

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TÍTULO DE LA TESIS

“Diseño y fabricación de un sistema mecatrónico de dos grados de libertad, en un panel fotovoltaico para captar la mayor parte de radiación solar”.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Lina Susana Trujeque De Rosas

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Blanca Estela González Sánchez

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González

Fecha: Julio de 2020



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Fecha: **Junio 16**, de 2020
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. MARIO LEONCIO ARRIJOA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la)
C.

LINA SUSANA TRUJEQUE DE ROSAS

La cual lleva el título de:

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE DOS GRADOS DE
LIBERTAD, EN UN PANEL FOTOVOLTAICO PARA CAPTAR LA MAYOR PARTE DE
RADIACIÓN SOLAR**

Y concluyen que se acepta.

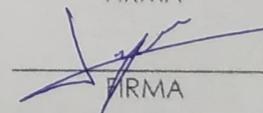
PRESIDENTE: M.C BLANCA ESTELA GONZÁLEZ
SÁNCHEZ


FIRMA

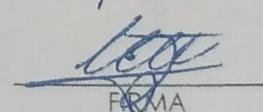
SECRETARIO: DR. OSCAR OSVALDO SANDOVAL
GONZÁLEZ


FIRMA

VOCAL: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN


FIRMA

VOCAL SUP.: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES
CUAUTLE


FIRMA

ATENTAMENTE

FTI-TI-013





EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Orizaba, Veracruz, Junio 16, de 2020.

Dependencia: POSGRADO

Asunto: Autorización de Impresión

OPCION: I

C. LINA SUSANA TRUJEQUE DE ROSAS

Candidato a Grado de Maestro en:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD, EN UN PANEL FOTOVOLTAICO PARA CAPTAR LA MAYOR PARTE DE RADIACIÓN SOLAR".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®

CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Delma Vargas López

L.I. DELMA VARGAS LÓPEZ

JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
PROFESIONALES



FTI-TI-018



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México.

Tel. 0 1 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail:

orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx



Contenido

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
CAPITULO 1.	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PROBLEMÁTICA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4 HIPÓTESIS.....	2
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.7 METODOLOGÍA.....	3
1.9 ESTADO DEL CAMPO	15
CAPÍTULO II. MARCO TEORICO.....	21
2.1 RESUMEN CAPÍTULO	21
2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	21
2.3 CELDAS Y PANELES SOLARES	22
2.3.1 Fundamentos físicos de las celdas solares[19].....	22
2.3.2 Panel fotovoltaico o módulos fotovoltaicos[19].....	22
2.4 SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR.....	23
2.5 CONTROL DE POSICIÓN DE MOTOR CORRIENTE DIRECTA[20]	24
2.5.1 Definición de términos básicos de control según [20].....	24
2.5.2 Clasificación de los sistemas de control.....	25
2.6 CONCEPTOS BASICOS APLICABLES PARA EL PROTOTIPO EN DESARROLLO.....	26
2.6.1 Modulación ancho de banda (pwm).	26
2.6.2 Driver L298.	26

2.6.3 Principio de funcionamiento del motor de corriente directa	27
2.7 MECANICA DE MATERIALES[25].....	27
2.7.1 Transmisión de movimiento.....	30
2.7.2 Transmisión de movimiento por engranajes	30
2.8 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR ARDUINO	31
2.8.1 Definición y uso de Arduino[26].....	31
2.8.2 Matlab	32
2.9 RED NEURONAL [28]	33
2.9.1 Definiciones.....	33
2.9.2 Clasificación de las redes neuronales[28].	36
2.9.3 Tipos de redes neuronales[28].	37
CAPÍTULO III. DESARROLLO	39
3.1 RESUMEN CAPÍTULO	39
3.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA MECATRONICO	39
3.2.1 Diseños y materiales	39
3.3 CONTROL DE POSICIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO	55
3.4 PROGRAMACION EN MICROCONTROLADOR	56
3.4.1 Adquisición de datos:	56
3.3 EXPERIMENTACIÓN	57
3.3.2 Experimentación del sistema mecánico.....	57
3.3.3 Experimentación del sistema electrónico	57
3.3.4 Diseño del módulo de sensores	60
3.3.5 Experimentación módulo de sensores.....	62
3.3.6 Experimentación del sistema del algoritmo de inteligencia artificial. en matlab.	69
3.3.7 Experimentación del sistema del algoritmo de inteligencia artificial. en Arduino.	83

