



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



“Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias”

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Uriel Aztlán Gutiérrez Belmares

TUTORES:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Pabellón de Arteaga, Ags., mayo del 2021



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR: DESARROLLO DE UN
SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI Y
FOTORRESISTENCIAS”**

Presenta:

Uriel Aztlán Gutiérrez Belmares

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Pabellón de Arteaga, Ags., mayo del 2021.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer primeramente a mis padres por su amor, dedicación, educación, ayuda y sobre todo sus grandes esfuerzos a lo largo de mi vida que me permitieron tener la gran oportunidad de concluir cada una de mis etapas como estudiante. Sobre todo, en esta última etapa de mi vida llamada “Universidad” donde los retos fueron más difíciles, pero también emocionantes y satisfactorios al estar siempre aprendiendo y vislumbrando las infinitas posibilidades que se pueden lograr con esta maravillosa carrera.

Agradezco de igual manera a mis hermanos pequeños por servirme de motor para querer algún día, de igual manera, brindarles las oportunidades de estudio superior en sus vidas.

A mis abuelos que siempre me hablaban con su gran sabiduría y alentaban en cada momento.

De igual manera reconozco y agradezco el sistema que ofrece el Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga para estudiar de buena manera en todo momento.

Hago mención a mi grupo de compañeros incluyendo a los que tristemente se quedaron en el camino, pues siempre fuimos una generación sin problemas y de un ambiente sano que muchas veces se ayudaba para este gran desafío, dejando en mí la semilla del trabajo en equipo, que es la que necesita este país.

También a los profesores que tuve en la carrera, pues algunos demuestran una gran pasión por su profesión, los cuales verdaderamente se interesan por que los estudiantes aprendan y se lleven herramientas adicionales en el camino de la vida.

Y para concluir, un agradecimiento final a mi compañero Francisco y a mi asesor Dr. José Alonso Dena, que, por medio de comunicación y trabajo en equipo, nos fue posible llevar una lista de proyectos en estos últimos semestres, los cuales me brindaron un aprendizaje extra a los programas de las materias de mi carrera.



Pabellón de Arteaga, Ags., 26/marzo/2021

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada "SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR: DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI Y FOTORRESISTENCIAS" del estudiante URIEL AZTLÁN GUTIÉRREZ BELMARES con numero de control 161050116 de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®


DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL


M. en C. VÍCTOR MANUEL HERRERA AMBRIZ
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL


M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



Pabellón de Arteaga, Ags., 29/marzo/2021

URIEL AZTLÁN GUTIÉRREZ BELMARES
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL 161050116

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: "SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR: DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI Y FOTORRESISTENCIAS", hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Exceleñcia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®



M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

RESUMEN

“SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR: DESARROLLO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO EMPLEANDO RASPBERRY PI Y FOTORRESISTENCIAS”

Por: **URIEL AZTLÁN GUTIÉRREZ BELMARES**

Un concentrador solar es un dispositivo que es capaz de orientar la radiación solar directa hacia un entorno focal de área reducida con la finalidad de obtener una cierta densidad de energía para aplicaciones térmicas domésticas, industriales o de investigación. Sin embargo, una de las dificultades que presentan estos sistemas es garantizar que, en cualquier hora del día, los rayos solares mantengan la mayor intensidad energética perpendicular posible. Para lo anterior, se han desarrollado sistemas de seguimiento solar capaces de seguir, mediante un sistema móvil mecánico y de control, el movimiento aparente del Sol y lograr que los rayos solares permanezcan aproximadamente perpendiculares en toda su trayectoria.

En el Laboratorio de Conversión de la Energía, adscrito al programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, se desarrollan proyectos relativos a la transición energética. Dentro de este contexto, se contempla la construcción de una maquina extrusora solar de plásticos de desecho que emplee un concentrador y seguidor solar para proyectar los rayos solares a la zona del barril y el husillo y lograr temperaturas de precalentamiento superiores a los 100 °C.

Considerando lo anterior, se requiere definir una adecuada metodología de diseño y construcción de un sistema mecatrónico de seguimiento solar capaz de ser integrado en una concentrador solar adaptado a una maquina extrusora solar. En este estudio se contempla únicamente la parte del sistema de control del seguidor solar.

En este trabajo, se desarrolló una metodología para diseñar y construir un sistema mecatrónico de seguimiento solar en su etapa de control empleando una placa Raspberry Pi 3 modelo B y dos fotorresistencias LDR dependientes de la luz (*light-dependent resistor*, en sus siglas en inglés) mod. GL5516 para el control de un actuador de motor a pasos lineal NEMA 17 modelo SL42STH40-1684A-23 marca Oukeda Motor. En específico, el movimiento de rotación (fotorresistencia 1/ubicación lado izquierdo/código LDR1/ giro hacia la derecha-sentido horario & fotorresistencia 2/ubicación lado derecho/código LDR2/ giro hacia la izquierda-sentido antihorario) del actuador está regulado por la diferencia o misma intensidad de luz incidente en las dos fotorresistencias. El algoritmo de control, elaborado en lenguaje de programación Python, es capaz de reconocer la intensidad de luz incidente que recibe cada fotorresistencia y enviar señales al actuador para desplazarse en uno u otro sentido. Cuando las intensidades de luz son iguales en ambas fotorresistencias, el movimiento llega a ser nulo. El arreglo obtenido simula el movimiento que tendría el equipo de seguimiento solar bajo un comportamiento de intensidad de rayos solares incidentes en las fotorresistencias.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

La propuesta de solución consistió en desarrollar un sistema mecatrónico a base de Raspberry Pi para controlar el movimiento de un actuador según la diferencia o igual intensidad de luz incidente sobre cada fotorresistencia.

Se logró (i) construir el sistema mecatrónico empleando Raspberry Pi, (ii) desarrollar el código de control en lenguaje de programación Python y (iii) reconocer la señal de las dos fotorresistencias para regular el movimiento de un actuador.

La presente Tesis es una secuencia más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis. Este trabajo es parte de un proyecto global integral de diseño y construcción de un concentrador y seguidor solar automatizado para una maquina extrusora solar. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en módulos de proceso diferentes.

Este estudio presenta los logros alcanzados de la etapa de control de un sistema de seguimiento solar. Lo anterior bajo autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

M. en C. Víctor Manuel Velasco Gallardo

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1 ENERGÍAS RENOVABLES.....	6
2.2 ENERGÍA SOLAR.....	6
2.3 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR.....	7
2.3.1 Concentradores y seguidores solares.....	8
2.3.2 Colector cilíndrico parabólico (CCP).....	12
2.4 AUTOMATIZACIÓN DE CONCENTRADORES SOLARES MEDIANTE UN SEGUIDOR SOLAR.....	13
2.5 SISTEMAS MECATRÓNICOS.....	14
2.6 FOTORRESISTENCIAS.....	15
2.7 ACTUADORES.....	16
2.8 RASPBERRY PI.....	17
2.9 PYTHON.....	20
2.10 FRITZING.....	21
2.11 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO.....	21
2.12 SISTEMA OPERATIVO RASPBIAN Y VNC VIEWER.....	23
III. METODOLOGÍA	24
3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	24
3.1.1 Diseño electrónico del sistema.....	24
3.1.2 Construcción del sistema.....	24
3.2 DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	26

	Pág.
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA.....	28
4.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.....	31
4.3 SISTEMA DE CONTROL: CÓDIGO E INTERFAZ DE CONTROL.....	38
V. CONCLUSIONES	47
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXO 1. Detalles técnicos del sistema de seguimiento solar de un solo eje de la empresa SolarFirst.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 El Sol como una energía renovable.....	6
2 Heliostato.....	7
3 Sistema solar térmico: calentador solar de tubos de vacío.....	7
4 Sistema solar fotovoltaico: panel fotovoltaico.....	8
5 Tecnologías de concentración solar.....	8
6 Concentrador solar de doble curvatura: horno solar de Odeillo.....	9
7 Concentrador solar de curvatura única: concentrador solar de canal parabólico.....	9
8 Seguimiento del sol por una placa solar.....	10
9 Equipo de seguimiento solar (tracker).....	10
10 Seguidor solar de dos ejes.....	11
11 Principio básico de funcionamiento de un seguidor por sensores.....	12
12 Sistemas de seguimiento solar: (a) de un eje, (b) de dos ejes.....	12
13 Vista de un CCP (arriba) y su esquema de funcionamiento (abajo).....	13
14 Seguidor automatizado.....	14
15 Ejemplos de sistemas mecatrónicos.....	15
16 Fotorresistencia LDR modelo GL5516.....	16
17 Motor a pasos NEMA 17 modelo SL42STH40-1684A-23.....	17
18 Conexiones de hardware para una placa Raspberry Pi.....	18
19 Placa Raspberry Pi 3 modelo B.....	18
20 Partes de una placa Raspberry Pi 3 modelo B.....	19
21 IDLE para Python.....	20
22 Diagrama elaborado en Fritzing en vista protoboard de un LED conectado a un Raspberry Pi.....	21
23 Esquema de un sistema de control.....	22
24 Sistema en lazo cerrado.....	22
25 Elementos de un sistema en lazo abierto.....	23
26 Configuración de instalación de Raspbian en Windows.....	23
27 Driver L298N Puente H.....	25
28 Convertidor analógico MCP3008.....	25
29 Protoboard grande 830p.....	25
30 Fuente de voltaje 48V 10A.....	26
31 Sistema de control en lazo cerrado del sistema mecatrónico de seguimiento.....	27
32 Diagrama electrónico del sistema de seguimiento en vista Protoboard.....	29

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

		Pág.
33	Diagrama electrónico del sistema de seguimiento en vista Esquemático.....	30
34	Diagrama de flujo del proceso completo de funcionamiento del sistema mecatrónico de seguimiento.....	31
35	Vista completa de la estación de trabajo (PC, placa Raspberry Pi, fuente, actuador, driver puente H y elementos electrónica modular).....	32
36	Vista lateral de la estación de trabajo.....	32
37	Interfaz (IDE).....	33
38	Raspberry en funcionamiento y en comunicación con actuador y Pc (luz verde y roja).....	33
39	Protoboard receptor de señales de fotorresistencias y alojamiento de convertidor analógico.....	34
40	Interfaz protoboard analógico y Raspberry Pi.....	34
41	Protoboard de drive puente H.....	35
42	Fotorresistencia LDR1 (adjunto al protoboard del puente H).....	35
43	Fotorresistencia LDR2 (adjunto al protoboard del convertidor analógico).....	36
44	Motor NEMA 17 de estudio: vista lateral (izq.) y vista alzada (der.).....	36
45	Corriente de alimentación requerida para el motor NEMA 17 (5.13V).....	37
46	Encendido LED amarillo-indicativo de activación de LDR1 al recibir mayor cantidad de luz....	37
47	Encendido LED verde-indicativo de activación de LDR2 al recibir mayor cantidad de luz.....	38
48	Motor estático-misma intensidad de luz recibida en LDR1 y LDR2. Diferencia de cero entre los fotosensores-valores de 0.....	43
49	Motor estático-misma intensidad de luz recibida en LDR1 y LDR2. Diferencia de cero entre los fotosensores-valores de 1.....	43
50	Motor estático-misma intensidad de luz recibida en LDR1 y LDR2. Diferencia de dos entre los fotosensores-valores de -4 y-6 respectivamente (debido a la sensibilidad de cada sensor).....	44
51	Motor activado. LDR2 recibe mayor cantidad de luz y por tanto su resistencia disminuye (880). El actuador gira en sentido antihorario.....	44
52	Motor activado. LDR1 recibe mayor cantidad de luz y por tanto su resistencia disminuye (905). El actuador gira en sentido horario.....	45
53	Maquina extrusora solar: posición del concentrador solar (recuadro rojo).....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Pines GPIO en BCM2835 y su descripción.....	19
2	Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 3 modelo B.....	20
3	Descripción completa de los elementos que integran el sistema mecatrónico de seguimiento...	24
4	Identificación de parámetros de giro cada fotorresistencia.....	27
5	Interfaz de conexiones de pines GPIO del sistema mecatrónico de seguimiento.....	28

NOMENCLATURA

LDR	Dependiente de la luz (<i>ligh-dependent resistor</i> , en sus siglas en inglés).
Tracker, tracking, sun tracking	Sistema de seguimiento solar en sus siglas en inglés.
CCP	Colector cilíndrico parabólico o colector solar cilíndrico parabólico.
PLC	Controlador Lógico Programable.
Fotorresistor, fotosensor	Fotorresistencia.
ARM	<i>Arcon RISC Machine</i> , en sus siglas en inglés.
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> , en sus siglas en inglés.
IDLE	Entorno de desarrollo integrado de Python.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel global y debido al agotamiento de los combustibles fósiles, se han estado impulsando políticas para incrementar las inversiones en fuentes de energías renovables.^{1, 2} Una de estas fuentes es la energía solar, la cual se considera como una energía renovable obtenida a partir de la radiación del Sol, que se puede generar donde se consume eliminando las líneas de transmisión y que se puede emplear para el funcionamiento de sistemas térmicos como un calentador solar, sistemas fotovoltaicos para generar electricidad, dispositivos termo solares como los hornos y cocinas solares o concentradores solares por los beneficios ambientales, sociales y económicos que conlleva, entre estos, podemos mencionar que es energía que se genera y consume *in situ*, fomenta la independencia energética nacional, propicia la generación de empleos y reduce la factura de consumos en energía de los usuarios finales.^{3,4}

En particular, los concentradores solares son dispositivos que captan la radiación solar y la transmiten hacia un fluido u objeto pudiendo ser de acumulación o de concentración de energía. Los de concentración de energía se caracterizan por aumentar la temperatura superficial de un objeto absorbente mediante la radiación solar directa sobre él. Sin embargo, presentan el inconveniente de ser estacionarios y, según la posición del Sol durante el día, será la intensidad de radiación que reciba. Para solventar lo anterior, se sugiere el uso de un sistema de seguimiento solar capaz de buscar la posición del Sol en cualquier momento del día.^{5, 6}

En el Laboratorio de Conversión de la Energía adscrito al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga se desarrollan proyectos de investigación, tecnológicos o de innovación relativos a la línea de generación y aplicación del conocimiento conversión de la energía. Uno de estos proyectos se refiere a la construcción de una maquina extrusora solar de plásticos de desecho que emplee un concentrador y seguidor solar para proyectar los rayos solares a la zona del barril y el husillo y lograr temperaturas de precalentamiento superiores a los 100 °C.

En este marco, se han reportado varios trabajos de diseño y construcción de un sistema de seguimiento solar. Por ejemplo, Machado-Toranzo *et al.*,⁷ presentan un diseño e implementación de un seguidor solar de dos ejes por punto luminoso. En la parte de control desarrollan el algoritmo en lenguaje C++ mediante el software MPLAB y emplean una tarjeta controladora con un microcontrolador PIC 18F1320 para controlar el movimiento de motores a pasos modelo ST35 y reconocer la señal de 2 fotosensores. Escobar-Mejia *et al.*,⁸ diseñan un seguidor solar para un panel fotovoltaico donde la perpendicularidad de la radiación solar se logra por medio de un algoritmo desarrollado en lenguaje C usando CODE WARRIOR y empleando un microcontrolador MC68HC908GP32 para controlar un motor a pasos para el movimiento del panel. Villeda *et al.*,⁹ fabrican un seguidor solar de dos ejes para un heliostato de un horno solar. Utilizan motores a paso para el movimiento del sistema, los cuales son controlados por un microcontrolador conforme una secuencia de coordenadas alimentadas por el algoritmo desarrollado en

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

lenguaje de programación visual. De La Cruz-Casaño,¹⁰ presentan un trabajo donde el sistema de control de un seguidor solar lo realiza empleando un programador lógico programable (PLC) y un algoritmo adaptativo basado en el modelo de la trayectoria del Sol y fotorresistencias. Arreola-Gómez *et al.*,¹¹ reportan el diseño y construcción de un sistema de seguimiento autónomo acoplado a un panel fotovoltaico y controlado por medio de un algoritmo desarrollado en lenguaje C, microcontrolador PIC18F4553, sensores tipo ACS712, un *datalogger* tipo CR1000, motores modelo ERU-B2. Díaz-Velilla,¹² desarrollan un prototipo mecatrónico de un seguidor solar basado en Arduino Mega 2560 comunicado con servomotores HD-9150 MG, un actuador lineal L12-100-1006Rm driver doble puente H, entre otros elementos.

