo zenit solar

SEA = 90 - SZA

Ecuación 26: Ángulo de acimut solar

SZA= Angulo zenit solar

SD= declinación solar

Latitud= latitud del lugar en grados

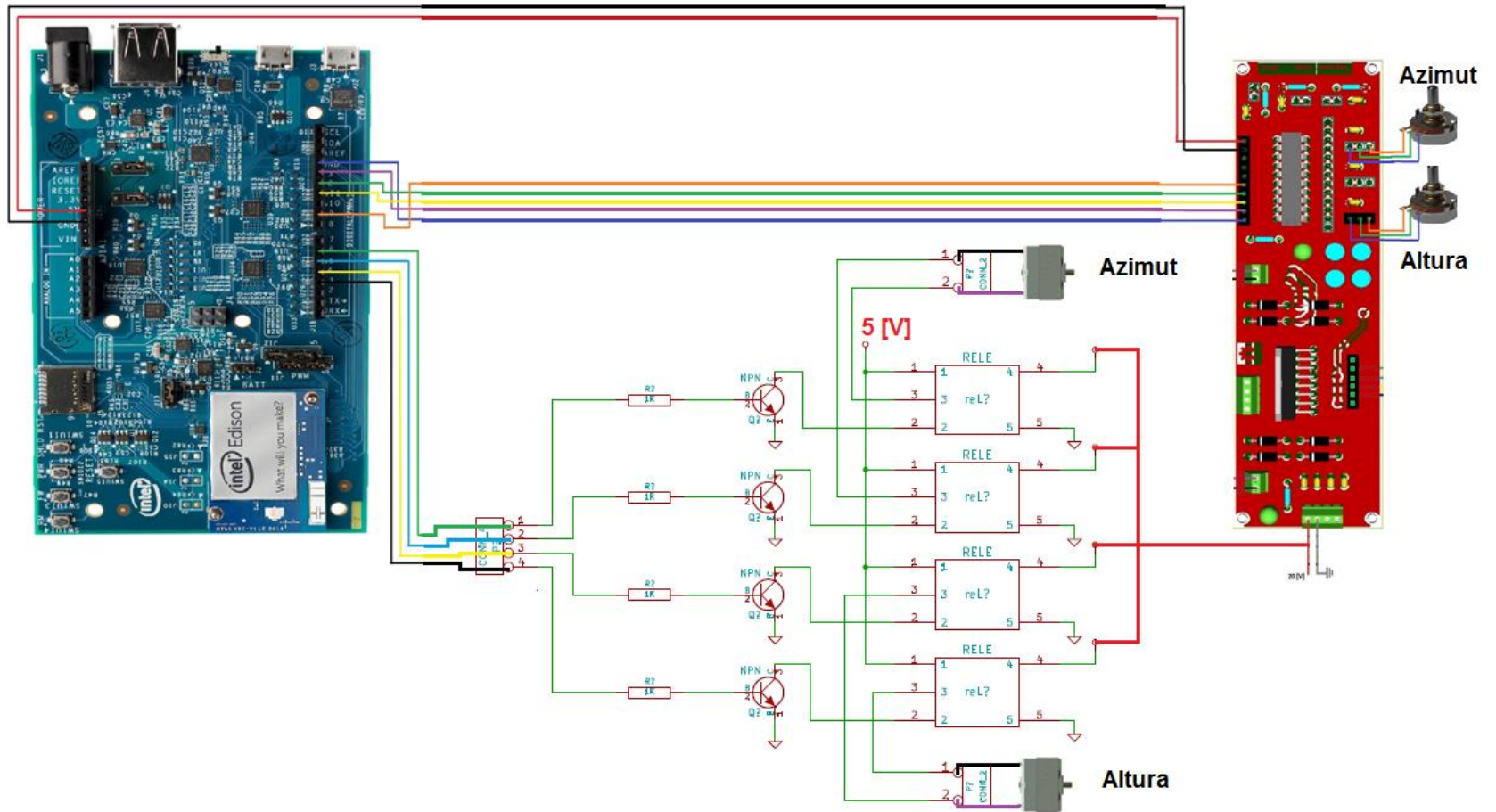
Si hangle >0:

$$SAA = MOD(((180/\pi)(\arccos((\sin(\pi/180)(\text{latitud}))\cos(\pi/180)(SZA)) - \sin(\pi/180)(SD)))/(\cos(\pi/180)(\text{latitud})\sin(\pi/180)(SZA)))) + 180, 360)$$