3.3.8 Validación de red neuronal en Arduino (comparativo Arduino -Matlab).....	85
CAPÍTULO IV. PUESTA EN OPERACION	89
4.1 RESUMEN CAPÍTULO	89
4.2 PRUEBAS EN GRAL DEL SISTEMA.....	89
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
CONCLUSIONES	98
TRABAJO FUTURO	98
REFERENCIAS.....	99

Tabla de figuras:

Figura 1 Cuadro comparativo técnicas para mppt.....	9
Figura 2 Sistema fotovoltaico.....	21
Figura 3 Estructura panel de silicio	23
Figura 4 Driver L298 o Puente H	26
Figura 5 Reacciones de soportes en conexiones para fuerza aplicada	28
Figura 6 Plano de esfuerzo	29
Figura 7 Engranaje cilíndrico y cónico.....	30
Figura 8 Engranaje cilíndrico, dentado recto	31
Figura 9 Diagrama Clasificación lenguaje programación Arduino	31
Figura 10 Arduino DUE	32
Figura 11 Diagrama de comportamiento de neurona artificial	33
Figura 12 Niveles dentro de una red neuronal	34
Figura 13 Unión de capas todos con todos	34
Figura 14 Unión de capas lineal	35
Figura 15 Conexión predeterminada	35
Figura 16 Diagrama de clasificación de redes neuronales.....	36
Figura 17 Clasificación tipos de redes neuronales	37
Figura 18 Propuesta “a” de diseño de estructura para panel.....	40
Figura 19 Propuesta “b” de diseño de estructura para panel.....	40
Figura 20 Propuesta “c” de diseño de estructura para panel	41
Figura 21 Propuesta “d” de diseño de estructura para panel.....	41
Figura 22 Propuesta “e” de diseño de estructura para panel.....	42
Figura 23 Tubo o barra redonda de nylamid.....	42
Figura 24 Base giratoria cuadrada de 6"	43
Figura 25 Varilla roscada	43
Figura 26 Balero 6202 2rs.....	44
Figura 27 Diseño de piñon.....	45
Figura 28 Diseño engrane vista lateral “d”	46
Figura 29 Diseño engrane vista lateral “e”	46
Figura 30 Prueba engrane	47
Figura 31 Arreglo de transmisión (final).....	48

Figura 32 Prueba base nylamid con guarda	48
Figura 33 Diseño final de guarda de motor.....	49
Figura 34 Diseño de coples.....	49
Figura 35 Diseño final cople para flecha	50
Figura 36 Base de motor inferior	50
Figura 37 Base final de motor inferior	51
Figura 38 Soporte motor inferior	51
Figura 39 Estructura varilla y limit switch	52
Figura 40 Estructura final del prototipo.....	53
Figura 41 Estructura final del prototipo panel elevado	54
Figura 42 Código encoder	56
Figura 43 Conexión arduino, puente H y estructura	57
Figura 44 Estructura final	58
Figura 45 Monitor serial	59
Figura 46 Diseño de estructura modulo sensores.....	60
Figura 47 Vista frontal del diseño modulo sensores.....	60
Figura 48 Modulo de sensores impreso y conexiones	61
Figura 49 Aislamiento de sensores en modulo	61
Figura 50 Simulación de trayectoria solar.....	62
Figura 51 Simulación trayectoria solar con foco	62
Figura 52 Datos normalizados.....	69
Figura 53 Matriz de relación X, Y, Z.....	70
Figura 54 Iteraciones de la red.....	80
Figura 55 Instrucción nftool	80
Figura 56 interfaz de introducción a la red neuronal.....	81
Figura 57 Vista general de Red Neuronal en Simulink	81
Figura 58 Vista sub-interior de red neuronal	82
Figura 59 Vista interior de la red neuronal	82
Figura 60 inicio de red neuronal, programación Arduino.....	83
Figura 61 Pesos para red neuronal, ide arduino	84
Figura 62 Capa 1.....	84
Figura 63 Capa 2.....	85