Aunado a lo anterior y específicamente en trabajos donde se emplea la placa Raspberry Pi, podemos mencionar algunos como el reportado por Castellano-Narváez & Valencia-Jumbo,¹³ desarrollan un prototipo para adquirir y monitorear datos de la captación de radiación solar. El sistema realiza la adquisición, almacenamiento, monitoreo y presentación de datos meteorológicos. Emplean un *datalogger* CR1000 y un PLC más el establecimiento de un algoritmo elaborado en Python y alojado en un Raspberry Pi 3 B+. Sánchez-Moreno & Torres-Muñoz,¹⁴ diseñan e implementan un sistema de energía solar con control de iluminación automático empleando un controlador Raspberry Pi B+ para el control de los sensores de iluminación y movimiento elaborando el código de implementación en Python. De forma más asertiva, la mini PC Raspberry Pi también ha sido estudiada en la aplicación de los sistemas de control de seguidores solares. Hernández-Velázquez,¹⁵ reportan un trabajo de seguidor solar para orientar un panel fotovoltaico y otros elementos de medición solar mediante servomotores y una tarjeta electrónica Raspberry Pi 3 B+ y utilizando un código elaborado en Raspbian. Tovar-Ruiz,¹⁶ logra el diseño, implementación y toma de datos de un seguidor solar para el movimiento de un panel fotovoltaico. Emplean la placa Raspberry Pi 3 para poder interactuar con la nube. En este caso la placa Raspberry Pi funge como el medio de conectividad para en tiempo real actualizar la orientación del sistema. Aunque emplean también otros microcontroladores Arduino para controlar el movimiento de los actuadores.

Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

1.- Desarrollo de un sistema de control de un sistema de seguimiento solar:

- Diseñar y construir un sistema mecatrónico empleando Raspberry Pi para el control de actuadores conforme las señales de dos fotorresistencias.
- Elaboración de un algoritmo de programación en lenguaje Python para interfaz del ordenador.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

Por consiguiente, se contempla obtener un sistema mecatrónico de seguimiento solar utilizando Raspberry Pi. Para este estudio se visoria el uso de una placa Raspberry Pi 3 modelo B, dos fotorresistencias LDR GL5516, un motor a pasos lineal NEMA 17 modelo 42STH40-1684A-23, un driver L298N puente H y demás elementos de electrónica modular.

La propuesta de solución consistió en desarrollar un arreglo mecatrónico, de tal manera que las señales emitidas por las dos fotorresistencias, según la intensidad de luz recibida, sean constantemente comparadas y dictaminen el sentido de giro del actuador (fotorresistencia 1/ubicación lado izquierdo/código LDR1/giro hacia la derecha-sentido horario & fotorresistencia 2/ubicación lado derecho/código LDR2/giro hacia la izquierda-sentido antihorario) a través de la comunicación y control con la tarjeta Raspberry Pi.

La presente Tesis es una secuencia más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis.

Este trabajo es parte de un proyecto global integral de diseño y construcción de un concentrador y seguidor solar automatizado para una maquina extrusora solar. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en módulos de proceso diferentes.

Este estudio presenta los logros alcanzados de la etapa de control de un sistema de seguimiento solar. Lo anterior bajo autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema mecatrónico de seguimiento solar mediante un sistema de control conformado por una tarjeta Raspberry Pi programada en Phyton y dos fotorresistencias para su implementación en un concentrador solar.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar los diagramas electrónicos mediante software de automatización para validar el funcionamiento del sistema mecatrónico previo a su construcción.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

- Construir el sistema mecatrónico mediante la implementación de un ordenador Raspberry Pi y dos fotorresistencias para controlar el movimiento de un actuador (en sentido horario-fotorresistencia 1 y anti-horario-fotorresistencia 2).
- Elaborar el código de programación por medio de lenguaje Python para controlar el movimiento de un actuador según la intensidad de luz incidente en cada fotosensor.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas se ha impulsado el desarrollo de nuevas fuentes de energía capaces de sustituir el consumo de combustibles fósiles. Entre estas nuevas fuentes de energía podemos mencionar la energía solar. En general, este tipo de energía se caracteriza por ser obtenida a partir de la radiación del Sol y es empleada comúnmente para generar calor o electricidad. Para lo anterior se han empleado diversos dispositivos como los son paneles fotovoltaicos, calentadores solares, hornos o estufas solares, o concentradores solares. En específico, un concentrador solar capta la radiación solar y la transmite hacia un recipiente absorbente provocando un aumento de su temperatura. Sin embargo, su eficiencia es dependiente de la posición del Sol durante el día, por lo que se han desarrollado sistemas de seguimiento solar automatizados que permiten otorgar movilidad al concentrador y por tanto poder seguir el movimiento del astro en cualquier momento del día.

Para el diseño y construcción de un seguidor solar, se considera habitualmente un sistema de control a base de microprocesadores, actuadores y demás elementos mecánicos y eléctrico-electrónicos. Dentro de este panorama se han empleados placas Arduino en su mayoría y escasamente tarjetas Raspberry Pi.

Debido a las ventajas de procesamiento que una placa Raspberry Pi ofrece, se propone el diseñado de un sistema mecatrónico para controlar el movimiento de giro de un actuador (en sentido horario-fotorresistencia 1 y anti-horario-fotorresistencia 2) conforme la intensidad de luz que incide sobre dos fotorresistencias. El estudio se enfocó a desarrollar el algoritmo de control y la correcta respuesta del sistema para actuar conforme la radiación de luz sobre ambos fotosensores.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible desarrollar un sistema mecatrónico de seguimiento solar empleando una minipc Raspberry Pi para controlar el movimiento de un actuador conforme la diferencia o igual intensidad de luz incidente en dos fotorresistencias.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

El alcance del proyecto solo abarca el diseño y construcción del sistema mecatrónico a escala laboratorio y su correcta capacidad de respuesta (código) para el control de un actuador según la incidencia de luz sobre dos fotorresistencias.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

Para el diseño y cálculo del sistema, ninguna ecuación de diseño de (i) geometría o trayectoria solar, (ii) de parámetros de orientación solar, (iii) orientación azimut o de elevación, (iv) pruebas ópticas, (v) de trazado de rayos, (vi) teoría de la superficie o (vii) ley de reflexión especular fueron empleadas. Simplemente el sistema se ajustó a la respuesta que las dos fotorresistencias envían al actuador para realizar un movimiento de ajuste de giro.

El algoritmo de control fue elaborado únicamente en lenguaje Phyton.

Esta fuera de alcance implementar el sistema mecatrónico desarrollado en un concentrador solar.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables pretenden ser una solución, al menos parcial, para el abastecimiento futuro de energía en lugar de los combustibles fósiles (gas, carbón, petróleo, uranio). Una definición de ellas, se refiere a que son un tipo de energía que se obtiene de corrientes de energía continuas y recurrentes en el mundo natural. Una definición más técnica comprende a que son un tipo de flujo directo de energía a partir de fuentes naturales como el Sol, ver Figura 1 (fuente: *saveenergysolar.com*). Dentro de estas energías podemos mencionar la radiación fotónica incidente sobre la tierra (energía solar), la energía potencial de cuerpos de agua almacenados, las cuales junto a la energía cinética de corrientes de agua a diferentes alturas pueden ser aprovechadas en plantas hidroeléctricas (energía hidráulica), o las energías cinéticas de corrientes de aire (energía eólica), entre otras.¹⁷



Figura 1. El Sol como una energía renovable.

2.2 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una energía renovable obtenida a partir de la radiación del Sol, por lo que se considera como una fuente natural e inagotable. Se puede clasificar en varios tipos como son la energía solar térmica, la cual aprovecha la energía del sol para producir calor; la energía solar fotovoltaica, la cual permite generar electricidad a partir de la radiación solar. Para aprovechar este tipo de energías solares, se han desarrollado diferentes dispositivos que la recogen y tratan como lo son los colectores solares, los cuales permiten obtener fluidos calientes, los paneles fotovoltaicos que permiten obtener electricidad o los heliostatos (conjuntos de espejos) o concentradores solares (de tipo canal parabólico) que permiten orientar y mantener la radiación solar sobre un punto e incrementar su temperatura.¹⁸ En la Figura 2, se presenta una imagen de un heliostato (fuente: *solar-energia.net*).



Figura 2. Heliostato.

2.3 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR

La energía del Sol (radiación solar) llega a la Tierra de una manera muy dispersa, con oscilaciones y en cantidades diferentes según factores como la hora del día, la ubicación geográfica, las condiciones climáticas y la estación del año. Lo anterior propicia que la constante solar de 1353 W/m^2 (cantidad máxima de radiación solar que puede recibir una superficie perpendicular a los rayos solares) pueda disminuir hasta los 900 W/m^2 . Ante esto, se han desarrollado tecnologías o sistemas de aprovechamiento de la energía solar como lo son los sistemas solares térmicos y los sistemas fotovoltaicos, los cuales son tecnologías de bajas temperaturas (menor a $100 \text{ }^\circ\text{C}$) y que son los que mayormente encontramos en la actualidad en el mercado.¹⁹ En la Figura 3, se muestra un calentador solar como ejemplo de un sistema solar térmico (fuente: *cemaer.org*). En la Figura 4, se presenta un panel fotovoltaico ejemplificando un sistema solar fotovoltaico (fuente: *risingsunchile.cl*).



Figura 3. Sistema solar térmico: calentador solar de tubos de vacío.



Figura 4. Sistema solar fotovoltaico: panel fotovoltaico.

Mas, sin embargo, se han explorado más aplicaciones de la energía solar como lo son los sistemas de media y alta temperatura, y entre ellos podemos mencionar los concentradores solares.

2.3.1 Concentradores y seguidores solares

Los concentradores solares son tecnologías de media y alta temperatura que permiten alcanzar temperaturas entre 100 y 250 °C, aunque si son varios los empleados y dirigidos a un mismo punto se pueden alcanzar temperaturas alrededor de las 2000 °C (centrales termoeléctricas). Estos sistemas emplean espejos parabólicos, lentes o materiales con superficie tipo espejo para concentrar la radiación solar. Los más empleados son los captadores cilindro-parabólicos que se valen de espejos o alguna superficie reflejante tipo espejo para orientar los rayos solares hacia un punto focal e incrementar su gradiente de temperatura. En la Figura 5, se visualizan como se orientan los rayos solares en los diversos sistemas de concentración solar.²⁰

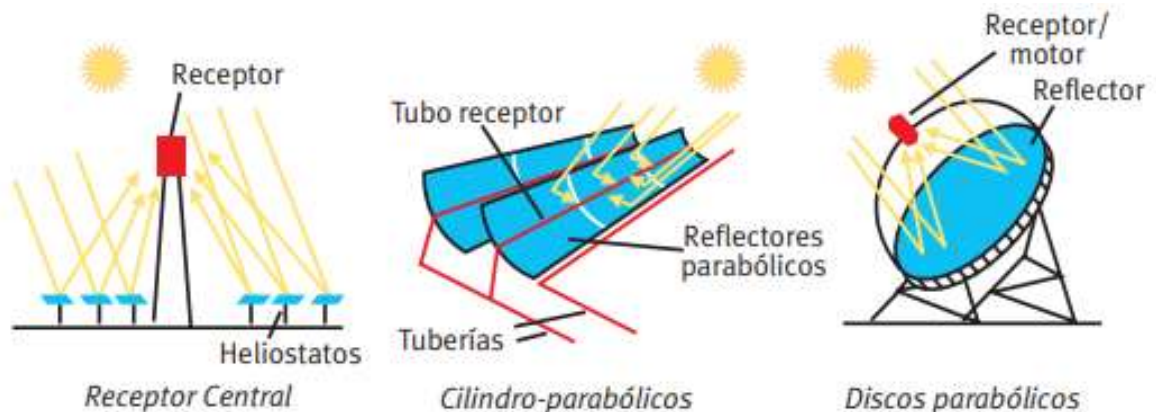


Figura 5. Tecnologías de concentración solar.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

Un concentrador típicamente emplea una superficie reflectante parabólica donde el objetivo es concentrar los rayos solares en un receptor de tamaño contenido (entorno focal). Se reconocen concentradores solares parabólicos cilíndricos y paraboloides de revolución. Los primeros tienen una curvatura única y llegan a producir temperaturas entre 200-300 °C. Los segundos tienen una doble curvatura y permiten alcanzar temperaturas superiores a los 3000 °C.²¹ En la Figura 6, se observa un concentrador paraboloide de revolución (horno solar ubicado en Odeillo, Francia). En la Figura 7, se muestra un concentrador parabólico cilíndrico desarrollado por el INEEL, Morelos, México.



Figura 6. Concentrador solar de doble curvatura: horno solar de Odeillo.



Figura 7. Concentrador solar de curvatura única: concentrador solar de canal parabólico.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

Sin embargo, los concentradores solares únicamente aprovechan la radiación directa, por lo que requieren tener un seguimiento continuo del Sol. Para lo anterior, es común emplear equipos de seguimiento de dos movimientos: norte-sur o este-oeste que permitan garantizar que los rayos solares ingresen en modo paralelo al eje del paraboloide.^{20, 22} En la Figura 8, se aprecia el principio básico de un seguidor que se mueve conforme la posición del Sol (fuente: *lbaindustrial.com.mx*). En la Figura 9, se muestra un aparato de seguimiento solar insertado en un sistema fotovoltaico (fuente: *biodiesel.com.ar*).

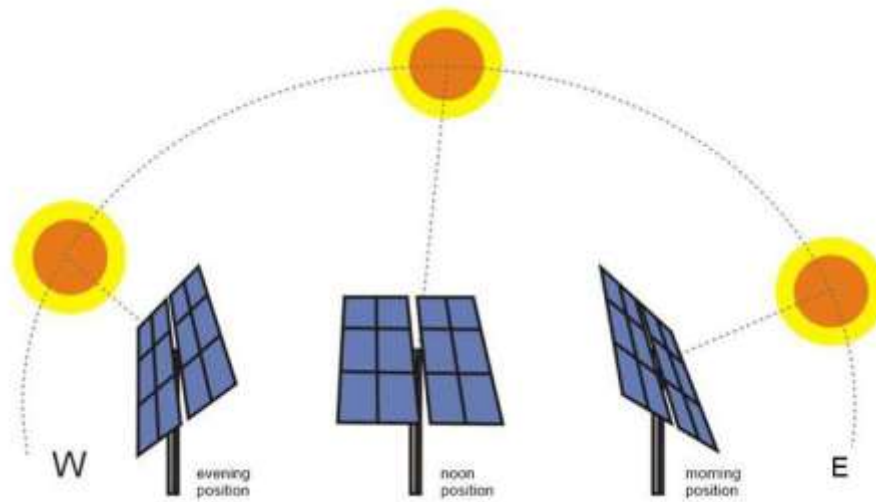


Figura 8. Seguimiento del sol por una placa solar.



Figura 9. Equipo de seguimiento solar (tracker).

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

En concentradores de tamaño pequeño, se emplean comúnmente sistemas de tracking montado directamente en el concentrador, caso contrario, para sistemas más grandes la tecnología debe ser más compleja.²²

Para poder realizar el seguimiento del Sol se emplean comúnmente sensores de radiación o mediante el empleo de algoritmos basados en astronomía solar. En el caso de los sensores, su empleo es dependiente del uso de energía para poder funcionar y detectar la irradiación que reciben. Para el caso de los algoritmos, se emplean lenguajes de programación que consideran el uso de variables relativos a la ubicación geográfica y al periodo temporal de tal manera que las instrucciones emitidas por el algoritmo logran mover la estructura de soporte empleada. Específicamente, el control de seguidores solares por sensores considera la puesta de los mismos a lo largo de la placa solar de tal manera que detecten si los rayos solares inciden perpendicularmente sobre ellas. Los sensores ordenan al sistema mecánico empleado (conjunto integrado de motores, engranes, cadenas o correas) a mover las placas para que estén orientadas siempre de manera perpendicular. Los seguidores solares pueden ser un solo eje, es decir de un grado de libertad, con movimiento horizontal azimut de este a oeste (de 0 a 180 °) donde el movimiento vertical de la elevación se mantiene en un ángulo fijo. Los seguidores de dos ejes poseen dos grados de libertad, donde además del movimiento azimutal se otorga movimiento de elevación de norte a sur. Siendo los de dos ejes los más implementados debido a que permite ubicar la placa frente al Sol girando alrededor de su eje azimut y elevando la inclinación de la placa a la altitud a la que se encuentra el Sol.²³ En la Figura 10, muestra un mecanismo de dos ejes adaptado a un panel solar y en la Figura 11, se ejemplifica como un mecanismo de sensores genera un sentido de giro del sistema.²⁴ En la Figura 12, se representan los movimientos de un seguidor de 1 y 2 ejes.²⁵



Figura 10. Seguidor solar de dos ejes.