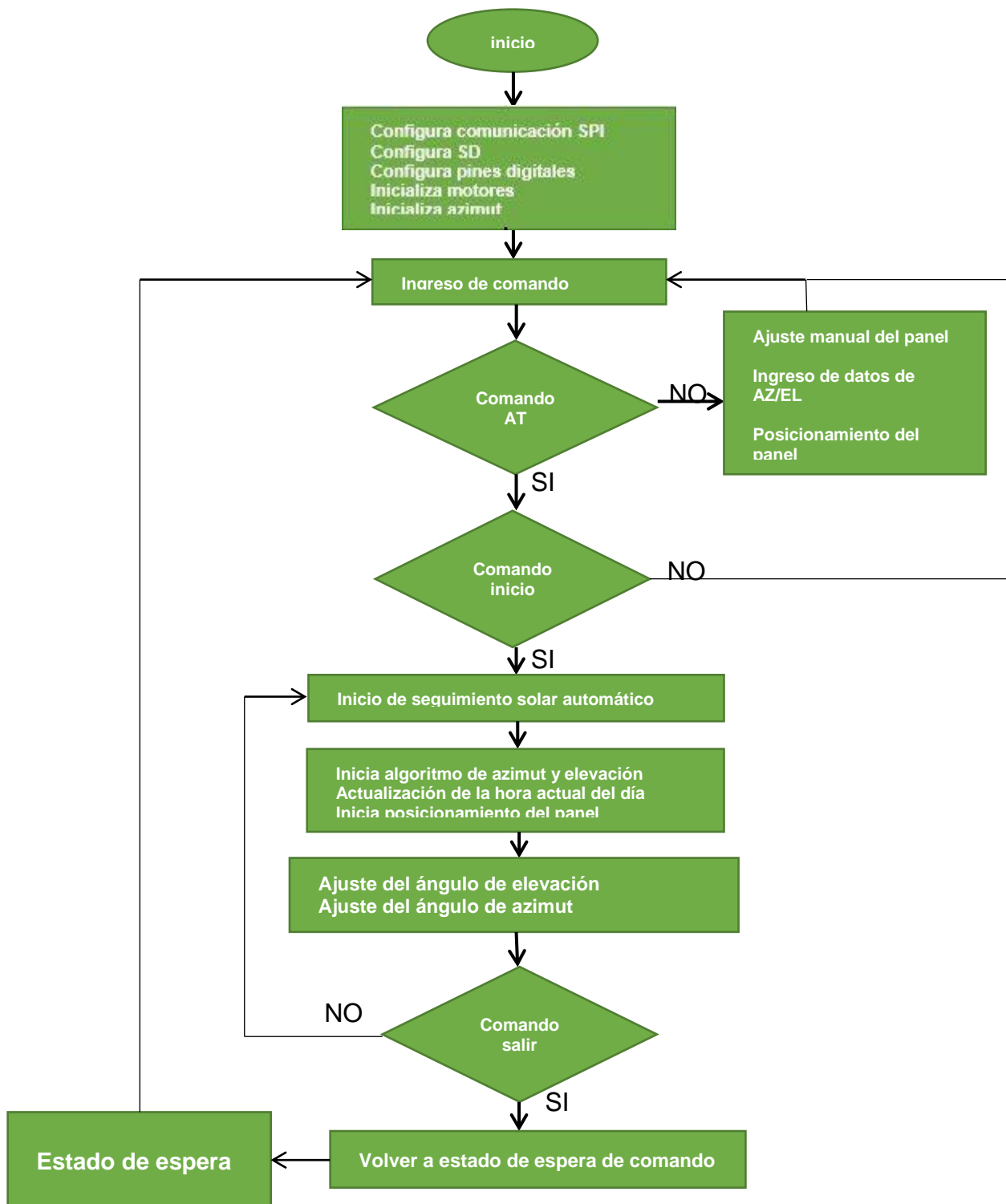
Para otro caso:

$$SAA = MOD((-180/\pi)(\arccos((\sin(\pi/180)(\text{latitud}))\cos(\pi/180)(SZA)) - \sin(\pi/180)(SD)))/(\cos(\pi/180)(\text{latitud})\sin(\pi/180)(SZA)))) + 540, 360)$$

ANEXO G. ESQUEMA DE CONEXIÓN PARTE ELECTRÓNICA



ANEXO H. DIAGRAMA Y CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN



CODIGO DE SEGUIMIENTO ESTÁTICO O A PETICION DEL USUARIO (PLATAFORMA ARDUINO PARA INTEL)

/* Trabajo de grado:

Diseño e implementación de la estrategia de movimiento para una
unidad experimental

de seguimiento solar con dos grados de libertad aplicado a
generación fotovoltaica.

Autores:

Jorge Manuel Barrios Sánchez

Jota Mario Miranda Guerra

Jhon Jaime Tamayo Argüello

Descripción Script:

Este script controla la posición angular de dos motores de
corriente continua a partir de

la estimación de los ángulos de azimut y altura solar a partir de
un algoritmo de

posicionamiento solar.

Modo de funcionamiento:

A petición de usuario.

Dependencias (Software):

* archivo.txt

* archivo2.txt

* generador.py

Dependencias (Hardware):

* Intel edison + Board arduino.

* Ordenador peronal para comunicación a través del monitor serial

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga octubre 21 de 2013

*/

```
#include <SD.h>
```

```
#include <SPI.h>
```

```
File archivo; //CONTIENE DATO DE AZIMUT Y ALTURA SOLAR
```

```

File archivo2; //CONTIENE FECHA Y HORA
int cs = 9;

String line = "";
String line2 = "";
String line3 = "";
String car = "";
char aux[256];

uint16_t dato = 0;
uint16_t dato_1 = 0;

uint16_t salida = 0;
int valor0 = 0;
int valor1 = 0;
int retraso = 0;
uint16_t hora = 0;
uint16_t t = 0;

uint16_t pos_elev = 0;
uint16_t pos_azim = 0;

int azimut = 0;
int elevac = 0;

uint16_t med_elev = 0;
uint16_t med_azim = 0;

uint16_t x_elev = 0;
uint16_t x_azimut = 0;

//SENALES DE CONTROL MOTOR ALTURA SOLAR
int m1 = 5;
int m2 = 6;

//SENALES DE CONTROL MOTOR AZIMUT

```

```

int m3 = 3;
int m4 = 4;

/* CONFIGURACION GENERAL GPIO, SERIAL Y SD */
void setup()
{
  // PINES I/O
  pinMode(13, OUTPUT);

  pinMode(cs, OUTPUT);
  digitalWrite(cs, 1);

  // PINES DE MOTOR
  pinMode(m1, OUTPUT);
  pinMode(m2, OUTPUT);
  pinMode(m3, OUTPUT);
  pinMode(m4, OUTPUT);

  digitalWrite(m1, 0);
  digitalWrite(m2, 0);
  digitalWrite(m3, 0);
  digitalWrite(m4, 0);

  // CONFIGURACION SPI
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV128);
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
  SPI.begin();

  // PUERTO SERIAL
  //Serial.begin(57600);

  // TARJETA SD
  if (!SD.begin())
  {