Figura 64 Comparativo resultados 23 neuronas	85
Figura 65 Comparativo con 19 neuronas	86
Figura 66 Prueba con 50 neuronas	86
Figura 67 Validación de red.....	87
Figura 68 Comparativo datos calculados Excel vs resultados Arduino	88
Figura 69 Comparativo lecturas vs Arduino	89
Figura 70 Comparativo 2, lecturas vs Arduino	90
Figura 71 Trayectoria a seguir con luz para validación	91
Figura 72 Seguimiento horizontal	92
Figura 73 Seguimiento horizontal	92
Figura 74 Trayectoria horizontal centro.....	94
Figura 75 Trayectoria vertical.....	95
Figura 75 Trayectoria en diagonal.....	95
Figura 76 Trayectoria en diagonal.....	96

Tabla de graficas:

Grafica 1 Comportamiento voltaje de sensores en X.....	63
Grafica 2 Comportamiento voltaje de sensores en Y.....	64
Grafica 3 Comportamiento voltaje de sensores en Z.....	65
Grafica 4 De regresión lineal para 40 neuronas.....	71
Grafica 5 Error para 40 neuronas.....	72
Grafica 6 De regresión lineal para 30 neuronas.....	73
Grafica 7 Error para 30 neuronas.....	74
Grafica 8 Regresión lineal correspondiente a 20 neuronas	75
Grafica 9 Error con 20 neuronas.	76
Grafica 10 Regresión lineal para 15 neuronas	77
Grafica 11 error para 15 neuronas.....	78
Grafica 12 Regresión lineal para 10 neuronas	79

Contenido de tablas:

Tabla 1 Tabla comparativa ventajas y desventajas tres métodos.....	10
Tabla 2 Método MPPT con técnica tradicional	12
Tabla 3 Método MPPT con lógica difusa.	13
Tabla 4 Método MPPT con inteligencia artificial	14
Tabla 5 Patentes sobre seguidor solar	20
Tabla 6 Datos técnicos de panel solar	39
Tabla 7 Relación colores para identificación y conexión motor, cableado, arduino y puente H.....	55
Tabla 8 relación arduino y puente H.....	55
Tabla 9 identificación de conexión de sensor fin de carrera	55
Tabla 10 Resolución de encoder de motor	56
<i>Tabla 11 Lecturas de sensores correspondientes a "X"</i>	<i>63</i>
Tabla 12 Lecturas de sensores correspondientes a "Y"	64
Tabla 13 Lecturas de sensores en Z.....	65
Tabla 14 Máximos y mínimos.....	66
Tabla 15 Diferencia de mínimos y máximos.....	67
Tabla 16 Datos escalados	68

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el diseño, desarrollo, construcción y pruebas preliminares de un sistema mecatrónico de dos grados de libertad, que permite posicionar un panel solar a fin de maximizar la captación de radiación solar.

Para determinar la posición del panel solar, se utilizaron sensores de iluminación que permiten determinar la cantidad de luz que se recibe en cada uno de los cuatro puntos cardinales, determinados en el sistema.

El procesamiento de estas señales emplea inteligencia artificial para colocarse en la posición correcta en la cual se encuentre el sol respecto a la tierra y así poder aprovechar al máximo la energía captada por el panel solar.

Dentro de los materiales que se utilizaron para el diseño del sistema, se dio referencia a aquellos que presentan una mayor resistencia mecánica respecto al peso, por lo cual se dio preferencia al aluminio, impresión en 3d, filamento de ácido poli láctico (PLA), así como nylamid.

Algunos otros componentes también usan este material, por ejemplo, los coples, guarda motor. Una base de los motores es de nylamid.

ABSTRACT

This paper describes the design, development, construction and preliminary tests of a mechatronic system with two degrees of liberty, which allows to position a solar panel in order to maximize the capture of solar radiation.

To determine the position of the solar panel, lighting sensors were used to determine the amount of light received at each of the four cardinal points, determined in the system.

The processing of these signals uses artificial intelligence to position the sun in the correct position with respect to the earth in order to make the most of the energy captured by the solar panel.

Among the materials used for the design of the system, reference was made to those with greater mechanical resistance with respect to weight, which is why preference was given to aluminum, 3d printing, poly-lactic acid (PLA) filament, and nylamid. Some other components also use this material, e.g. couplings, engine guards. One base of the engines is made of nylamid.