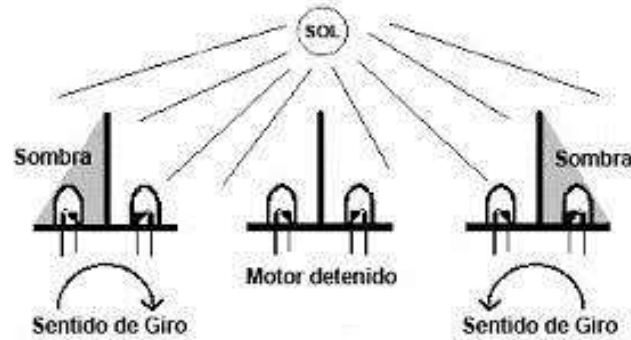


Figura 11. Principio básico de funcionamiento de un seguidor por sensores.

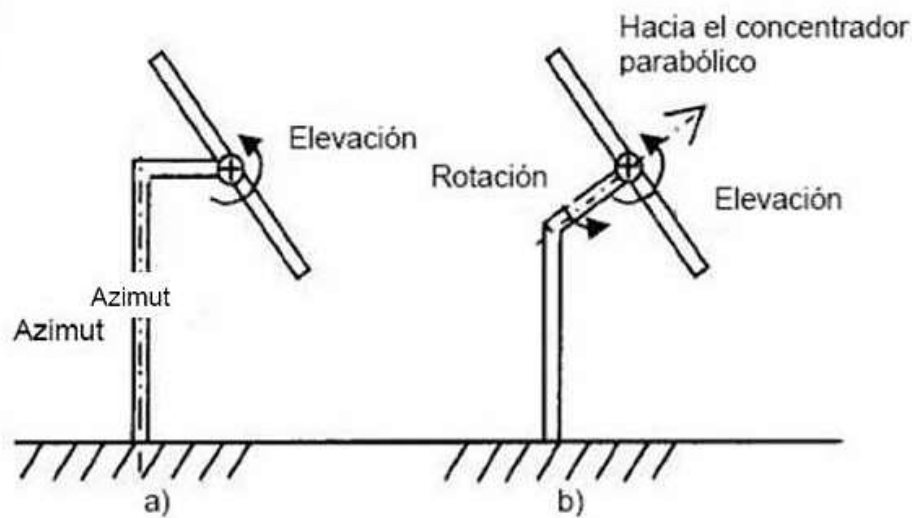


Figura 12. Sistemas de seguimiento solar: (a) de un eje, (b) de dos ejes.

2.3.2 Colector cilíndrico parabólico (CCP)

Un colector cilíndrico parabólico (CCP) está formado por un objeto parabólico capaz de captar la radiación solar. El CCP puede ser de material de espejo, plateado o revestido con aluminio pulido. Posee la característica de tener un tubo ubicado en su foco lineal en toda su longitud y el cual recibirá la radiación solar. Dentro de este tubo convencionalmente circula un fluido que absorberá el calor generado por el sistema. Puede ser parabólico abierto o cerrado con tapa.²⁶ A los CCP se les pueden integrar sistemas de seguimiento solar. En la Figura 13, se muestra un equipo CCP y su principio de funcionamiento en relación a como los rayos solares se proyectan hacia un entorno focal (fuente: concentrationsolar.org.mx).

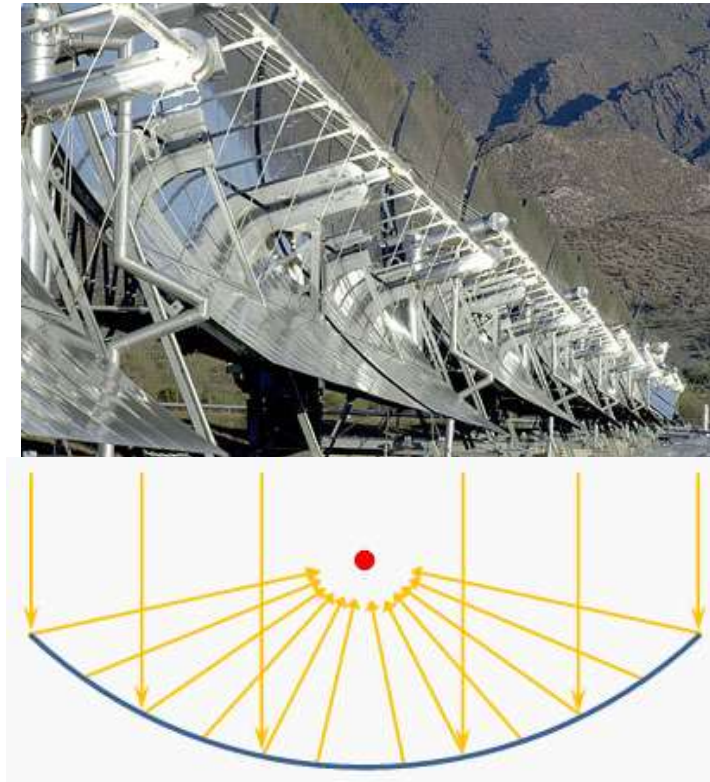


Figura 13. Vista de un CCP (arriba) y su esquema de funcionamiento (abajo).

2.4 AUTOMATIZACIÓN DE CONCENTRADORES SOLARES MEDIANTE UN SEGUIDOR SOLAR

Un sistema de seguimiento solar, también conocido como *Sun Tracking* o simplemente *tracking*, puede ser integrado en la estructura de un CCP para otorgarle movimiento. El *tracking* se conforma principalmente de un motor asociado a un ordenador que contiene un programa con instrucciones que permiten hacer ajustes a la posición del CCP de acuerdo al movimiento del Sol para seguirlo o conforme la fecha y hora del día. Gracias al *tracking* se logra un aumento del 30 al 40% de la energía captada por un CCP en relación a uno sin movilidad. Un control de seguimiento automatizado eficiente debe lograr un desplazamiento alrededor de $15^\circ/\text{hora}$ o de $0.25^\circ/\text{minuto}$ bajo intervalos de tiempo calculados para lograr disminuir el error de movimiento según se mueva el Sol.²⁶

Un ejemplo de control de seguimiento mediante algoritmo para un CCP se ha presentado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de Almería, España, por medio de la Plataforma Solar de Almería (www.psa.es), en el cual utilizan como variable el tiempo y como constantes la longitud y latitud del lugar. Emplean un Controlador Lógico Programable (PLC) para habilitar que el software logre localizar la posición del Sol.²⁶

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

Dentro de este contexto, se puede programar el código de seguimiento como un sistema de lazo abierto o de lazo cerrado. Los de lazo abierto, no requieren de una realimentación de la posición del Sol dado que los sensores aseguran que el motor del seguidor se coloque adecuadamente mediante ángulos pre calculados, los cuales son obtenidos de un algoritmo según la fecha, la hora y las coordenadas del lugar. En la Figura 14, se muestra un seguidor solar de lazo abierto. Los de lazo cerrado, producen un seguimiento optimo pues cuenta con una realimentación, aunque pueden perder esta señal si las nubes bloquean al Sol.²⁶

En el Anexo 1, se presenta información técnica de un sistema de seguimiento solar disponible en el mercado solo como referencia de éxito de estos sistemas.

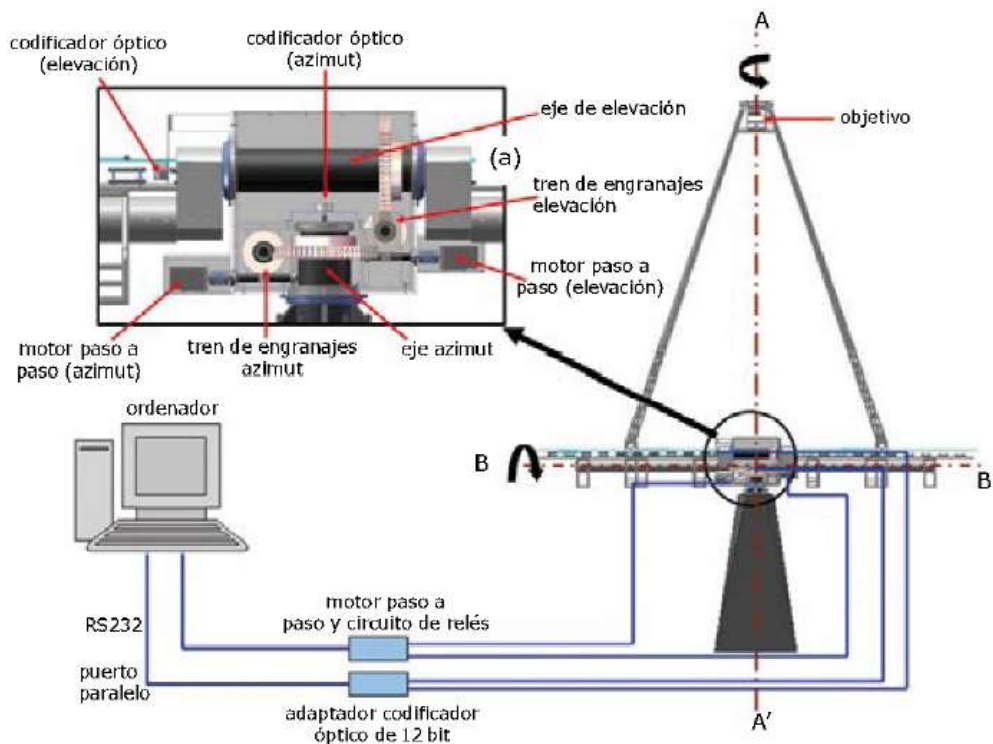


Figura 14. Seguidor automatizado.

2.5 SISTEMAS MECATRÓNICOS

Un sistema mecatrónico se compone de varios elementos mecánicos, electrónicos e informáticos que consideran demás elementos de control para realizar la automatización de un proceso. El objetivo de un sistema mecatrónico es realizar una función específica y consisten de una parte mecánica formada por servoactuadores, servomotores, controladores, dispositivos de acondicionamiento, procesamiento y control de la señal, dispositivos de interfaz, fuentes de energía, equipo digital y programación. El diseño de un sistema mecatrónico considera el tipo de señales de entrada y salida, sensor o transductor a emplear, el voltaje de alimentación y su relación con los procesos térmicos entre sus componentes mecánicos. Un sistema mecatrónico está basado en microprocesadores,

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

los cuales están integrados y diseñados para controlar una gama de funciones y están programados de tal manera que el usuario final no puede alterarlos. Se puede decir que las partes esenciales de un sistema mecatrónico son los sensores, el control y actuadores. Los sensores interpretan el exterior y logran convertir señales analógicas en eléctricas para que la etapa de control las pueda procesar. El control se refiere al centro de control del sistema mecatrónico para procesar las señales eléctricas y realizar una toma de decisión. Finalmente, los actuadores o transductores son los dispositivos que ejecutan la información obtenida ya que transforman la energía eléctrica de entrada en otra energía como por ejemplo la mecánica.^{27, 28} En la Figura 15, se presentan varios ejemplos de sistemas mecatrónicos (fuente: *adrian-mecatronica.blogspot.com*).



Figura 15. Ejemplos de sistemas mecatrónicos.

2.6 FOTORRESISTENCIAS

Las fotorresistencias, también llamadas fotorresistores o fotosensores, trabajan bajo el principio del efecto fotoeléctrico. Este fenómeno se produce cuando los fotones de la luz chocan contra los electrones de un metal y logran liberarlos de tal manera que se genera una corriente eléctrica. Una fotorresistencia convencional posee una resistencia interna (semiconductor de alta resistencia fabricado en sulfuro de cadmio) la cual aumenta o disminuye dependiendo de la luz que este incidiendo sobre ella, esto es, cuando la resistencia disminuye significa que hay un aumento en la intensidad de la luz que recibe, caso contrario, la resistencia aumenta cuando la luz disminuye.^{29, 30}

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

Los fotosensores más comunes son los de resistencia dependiente de la luz, LDR (*light-dependent resistor*, en sus siglas en inglés), cuyas características, entre otras, son que poseen un tiempo de respuesta de una décima de segundo, valores de resistencia en la oscuridad del orden de $1\text{ M}\Omega$ o más, valores de resistencia con luz brillante en el orden de los 100Ω . Cuando los fotones inciden en el LDR, son absorbidos por el material semiconductor y esto otorga energía a los electrones para moverse fuera de la banda de conducción volviéndose un conductor eléctrico propiciado que el valor de la resistencia disminuya.²⁹ En la Figura 16, se presenta un esquema de un fotorresistor LDR modelo GL5516 (fuente: *electrocrea.com*). Las fotorresistencias de la serie GL55 es una resistencia fabricada de un material semi-conductor de sulfuro de cadmio donde la conductancia cambia según la variación de luminancia y es ampliamente utilizada en la industria del juguete, fabricación de lámparas y cámaras, entre otras. El fotorresistor GL5516 puede trabajar con un voltaje máximo de 150 y una potencia máxima de 90 en temperaturas ambientes de -30 a 70 .³¹

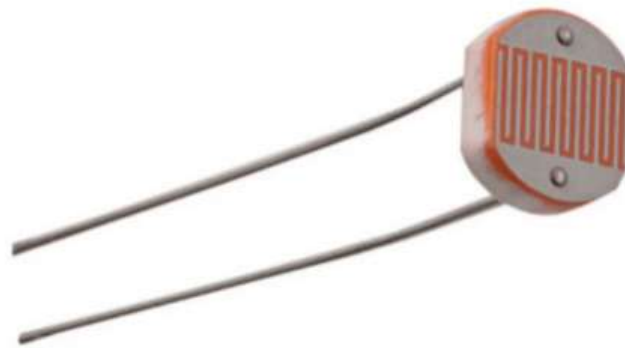


Figura 16. Fotorresistencia LDR modelo GL5516.

2.7 ACTUADORES

Un actuador es un motor que puede ser del tipo eléctrico, lineal o rotatorio según la fuente de energía.³² Es un dispositivo capaz de generar el movimiento de demás elementos según una serie de instrucciones dadas por la unidad de control.³³ Los motores paso a paso son del tipo eléctrico y son actuadores electromecánicos que requiere de un flujo eléctrico para funcionar y convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares (pasos) del eje motriz dependiendo de las entradas de control.³² En el motor a pasos la señal de control son trenes de pulsos donde cada pulso recibido le indica al rotor del motor girar a un determinado sentido.³³

El motor a pasos NEMA 17 modelo SL42STH40-1684A-23 es un actuador híbrido empleado para máquinas CNC generales, con punta de rotor en media luna, de 4 cables y de 1.8° por paso por lo que se puede utilizar con controladores de motores como Arduino o Raspberry, ver Figura 17 (fuente: *electrocrea.com*).



Figura 17. Motor a pasos NEMA 17 modelo SL42STH40-1684A-23.