```

```

    digitalWrite(13, 1);
    return;
}
}

/* CICLO INDEFINIDO - POSICIONAMIENTO SOLAR A PETICION DE USUARIO */
void loop()
{
  inicio:
    // SISTEMA DE CONTROL POR COMANDOS
    while (Serial.available())
    {
      car = Serial.readStringUntil('\n');
    }

    // POSICIONAMIENTO SOLAR MANUAL
    if (car.startsWith("AT"))
    {
      //TRATAMIENTO A STRING RECIBIDO
      String getC = car.substring(car.indexOf("AT") + 2,
car.indexOf("BT"));
      String getD = car.substring(car.indexOf("BT") + 2, car.length());

      //CONVIERTE STRING 2 INT
      pos_elev = getC.toInt();
      pos_azim = getD.toInt();

      x_elev = pos_elev;
      x_azimut = pos_azim;

      //EJECUTA POSICIONAMIENTO
      Serial.println("AJUSTANDO POSICION ....");
      posicion(x_elev, x_azimut);
      Serial.println("-- POSICIONAMIENTO COMPLETADO --");

      car = "";
    }
}

```

```

    goto inicio;
}
else
{
}
// COMANDO PARA INICIO DE SEGUIMIENTO SOLAR AUTOMATICO
if (car == "inicio")
{
    car = "";
    goto sistema;
}
else
{
    car = "";
    goto inicio;
}

sistema:
    // LEER HORA
    generador();
    hora = ver_fecha();
    // VALIDAR QUE ESTE ENTRE LAS 6 Y 17 HORAS
    if ( (hora >= 9) && (hora <= 17) )
    {
        // LECTURA DE AZIMUT - ELEVACION
        datos_trayectoria();
        // ESTABLECER POSICIÓN DEL PANEL
        posicion(elevac, azimut);
    }
    else
    {
        // Serial.println("Fuera de rango de operación - Por favor revise la
hora");
        posicion(90, 90); //POSICION INICIAL DEL PANEL
    }
    // TIEMPO DE CONTEO: t(s)=(n*200/1000)

```

```

//Serial.println("Actualizacion en 10 minutos");
do
{
    t++;
    delay(200);
}
while (t < 3000);
// REINICIO DE SISTEMA
t = 0;
hora = 0;
goto sistema;
}

/* FUNCION PARA GENERACION DE DATOS: AZIMUT/ALTURA SOLAR */
void generador()
{
    delay(1000);
    system("python /media/sdcard/generador.py"); // LLamado a codigo de
python para generar datos
    delay(1000);
}

/* FUNCION PARA LECTURA DE archivo.txt (AZIMUT/ALTURA SOLAR) */
void datos_trayectoria()
{
    elevac = 0;
    azimut = 0;

    archivo = SD.open("archivo.txt", FILE_READ);
    while (archivo.available())
    {
        line = archivo.readStringUntil('\n');
    }
    archivo.close();
}

```

```

delay(1);

if (line != 0)
{
    line.trim();
    String getA = line.substring(line.indexOf("elev") + 4,
line.indexOf("azim"));
    String getB = line.substring(line.indexOf("azim") + 4,
line.length());

    valor0 = getA.toInt();
    valor1 = getB.toInt();
    //Serial.println(valor0);
    //Serial.println(valor1);
    delay(1);
    elevac = (float)((valor0 * 720.0 / pow(2, 24)) - 360.0);

    delay(1);
    azimut = (float)((valor1 * 720.0 / pow(2, 24)) - 360.0);
    delay(1);
    //Serial.println(elevac);
    //Serial.println(azimut);
    line = "";
}
line = "";
//SD.remove("archivo.txt"); // solo si es necesario
delay(1);
}

/* FUNCION PARA LECTURA DE archivo2.txt (FECHA/HORA) */
int ver_fecha()
{
    int lectura_hora = 0;
    archivo2 = SD.open("archivo2.txt", FILE_READ);

    while (archivo2.available())

```

```

    {
        line2 = archivo2.readStringUntil('\n');
    }
    archivo2.close();
    //Serial.print("FECHA ACTUAL: ");
    //Serial.println(line2);
    String getE = line2.substring(line2.indexOf("hora") + 4,
line2.indexOf("minut"));
    lectura_hora = getE.toInt();
    line2 = "";
    delay(1);
    return lectura_hora;
}

/* FUNCION PARA ESTABLECER POSICION DEL PANEL */
void posicion(uint16_t ele, int16_t azi)
{
    //Serial.print("elevacion: "); Serial.print(ele); Serial.print("
azimut: "); Serial.println(azi);
    delay(1000);

// MOVIMIENTO DE ALTURA SOLAR
pos_eleva:
    dato = read_adc(0, 1);
    for (;;)
    {
        dato = read_adc(0, 1);
        med_elev = (int) (dato*0.0615 - 37.896); //RELACION VOLTAJE - GRADOS
        //Serial.println(dato);
        if (med_elev >= 0 && med_elev <= 180)
        {
            break;
        }
        delay(10);
    }
}

```

```

if (ele > med_elev) //SENTIDO DE GIRO 1
{
  do
  {
    dato = read_adc(0, 1); //LECTURA ADC - CANAL 0
    for (;;)
    {
      dato = read_adc(0, 1);
      med_elev = (int)(dato * 0.0615 - 37.896); //RELACION VOLTAJE -
GRADOS
      //Serial.println(dato);
      if (med_elev >= 0 && med_elev <= 180)
      {
        break;
      }
      delay(10);
    }
    //Serial.println(dato);
    //Serial.println(med_elev);
    if (ele == med_elev)
    {
      // FRENADO
      digitalWrite(m1, 0);
      digitalWrite(m2, 0);
      break;
    }
  }
  else
  {
    // LOGICA DE GIRO MOTOR ALTURA SOLAR
    if (ele >= 40 && ele <= 115) // PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
    {
      digitalWrite(m1, 0);
      digitalWrite(m2, 1);
    }
  }
}