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los diferentes combustibles fósiles, así como el grado de contaminación ambiental, responsable del calentamiento global, ha provocado que el uso de las energías renovables se haya incrementado en años recientes, por lo cual el uso de sistemas de energía de los llamados energías limpias, se ha vuelto más popular.

Las técnicas de captación solar, en particular y específicamente por medio de paneles solares son cada vez más comunes, el principal problema de estos paneles es su baja eficiencia de conversión. Cabe mencionar que estos sistemas de conversión (paneles) han sido objeto de muchos proyectos de investigación, utilizando diferentes tecnologías para lograr el objetivo de aumentar la eficiencia, el punto de partida para estos proyectos por lo general es a través del método de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

Una de las técnicas por medio de las cuales se busca aumentar su eficiencia, es a través de la implementación de una estructura mecatrónica, la cual pueda estar moviendo el panel en sentido a la posición solar y de esta forma incrementar la radiación solar incidente en el panel.

1.2 PROBLEMÁTICA

La mayoría de los paneles fotovoltaicos o solares se instalan de forma fija, esto da lugar a que el panel no se usa al máximo; dado que la tierra está en constante movimiento, por lo cual su posición en relación al sol cambia. La radiación que recibe el panel disminuye.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Dado que los paneles solares en su mayoría son de una instalación fija, por lo cual, al existir el movimiento giratorio de la tierra, su posición con respecto al sol cambia, esto origina que los paneles solo sean ocupados un porcentaje del día. Por lo cual se busca aumentar la cantidad de luz incidente mediante un sistema mecatrónico, asegurando que el panel esté en moviendo de acuerdo a la mayor incidencia de luz.

1.4 HIPÓTESIS

Por medio de un sistema mecatrónico es posible aumentar el tiempo de exposición a la luz solar de un panel fotovoltaico respecto a un panel fijo donde el sistema mecatrónico sea controlado por medio de un algoritmo de inteligencia artificial.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Construir un sistema mecatrónico guiado por inteligencia artificial, para aumentar el tiempo de exposición de un panel a la luz solar.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar una estructura mecatrónica para colocar un panel solar.
- Elaborar un control electrónico para que el sistema tenga movimiento controlado.
- Implementar un sistema de control de posición basado en inteligencia artificial para el panel.
- Implementar un módulo de sensores que determinen la dirección de máxima luminosidad.

1.7 METODOLOGÍA

La metodología se clasifica en tres diferentes áreas las cuales se desglosan a continuación.

- Mecánica:
 - Diseñar de la estructura a realizar para colocar el panel.
 - Impresión de componentes en 3d para la estructura a armar.
 - Cortado y armado de la estructura en aluminio
 - Ensamblado de los componentes anteriores
- Electrónica
 - Colocación de motores, diseño e impresión de bases para su colocación.
 - Colocación y prueba de interruptor de fin de carrera
 - Realizar conexiones microprocesador-puente h- motor.
 - Realizar programación de microcontrolador Arduino y realizar pruebas
 - Módulo de sensores
- Inteligencia Artificial:
 - Elaboración de la red neuronal que controlara el sistema mecatrónico.

1.8 ESTADO DEL ARTE

En (ESCOBAR MEJIA Ingeniero Electricista, Sc Profesor Asistente, HOLGUÍN LONDOÑO Ing Electricista, & CARLOS OSORIO Estudiante Ing Electricista, n.d.) la idea principal fue mantener el panel fotovoltaico de manera perpendicular a la radiación lumínica de la fuente de luz, lograron esto mediante un algoritmo programado en un microcontrolador de Motorola. En este artículo se clasifican a los seguidores solares de acuerdo al tipo de movimiento que realizan y según el algoritmo de seguimiento.

La clasificación de acuerdo al tipo de movimiento consiste en:

- Seguidor de un solo eje, solo puede seguir la inclinación solar o colocarse según sea el azimut
- Seguidor de dos ejes, puede seguir la inclinación solar y colocarse según sea el azimut, solo que el costo de implementación es más elevado respecto al otro (un solo eje).

La clasificación de acuerdo con el tipo de algoritmo para un seguidor solar es la siguiente:

- Según la luminosidad: se basa en la señal de entrada por uno o varios sensores, dependiendo de la señal que reciba envía una instrucción a uno o varios motores para que se posicionen en el punto con mayor luminosidad.
- Por programación astronómica: la ventaja de este algoritmo es que no depende de las condiciones climatológicas, dado que no se ocupan sensores o algún otro dispositivo. Consiste únicamente en una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento. Se menciona que la implementación del algoritmo representa un alto grado de complejidad.