2.8 RASPBERRY PI

Raspberry Pi es un ordenador de diferentes modelos con conectividad Bluetooth e inalámbrica capaz de realizar funciones similares a los de un procesador de equipo de cómputo de escritorio. Puede ejecutar programas y conectarse a la red ya que trabaja con un procesador que dispone de una arquitectura ARM (*Arcon RISC Machine*, en sus siglas en inglés), memoria RAM, pines de conexión GPIO (*General Purpose Input/Output*, en sus siglas en inglés) y diversos conectores para audio y video, ver Figura 18.^{34,35} En la Figura 19, se presenta una placa Raspberry Pi 3 modelo B (fuente: *raspberrypi.org*). En la Figura 20, se muestra los elementos que componen una placa Raspberry Pi modelo B.³⁴

Los pines GPIO permiten comunicarse con demás dispositivos electrónicos para controlarlos o para recabar información (por ejemplo, actuadores o sensores). En total son 40 pines que se pueden programar mediante software para recibir señales de entrada y salida, así como periféricos. Del total 26 son para la GPIO y el resto pines de alimentación o tierra.^{34,35}

En la Tabla 1, se muestra la descripción de los pines y su comunicación con el microprocesador BCM2835 que tiene integrada la placa.³⁴ En la Tabla 2, se presentan las características técnicas de la placa Raspberry Pi 3 modelo B.³⁴

Los pines GPIO se pueden programar mediante diversos softwares y lenguajes de programación como Python, Java, C, C++, entre otros.³⁴

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

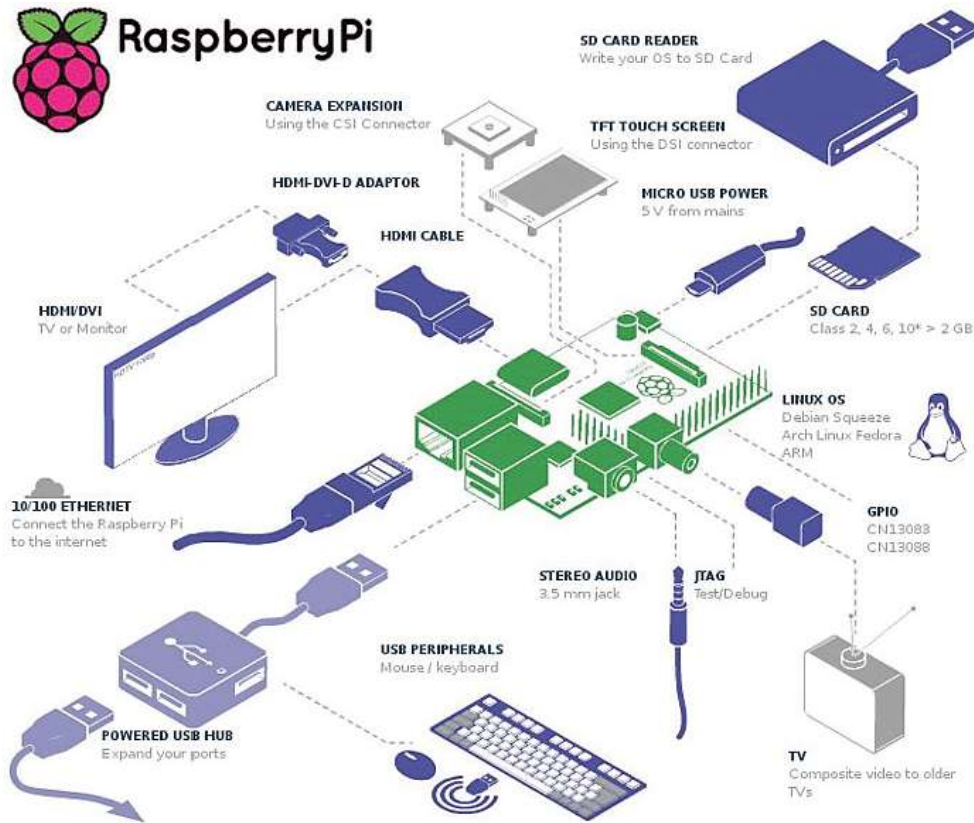


Figura 18. Conexiones de hardware para una placa Raspberry Pi.



Figura 19. Placa Raspberry Pi 3 modelo B.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

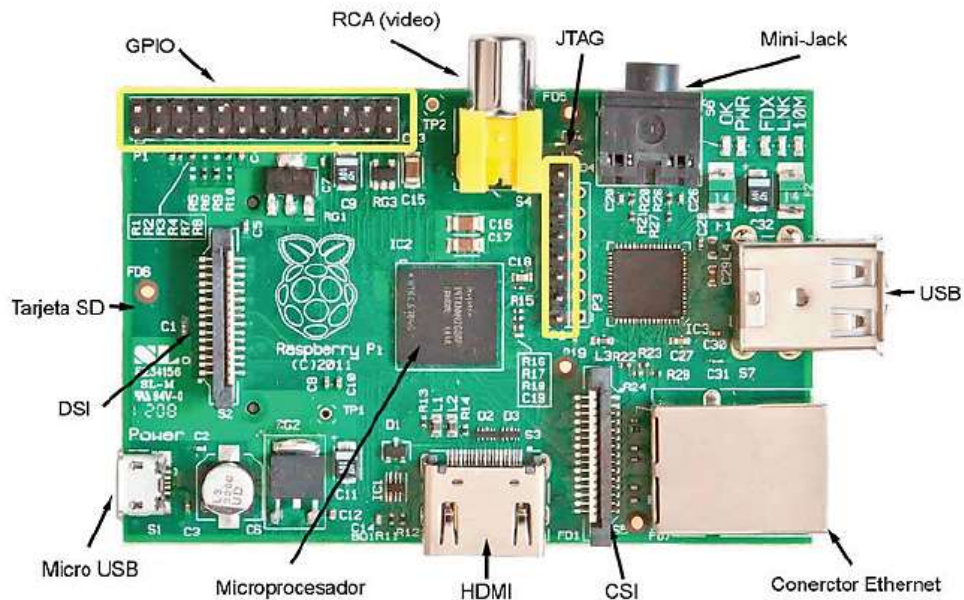


Figura 20. Partes de una placa Raspberry Pi 3 modelo B.

Tabla 1. Pines GPIO en BCM2835 y su descripción.

No. GPIO	Raspberry Pi Indicación	BCM2835	Descripción
1	3V3		3.3 Voltios
2	5V0		5 Voltios
3	SDA0	GPIO0	Bus I2C
4	DNC		No conectar
5	SCL0	GPIO1	Bus I2C
6	GND		Tierra
7	GPIO7	GPIO4	Pin Programable
8	TXD	GPIO14	Emisor UART
9	DNC		No conectar
10	RXD	GPIO15	Receptor UART
11	GPIO0	GPIO17	Pin Programable
12	GPIO1	GPIO18	Pin Programable
13	GPIO2	GPIO21	Pin Programable
14	DNC		No conectar
15	GPIO3	GPIO22	Pin Programable
16	GPIO4	GPIO23	Pin Programable
17	DNC		No conectar
18	GPIO5	GPIO24	Pin Programable
19	SPI_MOSI	GPIO10	Interfaz Periféricos Serie
20	DNC		No conectar
21	SPI_MISO	GPIO9	Interfaz Periféricos Serie
22	GPIO6	GPI25	Pin Programable
23	SPI_SCLK	GPIO11	Interfaz Periféricos Serie
24	SPI_CE0_N	GPIO8	Interfaz Periféricos Serie
25	DNC		No conectar
26	SPI_CE1_N	GPIO7	Interfaz Periféricos Serie

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 3 modelo B.

Placa	Característica
Procesador	Broadcom BCM 2837
CPU	Quadcore ARM Cortex-A53, 64 Bit
Velocidad del reloj	1.2 GHz
RAM	1 GB
GPU	400 MHz VideoCore IV (R)
Network Connectivity	1x10/100 Ethernet (RJ45)
Wireless	802.11n Wireless LAN (wifi) y Bluetooth 4.1
Puertos USB	4xUSB 2.0
GPIOs	2 x 20 pines
Interfaz cámara	15-pin MIPI
Interfaz Display	DSI 15 pin / HDMI Out / Composite RCA
Potencia de suministro (capacidad de corriente)	2.5 A

2.9 PYTHON

Python es un lenguaje de programación interpretado. Es un lenguaje de alto nivel de sintaxis simple, clara y sencilla y cercana al lenguaje natural.³⁶

Entre otras ventajas podemos mencionar las siguientes:³⁷

- Los programas son compactos y cortos y sus estructuras de datos se pueden manipular sencillamente.
- Puede emplearse como un lenguaje orientado a objetos.
- Su entorno de ejecución permite detectar varios errores de programación mucho mejor que unos compiladores y proporciona información de localización para corregirlos.
- Es un software gratuito, es compatible con diversos sistemas operativos y su sintaxis es muy simple.

Python es un lenguaje capaz de construir estructuras de datos y algoritmos complejos por medio de su propio interpretador. El entorno de desarrollo integrado más común para Python se denomina IDLE. Este entorno cuenta con un editor de texto integrado con soporte para editar y visualizar el código Python; y también cuenta con un depurador básico que permite ejecutar un programa paso a paso mientras se leen los valores de las variables principales.³⁸

En la Figura 21, se muestra el IDLE estándar para Python (fuente: *mclibre.org*).

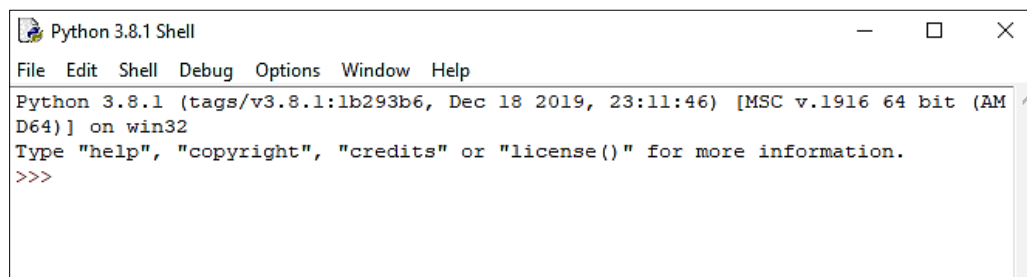


Figura 21. IDLE para Python.

2.10 FRITZING

Es un IDE de libre acceso de automatización para la elaboración del diseño de diagramas electrónicos capaz de configurarse con la plataforma Arduino o Raspberry Pi y crear entornos electrónicos y validar su funcionamiento previo a su ensamble real.³⁹ Puede generarse el diseño en vista esquemático o vista protoboard. En la Figura 22, se muestra un diagrama electrónico elaborado en Fritzing en vista protoboard para el control de un foco LED con Raspberry Pi (fuente: *mclibre.org*).

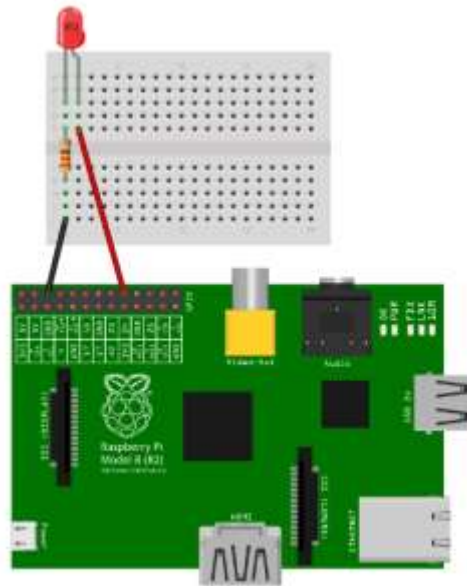


Figura 22. Diagrama elaborado en Fritzing en vista protoboard de un LED conectado a un Raspberry Pi.

2.11 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO

Un sistema de control es un conjunto de elementos que interactúan entre sí para lograr que la salida de un proceso se comporte tal y como se espera que responda a través de una acción de control. En la Figura 23, se presenta un diagrama convencional de un sistema de control.⁴¹ Los tres componentes básicos de un sistema de control son (1) los objetivos de control, que se pueden identificar como las entradas o señales actuantes (u), (2) los componentes del sistema de control y (3) los resultados, también llamadas salidas o variables controladas (y). La finalidad de un sistema de control es controlar las salidas de alguna manera mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control.⁴⁰

Los sistemas de control se pueden clasificar en sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado según el tratamiento que se dé a la señal.

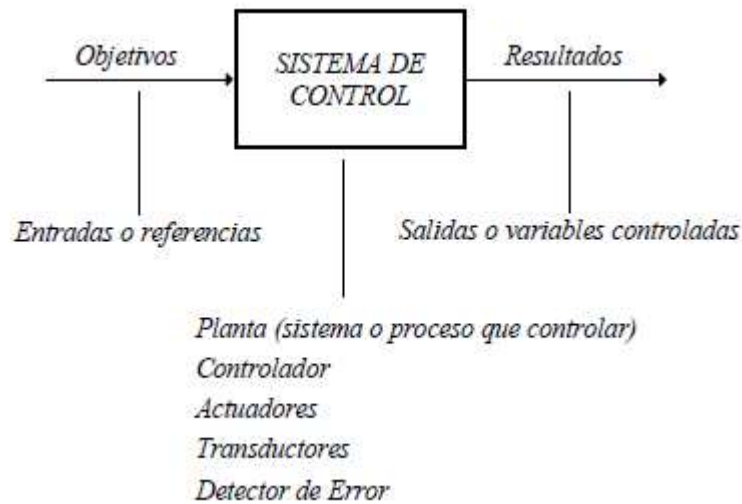


Figura 23. Esquema de un sistema de control.

En particular, los sistemas de control en lazo cerrado son sistemas donde la salida se compara con la entrada, lo cual permite una estabilidad de funcionamiento, ya que esta relación permite establecer una comparación directa de ambas señales, y a su vez, tener un resultado óptimo en el funcionamiento del sistema de control. En estos tipos de sistema se dice que hay realimentación, basada en los sensores que transforman la variable física a una señal eléctrica/electrónica, generalmente, debido a la invención del computador.⁴¹ Las partes básicas de un sistema cerrado son la planta, el proceso/actuadores, realimentación y el control, ver Figura 24. La relación entre la señal manipulada/entrante y la señal controlada/salida permite controlar de una forma eficiente el proceso, esto en relación a los parámetros que representan las propiedades físicas de la planta, estos valores son los más relevantes para determinar las características básicas del sistema de control.⁴¹ En la Figura 25, se muestra la configuración típica de un sistema en lazo abierto solo como referencia de la diferencia entre ambos sistemas.

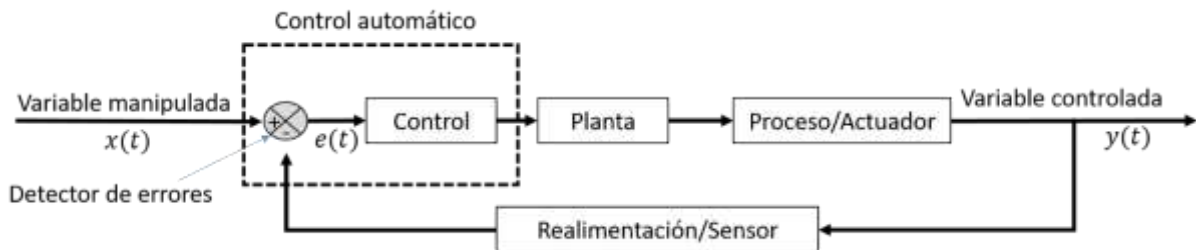


Figura 24. Sistema en lazo cerrado.

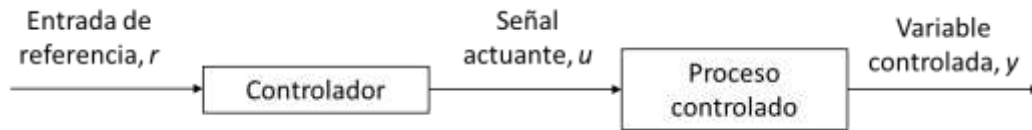
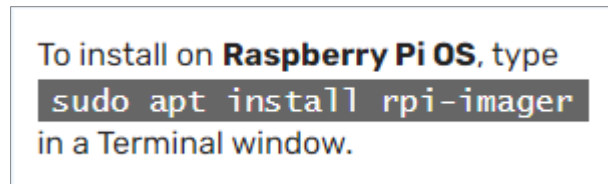


Figura 25. Elementos de un sistema en lazo abierto.

2.12 SISTEMA OPERATIVO RASPBIAN Y VNC VIEWER

Raspbian, también llamado Raspberry Pi OS (*operating system*) es un sistema operativo recomendado por el fabricante para poder operar la placa Raspberry Pi. Cuenta con su propio soporte técnico y gran gama de tutoriales para facilitar su uso e instalación y es compatible con Windows. Una de las ventajas de este sistema operativo es que tiene integrado por default Python 3, por lo que facilita el uso de este lenguaje para el desarrollo del algoritmo de control. En la Figura 26, se muestra la instrucción clave para instalar Raspbian en Windows⁴²

Por otro lado, VNC Viewer es una aplicación cliente-servidor de VNC (*Virtual Network Computing*) de edición gratuita para Windows que permite controlar remotamente un dispositivo desde otro mediante la introducción de una dirección IP del destino de conexión (maquina) y una contraseña de VNC en la pantalla de configuración de la conexión de la aplicación. VNC Viewer permite mostrar y controlar el contenido de la pantalla del sistema deseado (servidor) en otro sistema (cliente). En particular VNC Viewer permite gestionar el sistema operativo y los recursos de Raspberry Pi por control remoto.⁴³



```
To install on Raspberry Pi OS, type  
sudo apt install rpi-imager  
in a Terminal window.
```

Figura 26. Configuración de instalación de Raspbian en Windows.

III. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

3.1.1 Diseño electrónico del sistema

Para comprobar el funcionamiento del sistema mecatrónico, previo a su construcción, se empleó el software de automatización de diseño de diagramas electrónicos Fritzing en su versión Beta 0.9.3 de acceso libre. Con esta herramienta se generaron vistas de simulación de los sistemas embebidos para validar su funcionamiento. Se obtuvieron los diagramas electrónicos en vista protoboard (placa de prototipos) y vista esquemático para generar el diagrama electrónico con símbolos del circuito.

3.1.2 Construcción del sistema

En la Tabla 3, se describen los elementos empleados en la construcción del sistema.

Tabla 3. Descripción completa de los elementos que integran el sistema mecatrónico de seguimiento.