```

```

        else
        {
            digitalWrite(m1, 0);
            digitalWrite(m2, 0);
            break;
        }
    }
    dato = 0;
    med_elev = 0;
    delay(10);
} while (true);
}
else if (ele < med_elev) //SENTIDO DE GIRO 2
{
    do
    {
        for (;;)
        {
            dato = read_adc(0, 1); //LECTURA ADC - CANAL 0
            med_elev = (int)(dato * 0.0615 - 37.896);
            //Serial.println(dato);
            if (med_elev >= 0 && med_elev <= 180)
            {
                break;
            }
            delay(100);
        }
        //Serial.println(dato);
        //Serial.println(med_elev);
        if (ele == med_elev)
        {
            // FRENADO
            digitalWrite(m1, 0);
            digitalWrite(m2, 0);
            break;
        }
    }
}

```

```

else
{
    // LOGICA DE GIRO MOTOR ALTURA SOLAR
    if (ele >= 40 && ele <= 115) // PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
    {
        digitalWrite(m1, 1);
        digitalWrite(m2, 0);
    }
else
{
    digitalWrite(m1, 0);
    digitalWrite(m2, 0);
    break;
}
}
dato = 0;
med_elev = 0;
delay(50);
} while (true);
}
else
{
}
delay(1000);

//MOVIMIENTO DE AZIMUT- CALCULO DE LA TRAYECTORIA MAS CORTA
pos_azimut:
dato_1 = read_adc(1, 1); //LECTURA ADC - CANAL 1
med_azim = (int)((dato_1 *(0.835)) - 784.73 );
Serial.println(dato_1);
if (azi > 270 && azi < 360)
{
    azi = azi-360;
}

```

```

else if(azi==360)
{
    azi=0;
}
else if(azi==270)
{
    azi=270;
}
else
{
    azi=azi;
}

pose:
if (azi >= med_azim)
{
    do
    {
        dato_1 = read_adc(1, 1); //LECTURA ADC - CANAL 1
        med_azim = (int)((dato_1 *(0.835)) - 784.73); //RELACION VOLTAJE -
GRADOS
        Serial.println(dato_1);
        Serial.println(med_azim);
        Serial.println(azi);
        if (azi <= med_azim)
        {
            //FRENADO
            digitalWrite(m3, 0);
            digitalWrite(m4, 0);
            break;
        }
    }
    else
    {
        //LOGICA DE GIRO MOTOR AZIMUT

```

```

        if (azi >= -85 && azi<=265 ) //PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
    {
        digitalWrite(m3, 0);
        digitalWrite(m4, 1);
    }
    else
    {
        digitalWrite(m3, 0);
        digitalWrite(m4, 0);
    }
}
dato_1 = 0;
med_azim = 0;
delay(1000);
} while (true);
}
else if (azi <= med_azim)
{
    do
    {
        dato_1 = read_adc(1, 1); //LECTURA ADC - CANAL 1
        med_azim = (int)((dato_1 *(0.835)) - 784.73); //RELACION VOLTAJE -
GRADOS
        Serial.println(dato_1);
        Serial.println(med_azim);
        Serial.println(azi);
        if (azi >= med_azim)
        {
            //FRENADO
            digitalWrite(m3, 0);
            digitalWrite(m4, 0);
            break;
        }
    }
    else
    {

```

```

//LOGICA DE GIRO MOTOR AZIMUT
if (azi >= -85 && azi<=265 ) //PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
{
    digitalWrite(m3, 1);
    digitalWrite(m4, 0);
}
else
{
    digitalWrite(m3, 0);
    digitalWrite(m4, 0);
}
}

dato_1 = 0;
med_azim = 0;
delay(1000);
} while (true);
}
delay(10);
}

```

```

/* FUNCION DE LECTURA Y TRANSMISION DE DATOS ADC */
uint16_t read_adc(int x, int pa)
{
    uint16_t digitalvalor = 0;
    int paq = 0;
    uint16_t primeraconfig = 0;
    uint16_t primerbyte = 0;
    uint16_t segundobyte = 0;
    primeraconfig |= (x << 4);
    primeraconfig |= (3 << 2);
    if (pa == 1)
    {

```

```

    paq = cs;
}
else
{
    paq = cs;
}

digitalWrite(paq, 0);
primerbyte =SPI.transfer(primeraconfig);
segundobyte =SPI.transfer(0x00);
digitalWrite(paq, 1);

delayMicroseconds(100);

digitalWrite(paq, 0);
primerbyte = SPI.transfer(primeraconfig);
segundobyte = SPI.transfer(0x00);
digitalWrite(paq, 1);

digitalvalor |= (primerbyte << 8);
digitalvalor |= (segundobyte);

return ((digitalvalor >> 4 ) + 1);
}

```

CODIGO DE SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO (PLATAFORMA ARDUINO PARA INTEL)

/* Trabajo de grado:

Diseño e implementación de la estrategia de movimiento para una
unidad experimental

de seguimiento solar con dos grados de libertad aplicado a
generación fotovoltaica.

Autores:

Jorge Manuel Barrios Sánchez

Jota Mario Miranda Guerra

Jhon Jaime Tamayo Argüello

Descripción Script:

Este script controla la posición angular de dos motores de
corriente continua a partir de

la estimación de los ángulos de azimut y altura solar a partir de
un algoritmo de

posicionamiento solar.

Modo de funcionamiento:

Automático.

Dependencias (Software):

* archivo.txt

* archivo2.txt

* generador.py

Dependencias (Hardware):

* Intel edison + Board arduino.