La técnica seleccionada que se implementó en este artículo fue la de un seguidor de un solo eje y el algoritmo corresponde al seguidor de una fuente luminosa.

Las etapas que maneja el seguidor son:

1. Recepción y acondicionamiento de la señal de entrada
2. Procesamiento de la señal
3. Etapa de control
4. Etapa de potencia.

En la etapa 1. (recepción y acondicionamiento) se usó un módulo de conversión A/D del micro controlador MC68HC908GP32, dos sensores que son celdas fotovoltaicas las cuales tienen el mismo voltaje cuando los rayos luminosos incidan.

La etapa 2 y 3, se menciona que se realizó una comparación entre los valores obtenidos de los dos sensores (fotoceldas), dentro del código se usó un multiplexor para las señales. Se programó en lenguaje C y se ejecutó en el microcontrolador utilizando CODE WARRIOR.

La etapa 4 (potencia) se utilizó por un motor paso a paso, el cual tuvo como función mover la superficie de captación según se defina en la etapa de control.

Para la verificación del sistema se realizaron pruebas en un prototipo, utilizando una fuente lumínica artificial. Se tomaron varios valores para diferentes posiciones angulares, usaron un luxómetro para la verificación de datos obtenidos. También se tomaron los datos de la potencia de salida del panel, utilizando una tarjeta National instruments de 12 bits y 10 mil muestras por segundo.

En (Fin de Máster & Pedro Casanova Pelaez, 2015) se habla sobre la elaboración de un software para el control de un sistema de radiación solar, realizado en Arduino con una interfaz gráfica de entorno MATLAB. El programa se encarga de controlar la trayectoria de un sistema de radiación solar, obtiene una señal y envía la señal para ser almacenada. Se ocupó un prototipo de seguidor solar proporcionado por la institución donde se desarrolló este trabajo.

Su objetivo principal fue desarrollar un programa en Arduino, que controle los motores que darán movimiento al seguidor solar. Se envía la información obtenida por el sensor de radiación a través del puerto serial a una computadora posteriormente se graficarán en Excel los datos obtenidos

Se utiliza el puerto de comunicación serial para hacer el enlace con MATLAB-Arduino. Cabe mencionar que el sensor de radiación solar está formado por 31 pequeñas celdas fotovoltaicas instaladas en una estructura metálica en forma de semiesfera.

Se ocupó un pirómetro el cual se montó sobre el seguidor solar para poder medir la radiación en diferentes puntos y así hacer una interpolación con los datos del sensor de radiación, pudiendo así realizar una verificación de la información obtenida.

En este artículo (Ao & International Association of Engineers., 2010) se implementó un seguidor solar de alta precisión, se utilizó una cámara web comercial como elemento sensor, se diseñó y

elaboro un electro mecanismo para evaluar la precisión y eficacia en el seguimiento del sol bajo diferentes circunstancias.

A la cámara se le instalo un filtro polarizado de mascara de soldadura para evitar la saturación del dispositivo de acoplamiento de carga, cuando la radiación solar es muy elevada. Se aprovechó la instalación del filtro y se realizó una pre-binarización la cual acelera el proceso de localización del sol. La cámara se conectó a una computadora por medio del puerto USB, se utilizó MATLAB, con el cual se implementó un algoritmo de procesamiento de imágenes en los marcos entrantes, la señal de control electrónico se emitió a través del puerto de impresora la computadora.

“el sistema calcula el centroide del sol y sus coordenadas $S(x,y)$, luego se ven obligados a coincidir con las coordenadas del centro de la imagen $C(x,y)$ o con las coordenadas definidas por el usuario $U(x,y)$, esto se logra enviando los comandos de control necesarios a través del puerto de la impresora a un controlador de motores eléctricos. El programa puede ser instruido para fijar las coordenadas del sol en cualquier posición de la pantalla. Cuando la posición del sol cambia y cualquiera de las dos coordenadas varía, el sistema envía una señal digital a través del puerto de la impresora al motor asociado con la coordenada respectiva. La señal obtenida es proporcional al error en el valor de las coordenadas”.