No.	Descripción	Cantidad
1	Raspberry Pi 3 modelo B	1
2	Motor a pasos NEMA 17 modelo SL42STH40-1684A-23, DC, 3.6V, 1.8° ángulo de paso, 4 cables, 3.6 kg cm de torque	1
3	Fotorresistencias LDR modelo GL5516, respuesta espectral, resistencia mínima con luz 5-10 Kohm, respuesta máxima en la Oscuridad 0.5 Mohm, voltaje máximo 600V	2
4	Driver L298N puente H controlador de motores, corriente hasta 4A, voltaje de alimentación a motores de hasta 46V con corte de operación por sobrecalentamiento	1
5	Convertidor analógico 10 bits 8 canales MCP3008 Raspberry Pi	1
6	Protoboard blanco grande 830p en material ABS	1
7	Fuente de voltaje conmutada 0-48V 10A HJS-480-0-48	1
8	LED difuso – color amarillo y verde, 3.3V, 17mA.	2
9	Cable de red RJ45	1
10	Cable de alimentación Micro USB 5V	1
11	Tarjeta Micro SD	1
12	Resistencia 220 ohm	2
13	Cables jumper dupont varios tipos m-m, h-h, m-h varias medidas	30

Las Figuras 16, 17 y 19 muestran el aspecto de la fotorresistencia, del motor y de la placa Raspberry Pi 3 modelo B empleadas, respectivamente. De la Figura 27 a la 30, se presentan otros esquemas de algunos componentes a manera de referencia (fuente: *electrocrea.com*).

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias



Figura 27. Driver L298N Puente H.



Figura 28. Convertidor analógico MCP3008.



Figura 29. Protoboard grande 830p.



Figura 30. Fuente de voltaje 48V 10A.

3.2 DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

Para establecer la comunicación con la placa Raspberry Pi empleada, se instaló el sistema operativo Raspbian sugerido por el fabricante y empleando la aplicación VNC Viewer. El algoritmo de control fue elaborado en lenguaje de programación Python 3, el cual ya viene instalado por defecto en el sistema operativo de Raspbian. Las instrucciones definidas permiten que las señales de entrada de las fotorresistencias sean reconocidas y consecuentemente emitir las señales de salida hacia el actuador para desplazarse en uno u otro sentido (fotorresistencia 1/ubicación lado izquierdo/código LDR1/giro hacia la derecha-sentido horario & fotorresistencia 2/ubicación lado derecho/código LDR2/giro hacia la izquierda-sentido antihorario), por lo que el sistema de control desarrollado fue en lazo cerrado dado que hay realimentación ya que el actuador se mueve en un sentido según la carga de mayor intensidad de luz que reciba una u otra fotorresistencia, es decir, la respuesta de salida está regulada por el ajuste constante con la de la entrada. Cuando las intensidades de luz son iguales en ambas fotorresistencias, el movimiento llega a ser nulo.

La comunicación de la placa y una PC fue a través de un cable convencional Micro USB 5V 1A, la comunicación entre Raspberry Pi y la PC se realiza mediante un cable de RJ45 y gracias a la aplicación VNC Viewer se logra visualizar el sistema operativo Raspbian y evitar utilizar periféricos adicionales a la PC. Para evitar el sobrecalentamiento (daño) de la placa Raspberry, la alimentación de voltaje del motor (5V) se habilitó por medio de la fuente de voltaje empleada a través del puente H.

En la Figura 31, se presenta un diagrama de flujo representativo del sistema de seguimiento de estudio. Se aprecia el flujo de las señales del sistema de control en lazo cerrado definido.

En la Tabla 4, se identificó los parámetros de cada fotorresistencia en relación a su ubicación, giro, código, entre otros.

Ingeniería Mecatrónica
 Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
 Fotorresistencias



Figura 31. Sistema de control en lazo cerrado del sistema mecatrónico de seguimiento.

Tabla 4. Identificación de parámetros de giro cada fotorresistencia.

	Fotorresistencia 1	Fotorresistencia 2
Código	LDR1	LDR2
Ubicación	Lado izquierdo (adjunto a protoboard de puente H)	Lado derecho (adjunto a protoboard de convertidor)
Giro	Hacia a la izquierda-sentido horario	Hacia a la derecha-sentido antihorario
LED	Amarrillo	Verde

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA

Los diagramas electrónicos – elaborados en Fritzing – en vista protoboard y esquemático, se muestran en la Figura 32 y 33, respectivamente. La simulación de operación virtual del sistema permitió validar el funcionamiento adecuado del sistema previo a su construcción.

El sistema mecatrónico se diseñó en base a electrónica modular para Raspberry Pi y los componentes que lo integran se describen en la Tabla 3.

En la Tabla 5 se presenta una lista de los componentes prioritarios con sus respectivas conexiones (pines disponibles y pines requeridos) de los periféricos de acople de señales. Se establecen los pines de comunicación GPIO con el convertidor analógico, el driver puente H y las fotorresistencias. Es de resaltar, que el movimiento del motor NEMA 17 es a través del puente H, motivo por el cual no se observa en la Tabla 5.

Los diagramas electrónicos permiten apreciar la forma en que las fotorresistencias (sensores) se empotran en la placa de inserción y se comunican con la Raspberry Pi. Los diagramas hacen referencia a la Tabla 5 para una mejor apreciación de los componentes con sus respectivas conexiones (pines) de los periféricos de acople de señales para activar el sentido de giro del actuador.

Tabla 5. Interfaz de conexiones de pines GPIO del sistema mecatrónico de seguimiento.

MCP3008				L298N			
Conexión de MCP3008	Raspberry Pi	Resistencia 1	Resistencia 2	Conexión del puente H	Motor a Pasos	Fuente variable 5V	
VDD	3V			OUT 1	A		
V_REF	3V			OUT 2	B		
CLK	GPIO11			OUT 3	C		
D_OUT	GPIO09			OUT 4	D		
D_IN	GPIO10			IN1	GPIO19		
CS/SHDN	GPIO8			IN2	GPIO16		
CH0		R1 OUT		IN3	GPIO26		
CH1			R2 OUT	IN4	GPIO20		
				GND		GND	
				VS/VIN		5V	
FOTORRESISTENCIA 1 LDR1				FOTORRESISTENCIA 2 LDR2			
Conexión Fotorresistencia	MCP3008	Resistencia 1	Raspberry Pi	Conexión Fotorresistencia	MCP3008	Resistencia 2	Raspberry Pi
IN	CH0	R1 OUT		IN	CH0	R2 OUT	
OUT			GND	OUT			GND

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

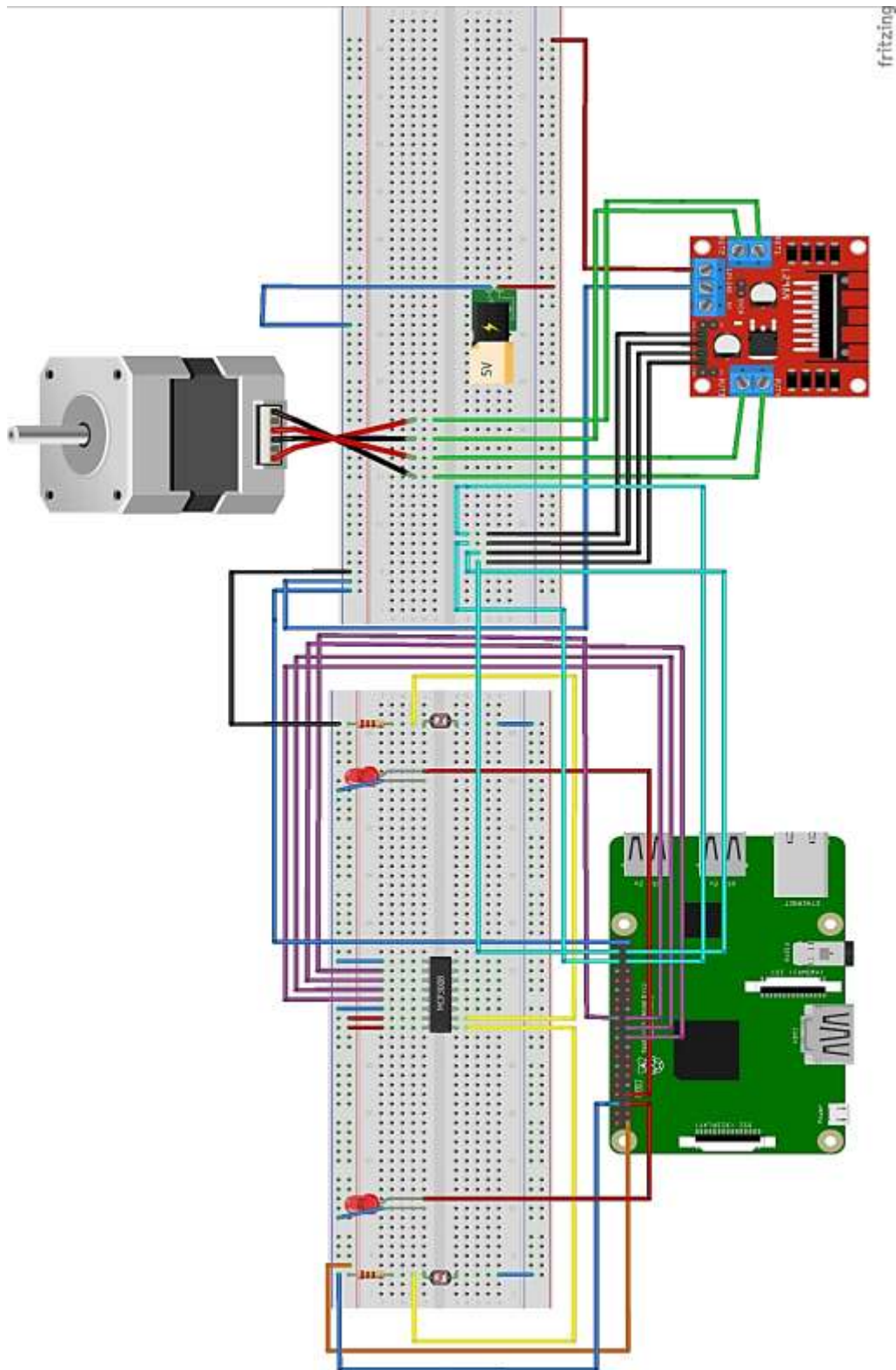
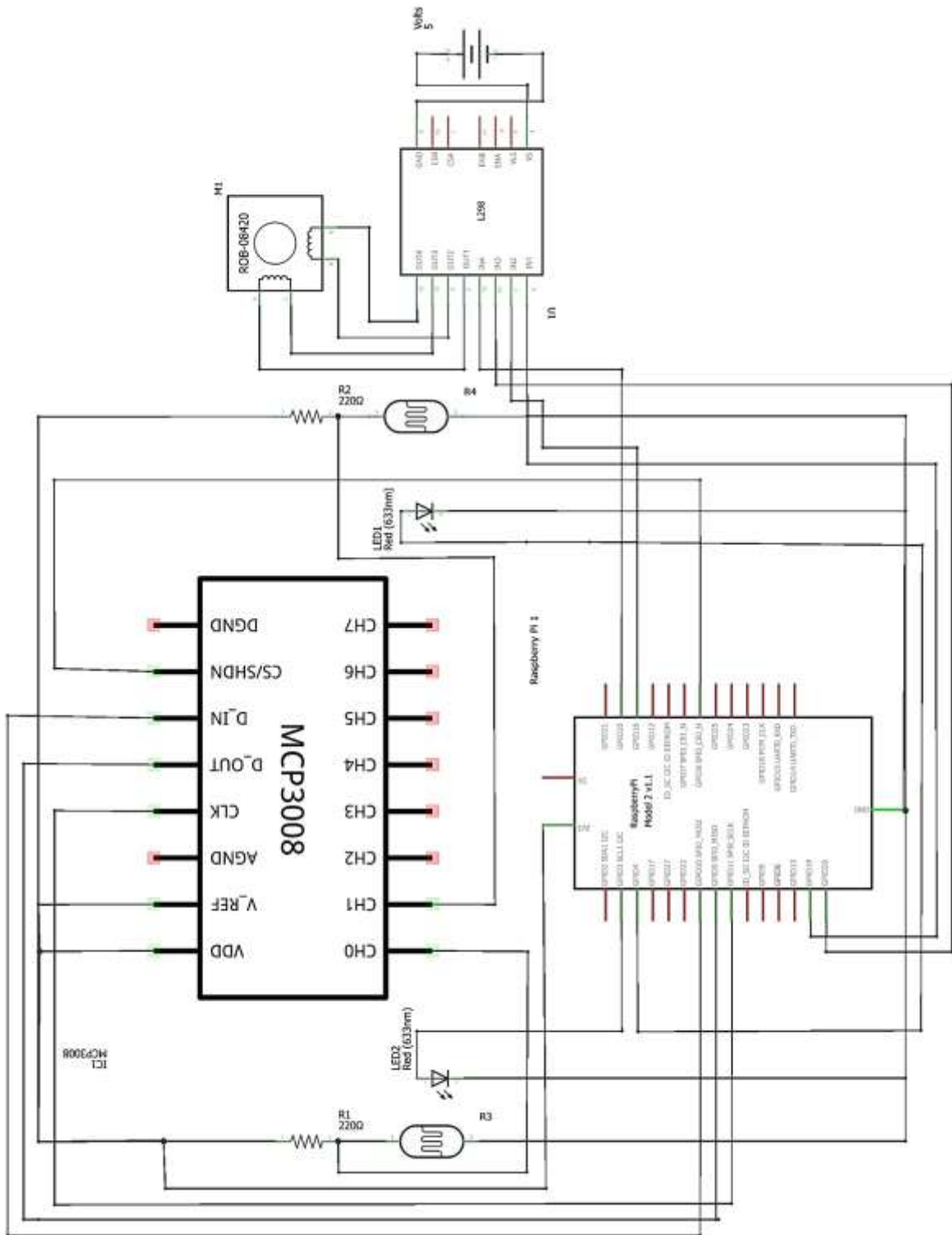


Figura 32. Diagrama electrónico del sistema de seguimiento en vista Protoboard.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias



fritzing

Figura 33. Diagrama electrónico del sistema de seguimiento en vista Esquemático.

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

La construcción del sistema de seguimiento permite cumplir con el objeto fin del proyecto de poder regular el movimiento de un actuador según la comparación de las intensidades de luz incidente entre ambas fotorresistencias. La diferencia de valores de las resistencias de cada fotorresistencia es leída por la placa Raspberry Pi, las procesa y compara para detectar cual fotosensor tiene mayor luminosidad. Enseguida el controlador emite instrucciones al driver puente H para operar el motor y realizar giros (fotorresistencia 1/ubicación lado izquierdo/código LDR1/giro hacia la derecha-sentido horario & fotorresistencia 2/ubicación lado derecho/código LDR2/giro hacia la izquierda-sentido antihorario), ver Figura 34. La Raspberry Pi emite las señales para operar el motor a través del driver puente H debido a la demanda de energía que el motor exige y sobre todo para no dañar la placa.

En particular se logra lo siguiente:

- (a) Se incide luz sobre cada fotorresistencia.
- (b) Se detecta y procesan los valores de resistencias de cada fotosensor por la placa Raspberry Pi.
- (c) El ordenador compara las intensidades de luz incidente de ambas fotorresistencias.
- (d) Se determina en qué sentido se moverá el actuador.

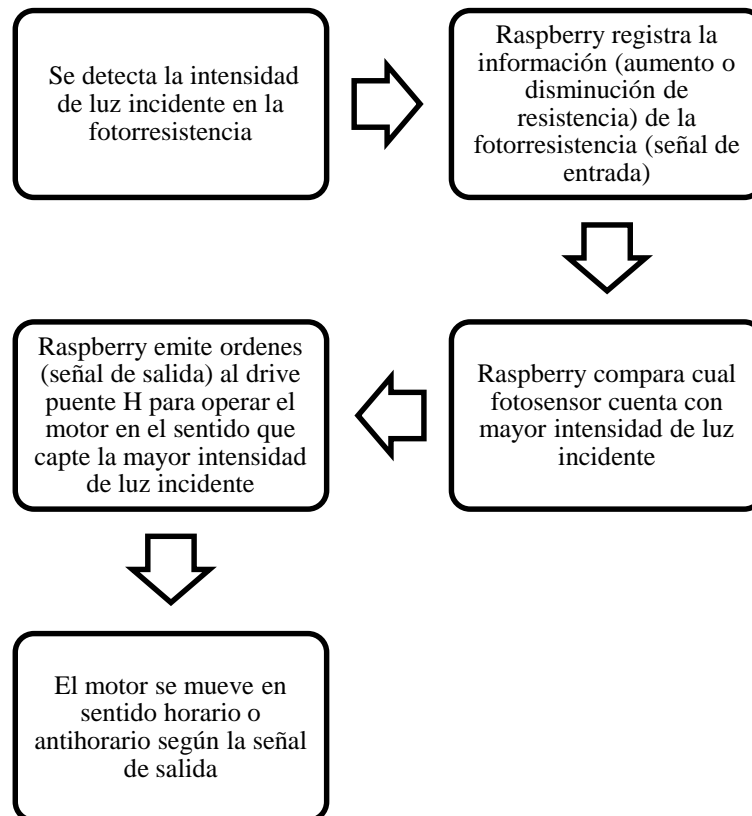


Figura 34. Diagrama de flujo del proceso completo de funcionamiento del sistema mecatrónico de seguimiento.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

De la Figura 35 a la 47 se presentan diferentes vistas y acercamientos del sistema mecatronico de seguimiento construido.