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga octubre 21 de 2013

*/

```
#include <SD.h>
```

```
#include <SPI.h>
```

```
File archivo; //CONTIENE DATO DE AZIMUT Y ALTURA SOLAR
```

```

File archivo2; //CONTIENE FECHA Y HORA
int cs = 9;

String line = "";
String line2 = "";
String line3 = "";
String car = "";
char aux[256];

uint16_t dato = 0;
uint16_t dato_1 = 0;

uint16_t salida = 0;
int valor0 = 0;
int valor1 = 0;
int retraso = 0;
uint16_t hora = 0;
uint16_t t = 0;

uint16_t pos_elev = 0;
uint16_t pos_azim = 0;

int azimut = 0;
int elevac = 0;

uint16_t med_elev = 0;
uint16_t med_azim = 0;

uint16_t x_elev = 0;
uint16_t x_azimut = 0;

//SENALES DE CONTROL MOTOR ALTURA SOLAR
int m1 = 5;
int m2 = 6;

//SENALES DE CONTROL MOTOR AZIMUT

```

```

int m3 = 3;
int m4 = 4;

/* CONFIGURACION GENERAL GPIO, SERIAL Y SD */
void setup()
{
  // PINES I/O
  pinMode(13, OUTPUT);

  pinMode(cs, OUTPUT);
  digitalWrite(cs, 1);

  // PINES DE MOTOR
  pinMode(m1, OUTPUT);
  pinMode(m2, OUTPUT);
  pinMode(m3, OUTPUT);
  pinMode(m4, OUTPUT);

  digitalWrite(m1, 0);
  digitalWrite(m2, 0);
  digitalWrite(m3, 0);
  digitalWrite(m4, 0);

  // CONFIGURACION SPI
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV128);
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
  SPI.begin();

  // PUERTO SERIAL
  //Serial.begin(57600);

  // TARJETA SD
  if (!SD.begin())
  {

```

```

    digitalWrite(13, 1);
    return;
}
}

/* CICLO INDEFINIDO - POSICIONAMIENTO SOLAR AUTONOMO */
void loop()
{
    // LEER HORA
    generador();
    hora = ver_fecha();
    // VALIDAR QUE ESTE ENTRE LAS 6 Y 17 HORAS
    if ( (hora >= 9) && (hora <= 17))
    {
        // LECTURA DE AZIMUT - ELEVACION
        datos_trayectoria();
        // ESTABLECER POSICIÓN DEL PANEL
        posicion(elevac, azimut);
    }
    else
    {
        // Serial.println("Fuera de rango de operación - Por favor revise la
hora");
        posicion(90, 90); //POSICION INICIAL DEL PANEL
    }
    // TIEMPO DE CONTEO: t(s)=(n*200/1000)
    //Serial.println("Actualizacion en 10 minutos");
    do
    {
        t++;
        delay(200);
    }
    while (t < 3000);
    // REINICIO DE SISTEMA
    t = 0;
    hora = 0;
}

```

```

}

/* FUNCION PARA GENERACION DE DATOS: AZIMUT/ALTURA SOLAR */
void generador()
{
    delay(1000);
    system("python /media/sdcard/generador.py"); // LLamado a codigo de
python para generar datos
    delay(1000);
}

/* FUNCION PARA LECTURA DE archivo.txt (AZIMUT/ALTURA SOLAR) */
void datos_trayectoria()
{
    elevac = 0;
    azimut = 0;

    archivo = SD.open("archivo.txt", FILE_READ);
    while (archivo.available())
    {
        line = archivo.readStringUntil('\n');
    }
    archivo.close();
    delay(1);

    if (line != 0)
    {
        line.trim();
        String getA = line.substring(line.indexOf("elev") + 4,
line.indexOf("azim"));
        String getB = line.substring(line.indexOf("azim") + 4,
line.length());

        valor0 = getA.toInt();
        valor1 = getB.toInt();
    }
}

```

```

    //Serial.println(valor0);
    //Serial.println(valor1);
    delay(1);
    elevac = (float)((valor0 * 720.0 / pow(2, 24)) - 360.0);

    delay(1);
    azimut = (float)((valor1 * 720.0 / pow(2, 24)) - 360.0);
    delay(1);
    //Serial.println(elevac);
    //Serial.println(azimut);
    line = "";
}
line = "";
//SD.remove("archivo.txt"); // solo si es necesario
delay(1);
}

/* FUNCION PARA LECTURA DE archivo2.txt (FECHA/HORA) */
int ver_fecha()
{
    int lectura_hora = 0;
    archivo2 = SD.open("archivo2.txt", FILE_READ);

    while (archivo2.available())
    {
        line2 = archivo2.readStringUntil('\n');
    }
    archivo2.close();
    //Serial.print("FECHA ACTUAL: ");
    //Serial.println(line2);
    String getE = line2.substring(line2.indexOf("hora") + 4,
line2.indexOf("minut"));
    lectura_hora = getE.toInt();
    line2 = "";
    delay(1);
    return lectura_hora;
}

```

```

}

/* FUNCION PARA ESTABLECER POSICION DEL PANEL */
void posicion(uint16_t ele, int16_t azi)
{
    //Serial.print("elevacion: "); Serial.print(ele); Serial.print("
azimut: "); Serial.println(azi);
    delay(1000);

// MOVIMIENTO DE ALTURA SOLAR
pos_eleva:
    dato = read_adc(0, 1);
    for (;;)
    {
        dato = read_adc(0, 1);
        med_elev = (int)(dato*0.0615 - 37.896); //RELACION VOLTAJE - GRADOS
        //Serial.println(dato);
        if (med_elev >= 0 && med_elev <= 180)
        {
            break;
        }
        delay(10);
    }

if (ele > med_elev) //SENTIDO DE GIRO 1
{
    do
    {
        dato = read_adc(0, 1); //LECTURA ADC - CANAL 0
        for (;;)
        {
            dato = read_adc(0, 1);
            med_elev = (int)(dato * 0.0615 - 37.896); //RELACION VOLTAJE -
GRADOS
            //Serial.println(dato);
            if (med_elev >= 0 && med_elev <= 180)

```

```

        {
            break;
        }
        delay(10);
    }
    //Serial.println(dato);
    //Serial.println(med_elev);
    if (ele == med_elev)
    {
        // FRENADO
        digitalWrite(m1, 0);
        digitalWrite(m2, 0);
        break;
    }
    else
    {
        // LOGICA DE GIRO MOTOR ALTURA SOLAR
        if (ele >= 40 && ele <= 115) // PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
        {
            digitalWrite(m1, 0);
            digitalWrite(m2, 1);
        }
        else
        {
            digitalWrite(m1, 0);
            digitalWrite(m2, 0);
            break;
        }
    }
    dato = 0;
    med_elev = 0;
    delay(10);
} while (true);
}
else if (ele < med_elev) //SENTIDO DE GIRO 2

```

```

{
  do
  {
    for (;;)
    {
      dato = read_adc(0, 1); //LECTURA ADC - CANAL 0
      med_elev = (int)(dato * 0.0615 - 37.896);
      //Serial.println(dato);
      if (med_elev >= 0 && med_elev <= 180)
      {
        break;
      }
      delay(100);
    }
    //Serial.println(dato);
    //Serial.println(med_elev);
    if (ele == med_elev)
    {
      // FRENADO
      digitalWrite(m1, 0);
      digitalWrite(m2, 0);
      break;
    }
    else
    {
      // LOGICA DE GIRO MOTOR ALTURA SOLAR
      if (ele >= 40 && ele <= 115) // PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
      {
        digitalWrite(m1, 1);
        digitalWrite(m2, 0);
      }
      else
      {
        digitalWrite(m1, 0);
        digitalWrite(m2, 0);
      }
    }
  }
}

```

```

        break;
    }
}
dato = 0;
med_elev = 0;
delay(50);
} while (true);
}
else
{
}
delay(1000);

//MOVIMIENTO DE AZIMUT- CALCULO DE LA TRAYECTORIA MAS CORTA
pos_azimut:
dato_1 = read_adc(1, 1); //LECTURA ADC - CANAL 1
med_azim = (int)((dato_1 *(0.835)) - 784.73 );
Serial.println(dato_1);
if (azi > 270 && azi < 360)
{
    azi = azi-360;
}
else if(azi==360)
{
    azi=0;
}
else if(azi==270)
{
    azi=270;
}
else
{
    azi=azi;
}

//MOVIMIENTO DE AZIMUT

```

```

pose:
  if (azi >= med_azim)
  {
    do
    {
      dato_1 = read_adc(1, 1); //LECTURA ADC - CANAL 1
      med_azim = (int)((dato_1 *(0.835)) - 784.73); //RELACION VOLTAJE -
GRADOS
      Serial.println(dato_1);
      Serial.println(med_azim);
      Serial.println(azi);
      if (azi <= med_azim)
      {
        //FRENADO
        digitalWrite(m3, 0);
        digitalWrite(m4, 0);
        break;
      }
    else
    {
      //LOGICA DE GIRO MOTOR AZIMUT
      if (azi >= -85 && azi<=265 ) //PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
      {
        digitalWrite(m3, 0);
        digitalWrite(m4, 1);
      }
    else
    {
      digitalWrite(m3, 0);
      digitalWrite(m4, 0);
    }
  }
  dato_1 = 0;
  med_azim = 0;

```

```

        delay(500);
    } while (true);
}
else if (azi <= med_azim)
{
    do
    {
        dato_1 = read_adc(1, 1); //LECTURA ADC - CANAL 1
        med_azim = (int)((dato_1 *(0.835)) - 784.73); //RELACION VOLTAJE -
GRADOS
        Serial.println(dato_1);
        Serial.println(med_azim);
        Serial.println(azi);
        if (azi >= med_azim)
        {
            //FRENADO
            digitalWrite(m3, 0);
            digitalWrite(m4, 0);
            break;
        }
    }
    else
    {
        //LOGICA DE GIRO MOTOR AZIMUT
        if (azi >= -85 && azi<=265 ) //PROTECCION POR RANGO DE EXCURSION
MECANICO
        {
            digitalWrite(m3, 1);
            digitalWrite(m4, 0);
        }
        else
        {
            digitalWrite(m3, 0);
            digitalWrite(m4, 0);
        }
    }
}

```

```

        dato_1 = 0;
        med_azim = 0;
        delay(500);
    } while (true);
}
delay(10);
}

/* FUNCION DE LECTURA Y TRANSMISION DE DATOS ADC */
uint16_t read_adc(int x, int pa)
{
    uint16_t digitalvalor = 0;
    int paq = 0;
    uint16_t primeraconfig = 0;
    uint16_t primerbyte = 0;
    uint16_t segundobyte = 0;
    primeraconfig |= (x << 4);
    primeraconfig |= (3 << 2);
    if (pa == 1)
    {
        paq = cs;
    }
    else
    {
        paq = cs;
    }

    digitalWrite(paq, 0);
    primerbyte = SPI.transfer(primerconfig);
    segundobyte = SPI.transfer(0x00);
    digitalWrite(paq, 1);

    delayMicroseconds(100);

    digitalWrite(paq, 0);
    primerbyte = SPI.transfer(primerconfig);

```

```
segundobyte = SPI.transfer(0x00);  
digitalWrite(paq, 1);  
  
digitalvalor |= (primerbyte << 8);  
digitalvalor |= (segundobyte);  
  
return ((digitalvalor >> 4 ) + 1);  
}
```

ANEXO I MANUAL DE USUARIO

MANUAL DE USUARIO

REQUERIMIENTOS:

- Se debe contar con la versión software más reciente de Arduino para Intel, pero con la versión 1.6.0 funciona correctamente.
- Se debe contar con el software “PUTTY” para interactuar con el Hardware de la tarjeta Intel Edison.

Inicialmente antes de interactuar con la unidad se debe revisar que se encuentre alimentada de la red, así como sus fuentes de DC de 20 y 5 V.