Figura 35. Vista completa de la estación de trabajo (PC, placa Raspberry Pi, fuente, actuador, driver puente H y elementos electrónica modular).



Figura 36. Vista lateral de la estación de trabajo.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

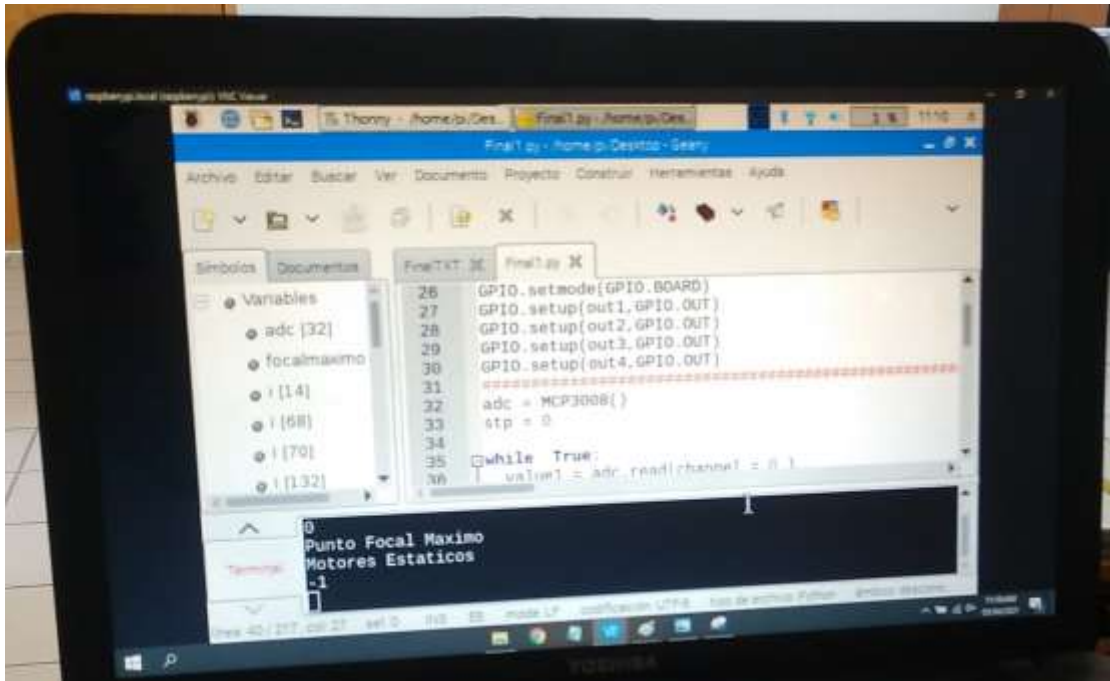


Figura 37. Interfaz (IDE).

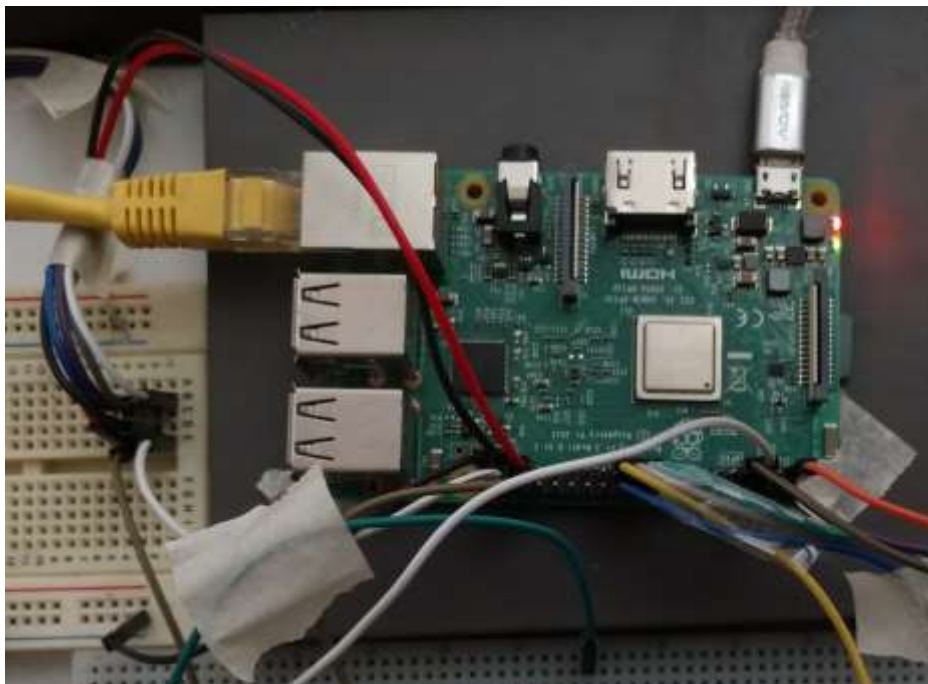


Figura 38. Raspberry en funcionamiento y en comunicación con actuador y Pc (luz verde y roja).

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

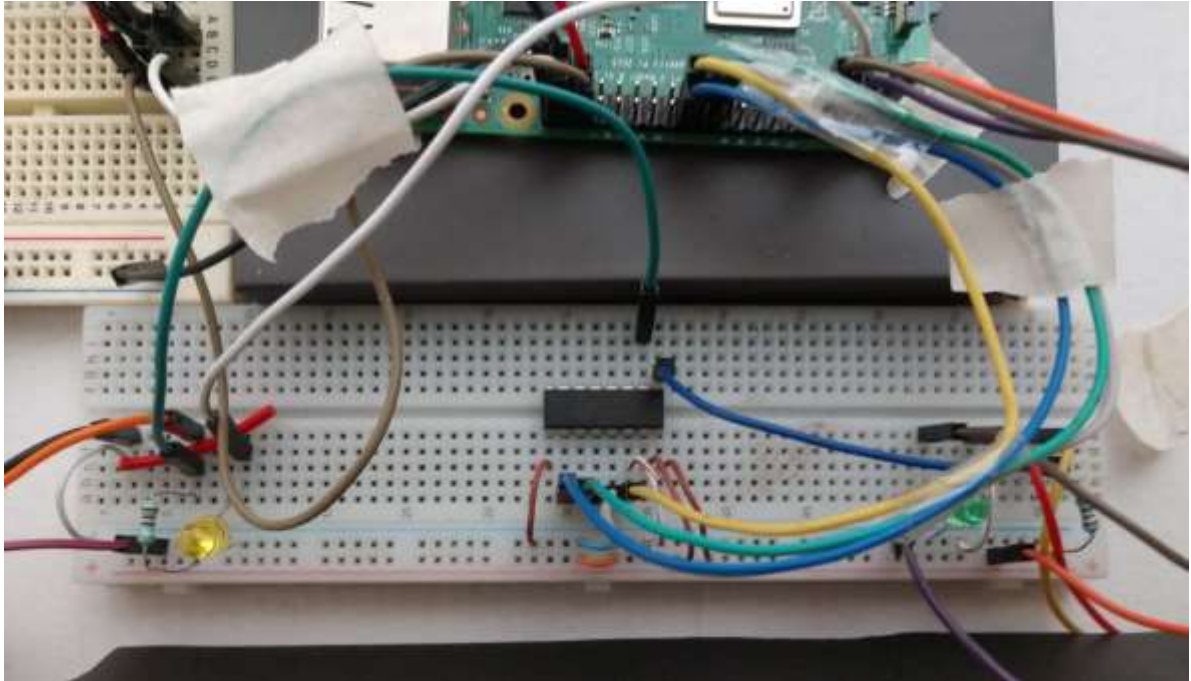


Figura 39. Protoboard receptor de señales de fotorresistencias y alojamiento de convertidor analógico.

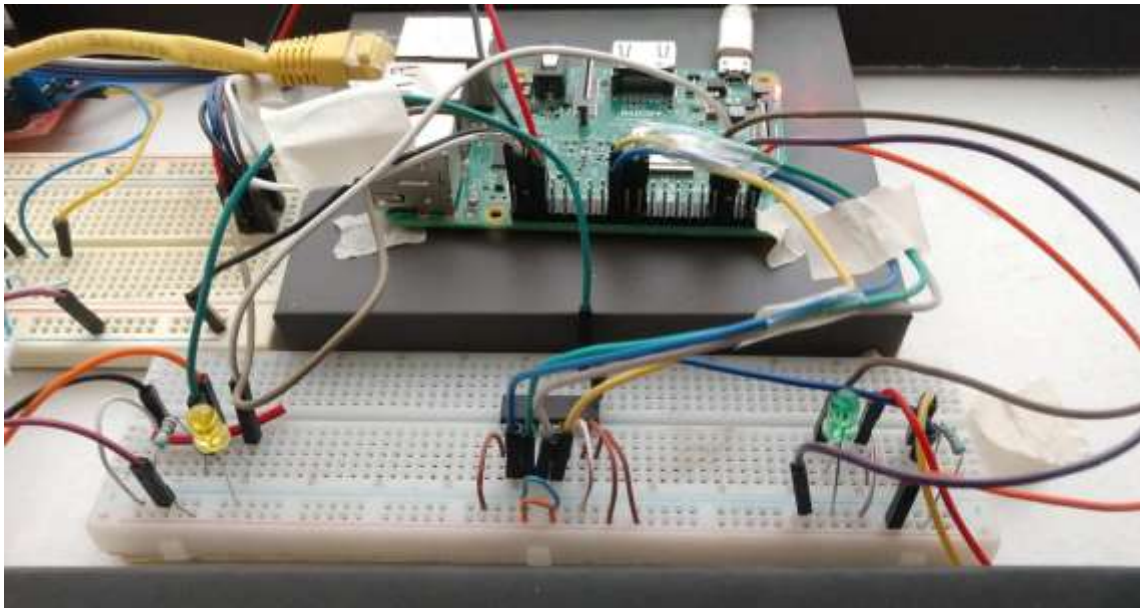


Figura 40. Interfaz protoboard analógico y Raspberry Pi.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

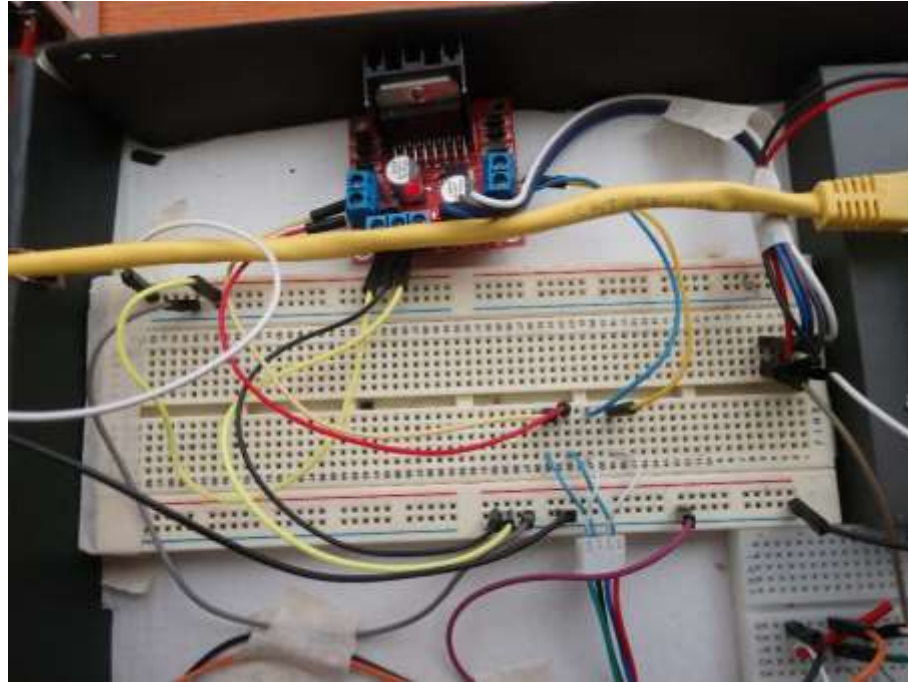


Figura 41. Protoboard de drive puente H.

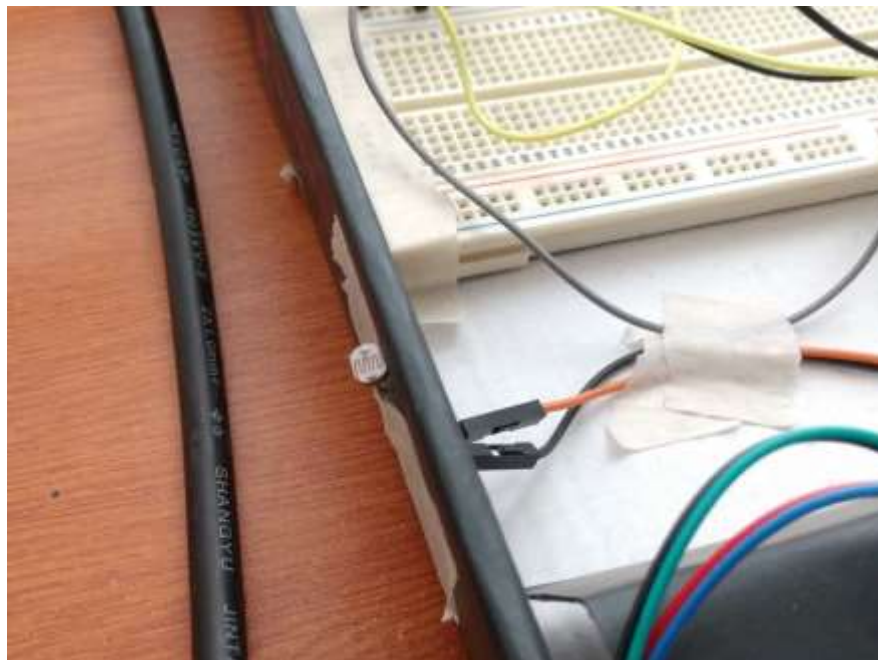


Figura 42. Fotorresistencia LDR1 (adjunto al protoboard del puente H).

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

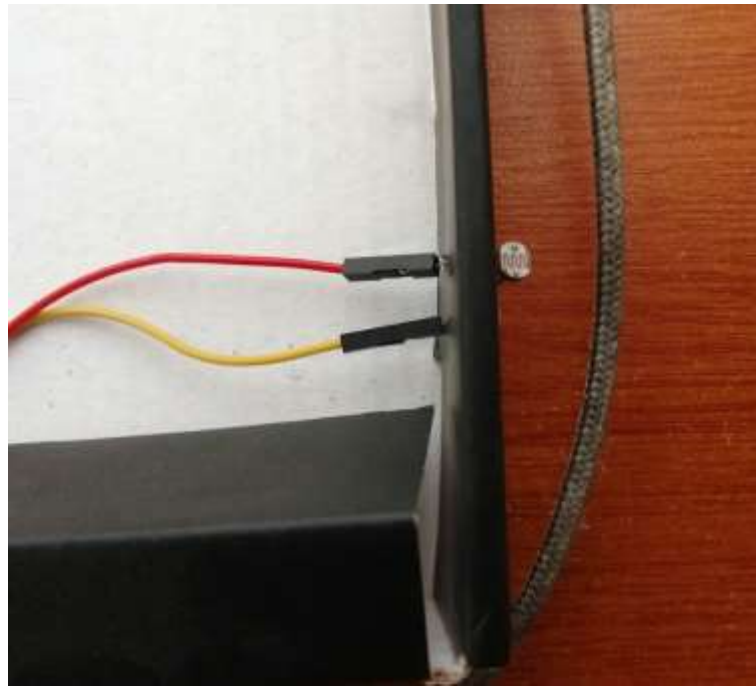


Figura 43. Fotorresistencia LDR2 (adjunto al protoboard del convertidor analógico).



Figura 44. Motor NEMA 17 de estudio: vista lateral (izq.) y vista alzada (der.)

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias



Figura 45. Corriente de alimentación requerida para el motor NEMA 17 (5.13V).