Teniendo en cuenta que la unidad posee dos modos o funciones diferentes a continuación se hace énfasis en cada uno de ellos.

1. MODO DE SEGUIMIENTO ESTÁTICO O A PETICION DEL USUARIO

1.1 Se debe acceder a la caja inferior de la unidad donde se encuentra la tarjeta de desarrollo Intel Edison y cerciorarse de que el cable USB se encuentra conectado en el puerto numero 2 (ver gráfica 1), y hacer la correspondiente conexión con el computador el cual debe contener el programa “trayectoria_sol_2.ino”, archivo que se encuentra en el CD correspondiente al proyecto.

Gráfica 1. Tarjeta de desarrollo Intel Edison



- 1.2 Una vez hecha la conexión se deberá subir el programa a la tarjeta y posteriormente se ejecutará el monitor serial de Arduino. Este se encuentra habilitado para escritura
- 1.3 En el monitor serial se escribirá la posición a la que se desea llevar el panel en grados altura solar y acimut solar de la siguiente manera:

En mayúscula sin espacios escribir: **AT α BT β**

Donde “ α ” corresponde a los grados de altura solar y “ β ” los grados de acimut solar.

Por ejemplo, el usuario desea posicionar el panel a 45 grados en altura solar y 90 grados en acimut solar se escribirá como se expresa en la gráfica 2 y clic en enviar.

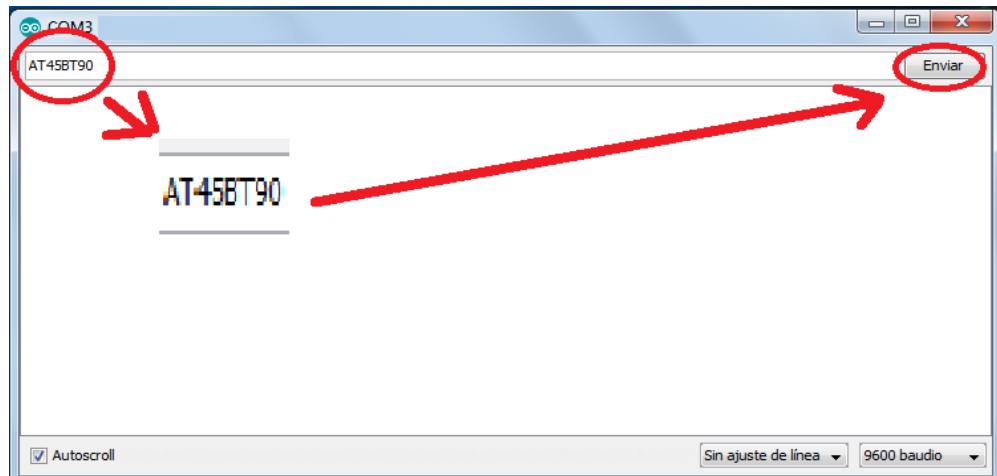
El ángulo α se referencia como 90 grados cuando se encuentra en posición totalmente horizontal, lo ángulos menores a 90 grados e ubican en la dirección de las manecillas del reloj con respecto a la referencia y lo superiores a 90 grados se ubican en el sentido contrario a las manecillas del reloj con respecto a la referencia.

Este movimiento se encuentra limitado para valores de α menores de 38 grados y mayores que 120 grados, limitante que se aplica únicamente para este modo.

El ángulo β se mide como referencia a la dirección Norte y tendrá un valor de 0 grados se incrementa en la dirección de las manecillas del reloj.

Este movimiento no posee ninguna limitante.

Grafica 2.



Una vez enviado el panel comenzara con el posicionamiento comenzando con el movimiento de altura solar seguido del movimiento acimutal, al final arrojará el mensaje “POSICIONAMIENTO COMPLETADO”.

2. MOTO DE SEGUIMIENTO AUTOMATICO.

En este caso se requiere una única conexión a internet para que el programa pueda determinar la posición del sol. Para ello se hace necesario el uso de la herramienta PUUTY.

2.1 Se debe acceder a la tarjeta Intel Edison ubicada en la caja inferior de la unidad, en la cual se debe cambiar el cable USB al puerto 1, remítase a la gráfica 1. A continuación conecte el cable USB al computador.

Comprobar en el panel de control el puerto COM al que se conectó la tarjeta.

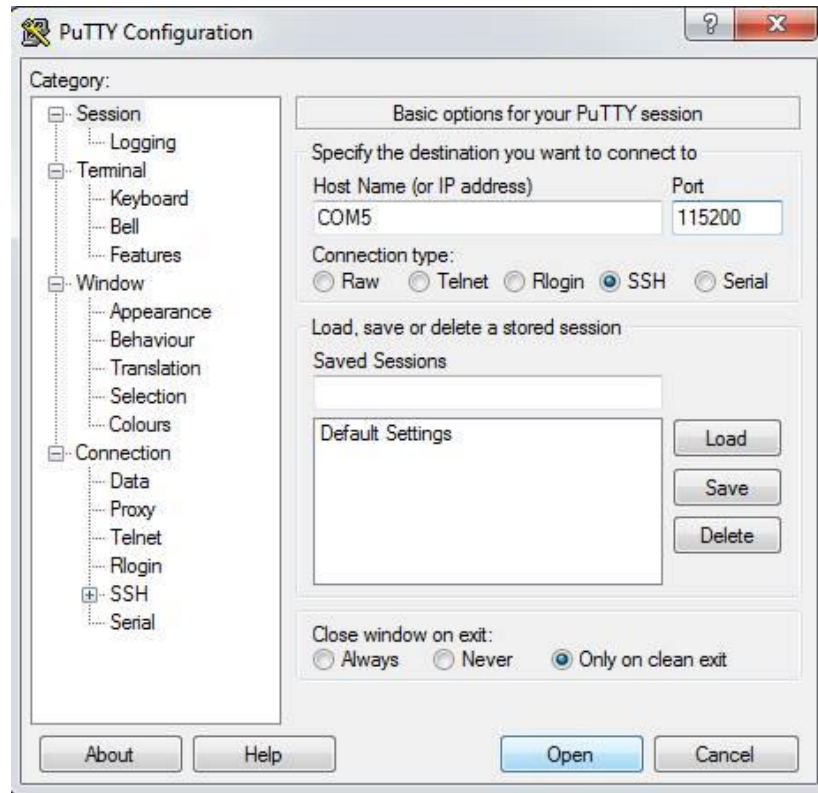
2.2 Dado que se requiere una única conexión a internet se debe acceder al módulo wifi de la tarjeta para que ella reconozca la red que el usuario desea ingresar, esto se hace mediante la herramienta PUTTY.