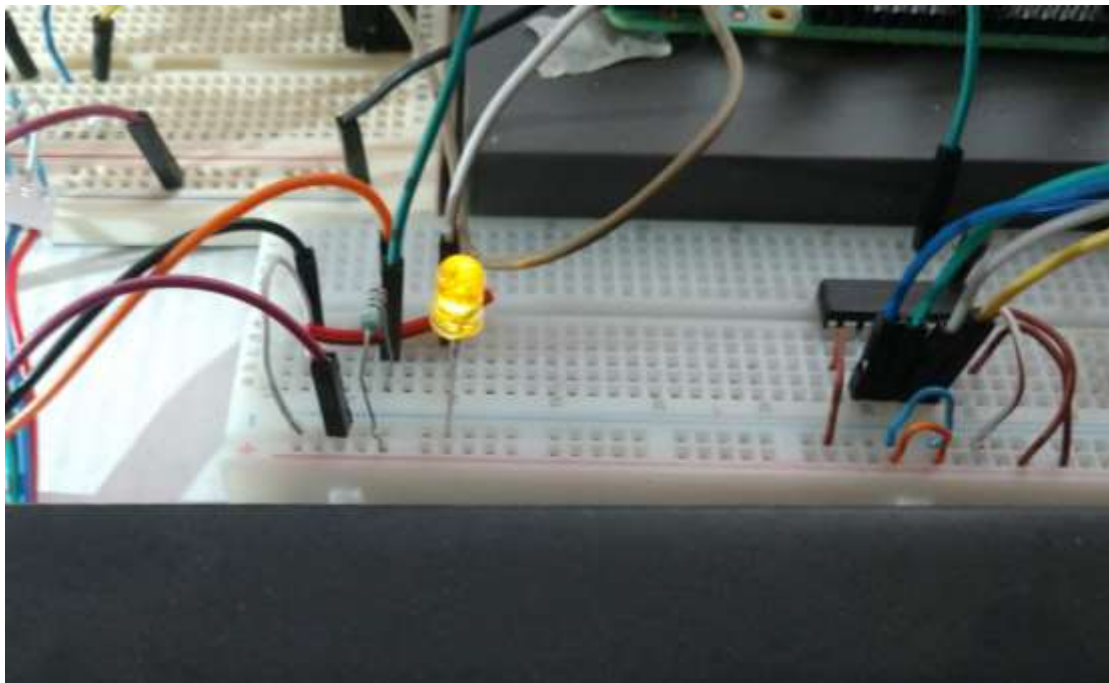


Figura 46. Encendido LED amarillo-indicativo de activación de LDR1 al recibir mayor cantidad de luz.

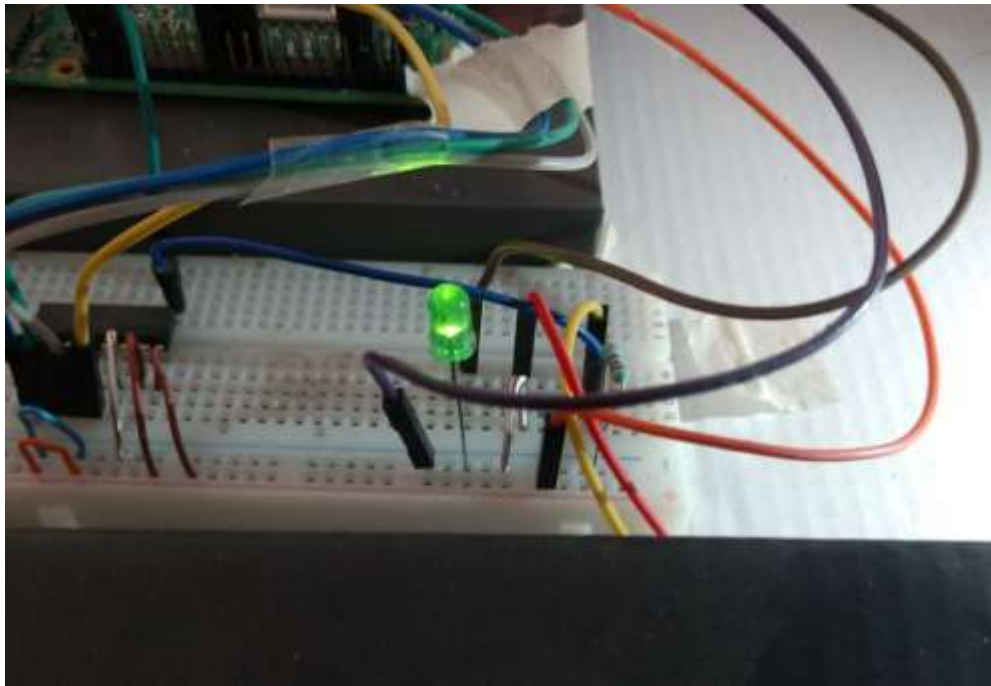


Figura 47. Encendido LED verde-indicativo de activación de LDR2 al recibir mayor cantidad de luz

4.3 SISTEMA DE CONTROL: CÓDIGO E INTERFAZ DE CONTROL

El código de control y automatización para el sistema mecatrónico se desarrolló en lenguaje Python bajo una estructura de sintaxis textual de diseño propio. Se tomaron como guía varias fuentes de información electrónica disponibles en la red libremente, así como librerías integradas por default en el software de acceso libre empleado.

Algunas fuentes consultadas fueron:

- <https://business.tutsplus.com/es/tutorials/controlling-dc-motors-using-python-with-a-raspberry-pi--cms-20051>
- <https://es.accentsconagua.com/articles/business/controlling-dc-motors-using-python-with-a-raspberry-pi.html>
- <http://robotica.sandria.org/2017/12/controlar-motor-cd-con-python-en-raspberry-pi-y-modulo-puente-h/>
- <https://www.aranacorp.com/es/controlar-un-motor-cc-con-raspberry-pi/>
- <https://blog.330ohms.com/2020/06/26/como-conectar-un-motor-a-pasos-a-raspberry-pi/>

Enseguida se presenta el código desarrollado para este trabajo:

```
import time
from MCP3008 import MCP3008
import RPi.GPIO as GPIO
out1 = 35
out2 = 36
```

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

```
out3 = 37
out4 = 38
led1 = 7
led2 = 5
i=0
positive=0
negative=0
y=0
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(led1,GPIO.OUT,initial=GPIO.LOW)
GPIO.setup(led2,GPIO.OUT,initial=GPIO.LOW)
GPIO.setup(out1,GPIO.OUT)
GPIO.setup(out2,GPIO.OUT)
GPIO.setup(out3,GPIO.OUT)
GPIO.setup(out4,GPIO.OUT)
adc = MCP3008()
stp = 0

while True:
    value1 = adc.read(channel = 0 )
    value2 = adc.read(channel = 1 )
    var1 = value1
    var2 = value2
    focalmaximo = var1 - var2
    if focalmaximo < 30:
        if focalmaximo > -30:
            print ("Punto Focal Maximo")
            print ("Motores Estaticos")
            print (focalmaximo)
            GPIO.output(led1,GPIO.LOW)
            GPIO.output(led2,GPIO.LOW)
            GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
            GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
            GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
            GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
            stp = 0
            time.sleep(1.0)
        if focalmaximo > 31:
            print ("Mayor luz en el sensor Der")
            print ("Giro Hacia la Izquierda")
            print ('Valor LDR1 =',var1)
            print ('Valor LDR2 =',var2)
            GPIO.output(led1,GPIO.LOW)
            GPIO.output(led2,GPIO.HIGH)
            stp = -10
            x = stp
            if x<0 and x>=-360:
                x=x*-1
                for y in range(x,0,-1):
                    if positive==1:
                        if i==0:
                            i=7
```

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

```
else:
    i=i-1
    y=y+3
    positive=0
negative=1
if i==0:
    GPIO.output(out1,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
    time.sleep(0.08)
elif i==1:
    GPIO.output(out1,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out2,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
    time.sleep(0.08)
elif i==2:
    GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out2,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
    time.sleep(0.08)
elif i==3:
    GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out2,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out3,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
    time.sleep(0.08)
elif i==4:
    GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
    time.sleep(0.08)
elif i==5:
    GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out4,GPIO.HIGH)
    time.sleep(0.08)
elif i==6:
    GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out4,GPIO.HIGH)
    time.sleep(0.08)
elif i==7:
    GPIO.output(out1,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out4,GPIO.HIGH)
```

```
        time.sleep(0.08)
    if i==0:
        i=7
        continue
    i=i-1
if focalmaximo < -31:
    print ("Mayor luz en el sensor Izq")
    print ("Giro Hacia la Derecha")
    print ('Valor LDR1 =',var1)
    print ('Valor LDR2 =',var2)
    GPIO.output(led1,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(led2,GPIO.LOW)
    stp = 10
    x = stp
    if x>0 and x<=360:
        for y in range(x,0,-1):
            if negative==1:
                if i==7:
                    i=0
                else:
                    i=i+1
                    y=y+2
                    negative=0
            positive=1
            if i==0:
                GPIO.output(out1,GPIO.HIGH)
                GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
                time.sleep(0.08)
            elif i==1:
                GPIO.output(out1,GPIO.HIGH)
                GPIO.output(out2,GPIO.HIGH)
                GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
                time.sleep(0.08)
            elif i==2:
                GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out2,GPIO.HIGH)
                GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
                time.sleep(0.08)
            elif i==3:
                GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out2,GPIO.HIGH)
                GPIO.output(out3,GPIO.HIGH)
                GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
                time.sleep(0.08)
            elif i==4:
                GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
                GPIO.output(out3,GPIO.HIGH)
```

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

```
GPIO.output(out4,GPIO.LOW)
time.sleep(0.08)
elif i==5:
    GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out4,GPIO.HIGH)
    time.sleep(0.08)
elif i==6:
    GPIO.output(out1,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out4,GPIO.HIGH)
    time.sleep(0.08)
elif i==7:
    GPIO.output(out1,GPIO.HIGH)
    GPIO.output(out2,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out3,GPIO.LOW)
    GPIO.output(out4,GPIO.HIGH)
    time.sleep(0.08)
if i==7:
    i=0
    continue
i=i+1
```

Enseguida se presentan a continuación capturas de pantalla donde se evidencian las lecturas obtenidas durante la operación del sistema de seguimiento desarrollado. Se aprecia los valores de resistencias con luz y en oscuridad de cada fotorresistencia, ver Figuras de la 48 a la 54.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

```

Final1.py - /home/pi/Desktop - Geany
Archivo  Editar  Buscar  Ver  Documento  Proyecto  Construir  Herramientas  Ayuda
Simbolos  Documentos
Variables
  adc [32]
  focalmaximo
  i [14]
  i [68]
  i [70]
  i [132]
FinalTXT  Final1.py
26  GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
27  GPIO.setup(out1,GPIO.OUT)
28  GPIO.setup(out2,GPIO.OUT)
29  GPIO.setup(out3,GPIO.OUT)
30  GPIO.setup(out4,GPIO.OUT)
31  #####
32  adc = MCP3008()
33  stp = 0
34
35  while True:
36  |   value1 = adc.read(channel = 0.)
Terminal
0
Punto Focal Maximo
Motores Estaticos
0
línea: 40 / 217  col: 27  sel: 0  INS  ES  mode: LF  codificación: UTF-8  tipo de archivo: Python  ámbito: descono...

```

Figura 48. Motor estático-misma intensidad de luz recibida en LDR1 y LDR2. Diferencia de cero entre los fotosensores-valores de 0.

```

Final1.py - /home/pi/Desktop - Geany
Archivo  Editar  Buscar  Ver  Documento  Proyecto  Construir  Herramientas  Ayuda
Simbolos  Documentos
Variables
  adc [32]
  focalmaximo
  i [14]
  i [68]
  i [70]
  i [132]
FinalTXT  Final1.py
26  GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
27  GPIO.setup(out1,GPIO.OUT)
28  GPIO.setup(out2,GPIO.OUT)
29  GPIO.setup(out3,GPIO.OUT)
30  GPIO.setup(out4,GPIO.OUT)
31  #####
32  adc = MCP3008()
33  stp = 0
34
35  while True:
36  |   value1 = adc.read(channel = 0.)
Terminal
1
Punto Focal Maximo
Motores Estaticos
1
línea: 40 / 217  col: 27  sel: 0  INS  ES  mode: LF  codificación: UTF-8  tipo de archivo: Python  ámbito: descono...

```

Figura 49. Motor estático-misma intensidad de luz recibida en LDR1 y LDR2. Diferencia de cero entre los fotosensores-valores de 1.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

```

1 #####Librerias#####
2 import time # Libreria delays
3 from MCP3008 import MCP3008 #Libreria MCP3008
4 import RPi.GPIO as GPIO #Declaracion para utilizar
5 #####
6
7 #####Variables#####
8 out1 = 35
9 out2 = 36
10 out3 = 37
11 out4 = 38
    
```

Terminal

```

-4
Punto Focal Maximo
Motores Estaticos
-6
    
```

Estableciendo ancho de sangría a 3 para /home/pi/Desktop/Final1.py

Figura 50. Motor estático-misma intensidad de luz recibida en LDR1 y LDR2. Diferencia de dos entre los fotosensores-valores de -4 y-6 respectivamente (debido a la sensibilidad de cada sensor).

```

7 #####Variables#####
8 out1 = 35
9 out2 = 36
10 out3 = 37
11 out4 = 38
12 led1 = 7
13 led2 = 5
14 i=0
15 positive=0
16 negative=0
17 v=0
    
```

Terminal

```

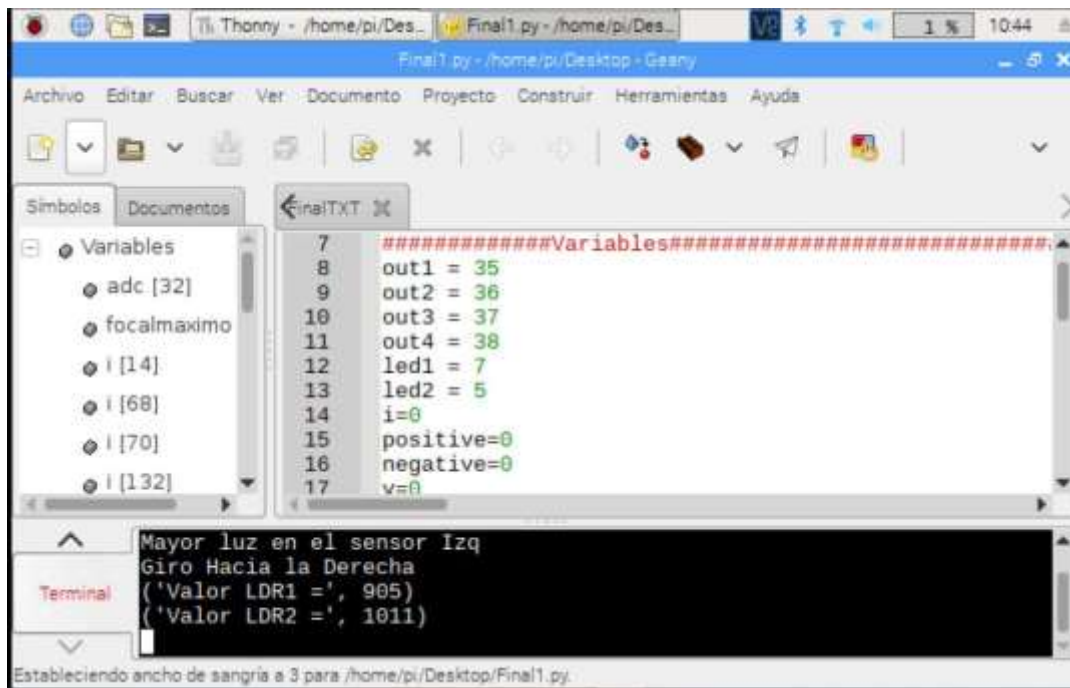
Mayor luz en el sensor Der
Giro Hacia la Izquierda
('Valor LDR1 =', 1007)
('Valor LDR2 =', 880)
    
```

Estableciendo ancho de sangría a 3 para /home/pi/Desktop/Final1.py

Figura 51. Motor activado. LDR2 recibe mayor cantidad de luz y por tanto su resistencia disminuye (880). El actuador gira en sentido antihorario.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias



```
7 #####Variables#####
8 out1 = 35
9 out2 = 36
10 out3 = 37
11 out4 = 38
12 led1 = 7
13 led2 = 5
14 i=0
15 positive=0
16 negative=0
17 v=0
```

```
Mayor luz en el sensor Izq
Giro Hacia la Derecha
('Valor LDR1 =', 905)
('Valor LDR2 =', 1011)
```

Figura 52. Motor activado. LDR1 recibe mayor cantidad de luz y por tanto su resistencia disminuye (905). El actuador gira en sentido horario.

A manera de referencia de trabajo a futuro, se muestra la propuesta de la maquina extrusora solar con el concentrador solar integrado, ver Figura 53. El sistema mecatrónico desarrollado en este estudio se pretende adaptar por medio de una caja de engranes al concentrador. El actuador regulado por el sistema de seguimiento automatizado desplazará los engranes que a su vez moverá el concentrador a la posición más idónea para mantener la perpendicularidad de los rayos solares orientados al equipo.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

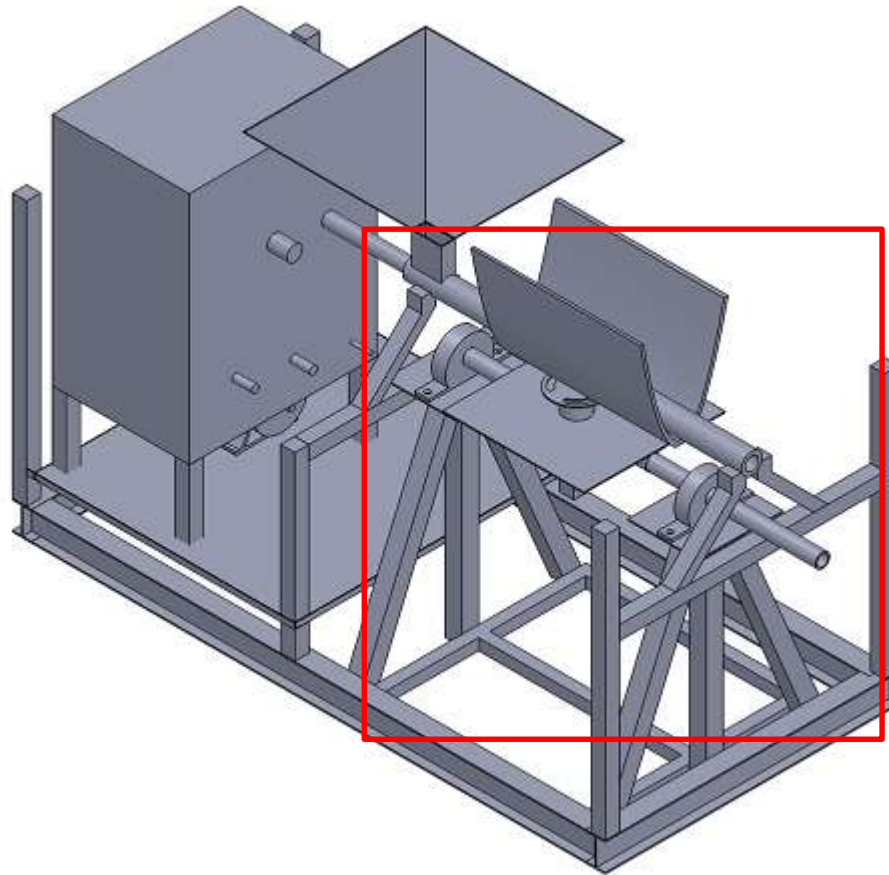


Figura 53. Maquina extrusora solar: posición del concentrador solar (recuadro rojo).

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se desarrolló una metodología para diseñar y construir un sistema mecatrónico de seguimiento solar en su etapa de control empleando una placa Raspberry Pi 3 modelo B y dos fotorresistencias LDR mod. GL5516 para el control de un actuador de motor a pasos lineal NEMA 17 modelo SL42STH40-1684A-23. Se emplea un driver L298N puente H para recibir las instrucciones de la placa y transmitir al motor. Lo anterior por seguridad del sistema y evitar dañar el ordenador.

En específico, el sentido horario o anti-horario de giro del motor NEMA 17 está regido por la diferencia entre las intensidades de luz incidente entre las dos fotorresistencias. Aquella fotorresistencia con menor valor de resistencia (significa que aumenta la luz que recibe) rige el giro del actuador.

Se logró desarrollar un sistema de control en lazo cerrado dado que la señal de salida de movimiento del actuador es realimentada.

El algoritmo de control reconoce la intensidad de luz incidente que recibe cada fotorresistencia, la placa Raspberry Pi lee la información y envía señales al actuador para desplazarse en uno u otro sentido. Cuando las intensidades de luz son iguales en ambas fotorresistencias, el movimiento llega a ser nulo. En todo momento las señales de las fotorresistencias se están comparando y se define en qué sentido rota el motor o permanece inmóvil.

Se logró (i) construir el sistema mecatrónico empleando Raspberry Pi, (ii) desarrollar el código de control en lenguaje de programación Python y (iii) reconocer la señal de las dos fotorresistencias para regular el movimiento de un actuador.

Se realizaron pruebas de operación preliminares del sistema mecatrónico que permitieron observar una correcta respuesta del sistema, por lo que se puede sugerir que el arreglo obtenido simula el movimiento que tendría el equipo de seguimiento solar bajo un comportamiento de intensidad de rayos solares incidentes en las fotorresistencias.

Como trabajo a futuro se contempla para otros proyectos – fuera del alcance del presente trabajo – optimizar el sistema mecatrónico a través de un diseño experimental robusto y realizando pruebas con actuadores de mayor capacidad u otro tipo de modelo de fotorresistencias. Siendo lo anterior solo ajustes electrónicos mas no de programación.

También como trabajo a futuro se contempla integrar y probar el sistema mecatrónico en un concentrador solar adaptado a una máquina de extrusión solar.

El presente trabajo permite establecer las bases para generar productos académicos y de desarrollo tecnológico más significantes y de alto valor agregado para considerar la transferencia de tecnología. Además de que fomenta demás trabajo futuro para nuevos posibles temas de investigación y de Tesis.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Caraballo, M. A. & García, J. M. (2017). Energías renovables y desarrollo económico. Un análisis para España y las grandes economías europeas. *El Trimestre Economico*, 335, 571-609.
- (2) Timmons, D., Harris, J. M. & Roach, B. (2014). *La Economía de las Energías Renovables*. USA: Global Development and Environment Institute at Tufts University.
- (3) Alcubierre, D. (2013). *Energía Solar para todos*. México: CEMAER.
- (4) factorenergia. (27/01/2020). Energía solar: todo lo que tienes que saber. Recuperado de <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo/energia-solar/>
- (5) Hernández-Echeverría, Y. (2012). *Diseño de un concentrador solar de geometría paraboidal portátil* (Tesis de Ingeniería). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- (6) González-López, J. P. (2018). *Diseño de un concentrador solar compacto de foco fijo de alta eficiencia para aplicaciones de alta temperatura* (Tesis de Maestría). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., Chihuahua, Chihuahua, México.
- (7) Machado-Toranzo, N., Lussón-Cervantes, A., Oro-Carralero, L. L., Bonzon-Henríquez, J. & Escalona-Costa, O. (2015). Seguidor solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar. *Ingeniería Energética*, 36(2), 190-199.
- (8) Escobar-Mejia, A., Holguín-Londoño, M. & Osorio-R., J. C. (2010). Design and Implementation of a solar tracking prototype for optimize a PV system. *Scientia et Technica*, 44, 245-250.
- (9) Villeda, G., Castañeda, A., Vega, J. T. & Pineda, J. (2011). Seguidor solar de dos ejes para un horno solar. *Información tecnológica*, 22(2), 95-106.
- (10) de La Cruz-Casaño, C. (2012). Seguidor solar adaptativo basado en un controlador lógico programable para paneles fotovoltaicos. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 2(2), 89-100.
- (11) Arreola-Gómez, R., Quevedo-Nolasco, A., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, A. & Reyes-Muñoz, D. (2015). Design, construction, and evaluation of a solar tracking system for a photovoltaic panel. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1715-1727.
- (12) Díaz-Velilla, J. P. (2018). *Desarrollo de un prototipo mecatrónico de seguidor solar parabólico para la edificación* (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- (13) Castellano-Narváez, A. D. & Valencia-Jumbo, M. J. (2019). *Desarrollo de un prototipo de sistema para adquisición y monitoreo de datos de la captación de radiación solar para la Escuela Politécnica Nacional* (Tesis de Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- (14) Sánchez-Moreno, C. A. & Torres-Muñoz, C. G. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de energía solar domiciliario con control de iluminación automático, para el sector rural de San Pedro Valle, Vereda*

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

- de la Siria, finca las Brisas* (Tesis de Ingeniería). Unidad Central del Valle del Cauca, Tuluá, Valle del Cauca, Colombia.
- (15) Hernández-Velázquez, J. (2018). Diseño y construcción de un seguidor solar para aplicaciones en solarimetría. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 5(10), p18.
- (16) Tovar-Ruiz, J. A. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de Tracking solar de dos ejes para la ciudad de Bogotá* (Tesis de Ingeniería). La Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- (17) González-Velasco, J. (2015). *Energías renovables*. Barcelona, España: Editorial Reverté. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/46748?page=71>.
- (18) factorenergia. (27/01/2020). Energía solar: todo lo que tienes que saber. Recuperado de <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo/energia-solar/>
- (19) Bayod-Rújula, Á. A. (2009). *Energías renovables: sistemas fotovoltaicos*. Zaragoza, España: Prensas de la Universidad de Zaragoza. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/41940?page=13>.
- (20) Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (octubre de 2006). *Energía solar térmica*, manuales de energías renovables tomo 4. Recuperado de http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Energia_solar_termica_A2006.pdf
- (21) Planas, O. (03/06/2020). ¿Qué es un concentrador solar?. Recuperado de <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/componentes/concentrador-solar#:~:text=Un%20concentrador%20solar%20es%20un,en%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20t%C3%A9rmica>.
- (22) Fundación UNIDA, aula virtual, energías, clase 4. Recuperado de <https://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/CONCENTRADORES%20SOLARES.pdf>
- (23) Arrieta-Morelo, D. J. & Puello-Bravo, S. Y. (2015). *Diseño y construcción de un seguidor solar para aumentar el rendimiento energético de paneles fotovoltaicos de un sistema de bombeo* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Córdoba, Montería, Córdoba, Colombia.
- (24) Díaz, J. F. (07/04/2015). Mecanismos de seguimiento solar. Recuperado de <https://juanfrancisco207.wordpress.com/2015/04/07/mecanismos-de-seguimiento-solar/>
- (25) Villeda, G., Castañeda, A., Vega, J. T. & Pineda, J. (2011). Seguidor solar de dos ejes para un horno solar. *Información Tecnológica*, 22(2), 95-106.
- (26) Creus-Sole, A. (2014). *Energía termosolar*. Barcelona, España: Cano Pina. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/43060?page=32>.
- (27) Reyes-Cortés, F., Cid-Monjaraz, J. & Vargas-Soto, E. (2013). *Mecatrónica, Control y Automatización* (1ª ed.). México: Alfaomega Grupo Editor S. A. de C. V.
- (28) Bolton, W. (2013). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario* (5ª ed.). México: Alfaomega Grupo Editor S. A. de C. V.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y
Fotorresistencias

- (29) De la Cruz-Reyes, L. A. (11/01/2017). *Fotorresistencia: definición, características y tipos*. Ingenieriaelectronica.org. Recuperado de <https://ingenieriaelectronica.org/fotorresistencia-definicion-caracteristicas-y-tipos/>
- (30) unicrom.com. (2021). LDR-Fotorresistencia. Recuperado de <https://unicrom.com/ldr-fotorresistencia-fotorresistor/>
- (31) GL5516 LDR. Data sheet. Recuperado de <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131892/ETC2/GL5516.html>
- (32) Corona Ramírez, L. G. Abarca Jiménez, G. S. y Mares Carreño, J. (2016). *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino*. México, México: Grupo Editorial Patria. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/parteaga/39464?page=44>.
- (33) Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C. & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (2ª ed.). España: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.
- (34) López-Aldea, E. (2017). *Raspberry Pi. Fundamentos y aplicaciones*. España: RA-MA Editorial. Recuperado de <https://yolibrospdf.com/electronica.html>
- (35) Timmons-Brown, M. (2019). *Learn robotics with Raspberry Pi : build and code your own moving, sensing, thinking robots*. USA: No Starch Press, Inc.
- (36) González-Duque, R. *Python para todos*. Creative Commons Reconocimiento 2.5 España. Recuperado de <http://mundogeek.net/tutorial-python/>
- (37) Marzal, A. & Gracia, I. *Introducción a la programación con Python*. Universitat Jaume I. Recuperado de <http://www1.herrera.unt.edu.ar/biblcet/wp-content/uploads/2014/12/ippython.pdf>
- (38) Goodrich, M. T., Tamassia, R. & Goldwasser, M. H. (2013). *Data structures and algorithms in Python*. USA: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- (39) Fritzing. (2020). Fritzing. Recuperado de <https://fritzing.org/home/>
- (40) Gomáriz, S., Biel, D., Matas, J. & Reyes, M. (2000). *Teoría de control. Diseño electrónico* (2ª ed.). España: Ediciones UPC.
- (41) K. Ogata. (2010). *Modern Control Engineering* (5ª ed.) USA: PRENTICE-HALL NEW JERSEY
- (42) Raspberry.com (s.f.) Raspberry Pi OS. Recuperado de <https://www.raspberrypi.org/documentation/raspbian/>
- (43) Diogital Guide IONOS. (03/11/2020). Como configurar VNC en Raspberry Pi. Recuperado <https://www.ionos.mx/digitalguide/servidores/configuracion/como-instalar-y-configurar-vnc-en-raspberry-pi/>

ANEXO 1

Detalles técnicos del sistema de seguimiento solar de un solo eje de la empresa SolarFirst

(fuente: http://es.pvsolarfirst.com/single-axis-solar-tracking-system-solar-sun-tracker_p103.html)



Horizon S1 - Horizontal Single Axis Tracking System

Features Characteristics:

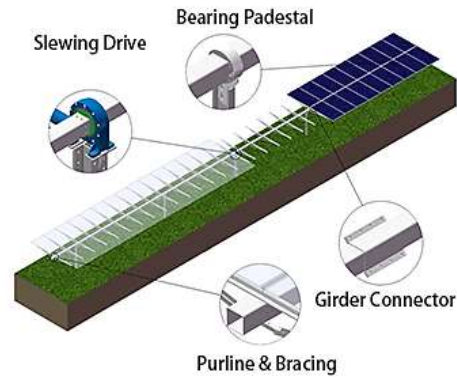
1. Max gradient difference adaptability in N-S direction up to 15%.
2. Excellent compatibility with all the mainstream solar modules available in the industry: framed, frameless and bi-facial.
3. Independent 2V module design, which reduces the quantity of piles and construction cost significantly.
4. Free obstacles among trackers in N-S direction, easy to maintain and clean.
5. Design configured with one single set of controller. which ensures point-to-point real-time monitoring, easy to detect fault points in time and reduce output loss.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

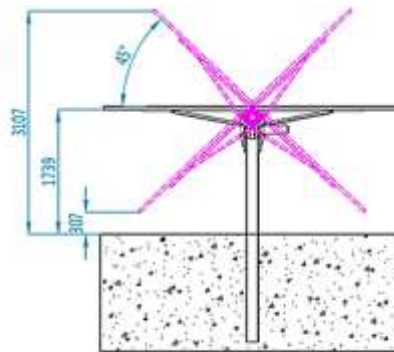
Tracking Structure

Tracking Technology	Horizontal Single Axis Tracker
System Voltage	1000V / 1500V
Tracking Range (East to West)	$\pm 45 / \pm 60$
Working Wind Speed	18 m / s (Customizable)
Max Wind Speed (at Stow Position)	35 m / s (ASCE 7-10)
Modules per Tracker / tables	≤ 60 in Portrait (Customizable)
Principal Materials	HDG Q235B / Q355B / ZAM
Mean Coating Thickness	$\geq 65 \mu\text{m}$
Drive System	Slewing Drive
Foundation type	PHC / Cast-in-place Pile / Steel Pile



Control System

Tracking Control	MCU
Tracking Mode	Closed Loop Time Control + GPS
Tracking Accuracy	$< 1^\circ$
Communication Interface	Wire / Zigbee
Power Acquisition Mode	External Supply / Self -Powered
Communication Protocol	Modbus RTU
Auto Stow at Night	Yes
Auto Stow During High Winds	Yes (response after 10 seconds)
Optimized Backtracking	Yes
Protection Degree	IP65
Working Temperature	$-30^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}$
Anemometer	Yes
Power Consumption	0.3 KW / H per day



Ingeniería Mecatrónica

Sistema de Seguimiento Solar: Desarrollo de un Sistema Mecatrónico empleando Raspberry Pi y Fotorresistencias