Se debe ejecutar Putty y en la ventana se deben ingresar los siguientes datos:

- a) Seleccionar opción serial.
- b) En la opción Serial line escribir: COM #
Donde el “#” corresponde al puerto serial al que se conectó la tarjeta.
- c) En la opción Speed escribir: 115200.
- d) Click en Open

En la Gráfica 3 se muestra este paso con la tarjeta conectada al puerto COM6.

Gráfica 3.

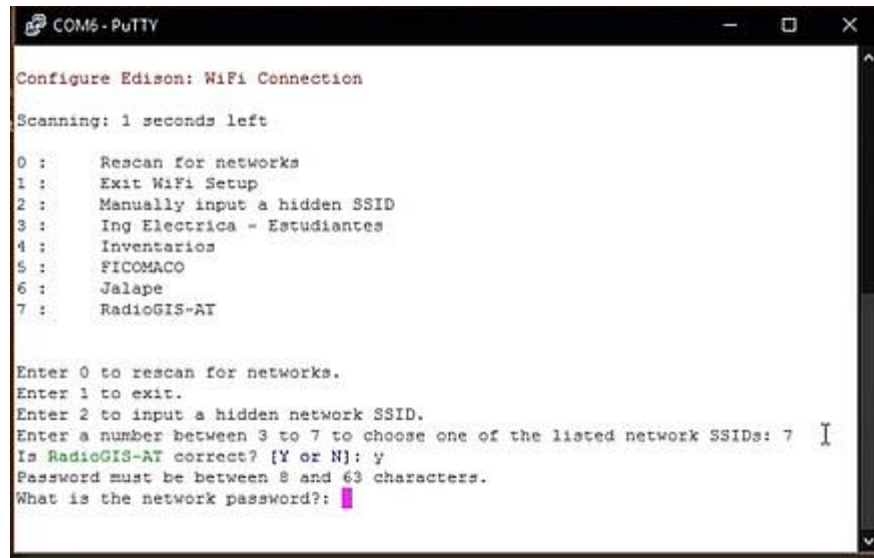


2.3 Una vez hecho esto se abrirá automáticamente la terminal del sistema embebido en la tarjeta mediante la cual accederemos al módulo wifi

2.4 A continuación se escribe el comando sin comillas: “`configure_edison --wifi`” y presionar la tecla Enter.

Automáticamente la tarjeta comenzara a escanear durante 10 segundos las redes WIFI disponibles dentro de su área de cobertura y arrojará un listado de las redes encontradas, así como se puede observar en la Gráfica 4.

Gráfica 4.



```
COM6 - PuTTY
Configure Edison: WiFi Connection
Scanning: 1 seconds left
0 : Rescan for networks
1 : Exit WiFi Setup
2 : Manually input a hidden SSID
3 : Ing Electrica - Estudiantes
4 : Inventarios
5 : FICOMACO
6 : Jalape
7 : RadioGIS-AT

Enter 0 to rescan for networks.
Enter 1 to exit.
Enter 2 to input a hidden network SSID.
Enter a number between 3 to 7 to choose one of the listed network SSIDs: 7
Is RadioGIS-AT correct? [Y or N]: y
Password must be between 8 and 63 characters.
What is the network password?:
```

Se escribe el número asignado a la red wifi a la que el usuario dese conectar la tarjeta, se presiona la tecla Enter.

La terminal preguntara si es efectivamente la red a la que se desea conectar ante lo cual se escribe la letra “Y”,se presiona la tecla enter.

Por último, la terminal solicitará la contraseña de esta red la cual se deberá escribir, se presiona la tecla Enter.

Para comprobar que efectivamente se hizo la conexión la terminal arrojará una dirección IP como la que aparece en la Gráfica 5.

Gráfica 5.

```
Password must be between 8 and 63 characters.  
What is the network password?: *****  
Initiating connection to RadioGIS-AT. Please wait...  
Attempting to enable network access, please check 'wpa_cli status' after a minute to confirm.  
Done. Please connect your laptop or PC to the same network as this device and go to http://192.168.0.102 or http://edison.local in your browser.
```

En este punto la tarjeta habrá actualizado su hora y si se desea se puede apagar el internet si se desea, esto no afectará a la tarjeta.

Sera necesario desconectar el cable USB del puerto 1 de la tarjeta y conectarlo en el puerto 2. Remítase a la gráfica1 para realizar este procedimiento.

2.5 Finalizado este proceso se procede a subir el programa “TRAYECTORIA_SOLO.ino” por medio de la plataforma arduino a la tarjeta, archivo disponible en el CD del proyecto.

Automáticamente se abrirá el monitor serial donde se escribirá la palabra en minúsculas y sin comillas “inicio”. El sistema detectará la posición del sol y el panel efectuará el posicionamiento, el cual se realizará cada 10 minutos.

Por último, se desconecta el cable el computador y se asegura la unidad

RECOMENDACIONES

- Ante una desconexión o ausencia de energía proveniente de la red eléctrica prolongada en el modo de seguimiento automático será necesario realizar el procedimiento de nuevo.
- Abstenerse de tocar la unidad cuando este ejecutando algún movimiento.