Finalmente, el programa se ejecuta, cuando una nube atraviesa entre el sol y la cámara, el programa determina mantener la posición anterior a la actual así asegurando poder captar energía.

Las coordenadas pueden ser fijadas por el usuario a través del software elaborado en MATLAB, se argumenta que el uso de la cámara como sensor permite evitar problemas comunes como lo son la alta sensibilidad de los elementos discretos como fotodiodos o fototransistores a las condiciones climáticas, ya sea temperatura o humedad. Se menciona que la electrónica para la activación de los motores es sencilla.

Se propone en (Fathabadi, 2016) un novedoso seguidor solar de doble eje de alta precisión offline sin sensores. Este seguidor no utiliza ninguna señal de retroalimentación, por lo que su funcionamiento es independiente a las perturbaciones externas y de las condiciones meteorológicas, como el cielo nublado. Los números estimados son extraídos de las ecuaciones del mapa solar. En este trabajo el sistema implementado está conformado de la siguiente manera, cuenta con un controlador, motor paso a paso, uno que ajusta el ángulo de altitud del módulo fotovoltaico, y el segundo se encarga de ajustar el ángulo azimut, la caja de cambios de altitud, que

hace girar el módulo fotovoltaico de acuerdo al plano vertical alrededor del eje de altitud, y una caja de cambios para el ángulo azimut en el plano horizontal.

Este artículo de diseño de seguidor solar de doble eje basado en una imagen digital del hemisferio(El Jaouhari, Zaz, Moughyt, El Kadmiri, & El Kadmiri, 2018) se menciona que su eficiencia es alta, dado que usan una cámara de ojo de pescado el cual puede asegurar un amplio campo de visión. Además de que tiene una alta sensibilidad a la luminosidad en comparación con las fotoceldas comunes.

Utiliza un algoritmo que realiza cálculos para extraer la posición del sol de las imágenes de todo el cielo.

El proceso que se sigue es el siguiente: La cámara esta fija y orientada hacia el cielo de tal manera que las imágenes captadas muestran todo el cielo, por lo tanto se ejecuta el programa basado en estrategias de seguimiento solar(luminosidad máxima), se extrae el área más brillante, se obtiene encontrando el valor máximo de intensidad de pixeles, se utiliza la técnica del umbral de imagen, la posición del sol se calcula matemáticamente a partir de la imagen hemisférica, se obtienen las coordenadas y se envía la información a un microcontrolador el cual procesa y genera las instrucciones para mover los motores en los ángulos óptimos.

Este artículo (Mancilla-David, Riganti-Fulginei, Laudani, & Salvini, 2014) trata de la elaboración de un sensor para medir la radiación, el sensor propuesto consta de una celda fotovoltaica, sensor de temperatura y un microcontrolador de bajo costo.

Se considera la implementación de un enfoque de redes neuronales para detectar la radiación, que a su vez se puede también utilizar para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia y seguimiento (MPP).

La técnica consiste en medir la tensión en los bornes de la celda fotovoltaica y temperatura de esta, estos datos se introducen en un algoritmo de red neuronal artificial, el cual está entrenado en un microcontrolador que calcula la radiación solar real con gran precisión. Se propone que el sensor se integre con el panel y así hacer una comparación sobre la radiación obtenida por uno y por otro, para asegurar un rendimiento mejorado. Se seleccionó una red neuronal prealimentada con una sola capa oculta.

Fue necesario conocer a detalle las curvas de rendimiento para los valores de irradiación y temperatura del panel fotovoltaico del fabricante, para poder utilizar el modelo matemático a través de una matriz. Se utilizó el algoritmo de Levenberg-Marquardt y un algoritmo genético.

En (Lian, Nayanasiri, Maskell, & Vilathgamuwa, 2015) este artículo de seguimiento de máxima potencia híbrido para instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas en los trópicos, se combina la técnica del punto de máxima potencia (MPP) y una red neuronal basada en el seguidor de punto de máxima potencia (MMPT) .

En este documento (De Electrónica, n.d.) se hace un análisis detallado sobre los diferentes métodos que utilizando el método de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT). Esta clasificación se muestra en la Figura 1 Cuadro comparativo técnicas para mppt. Cabe mencionar que no son todos los métodos existentes, solo son los que más frecuentemente se usan.

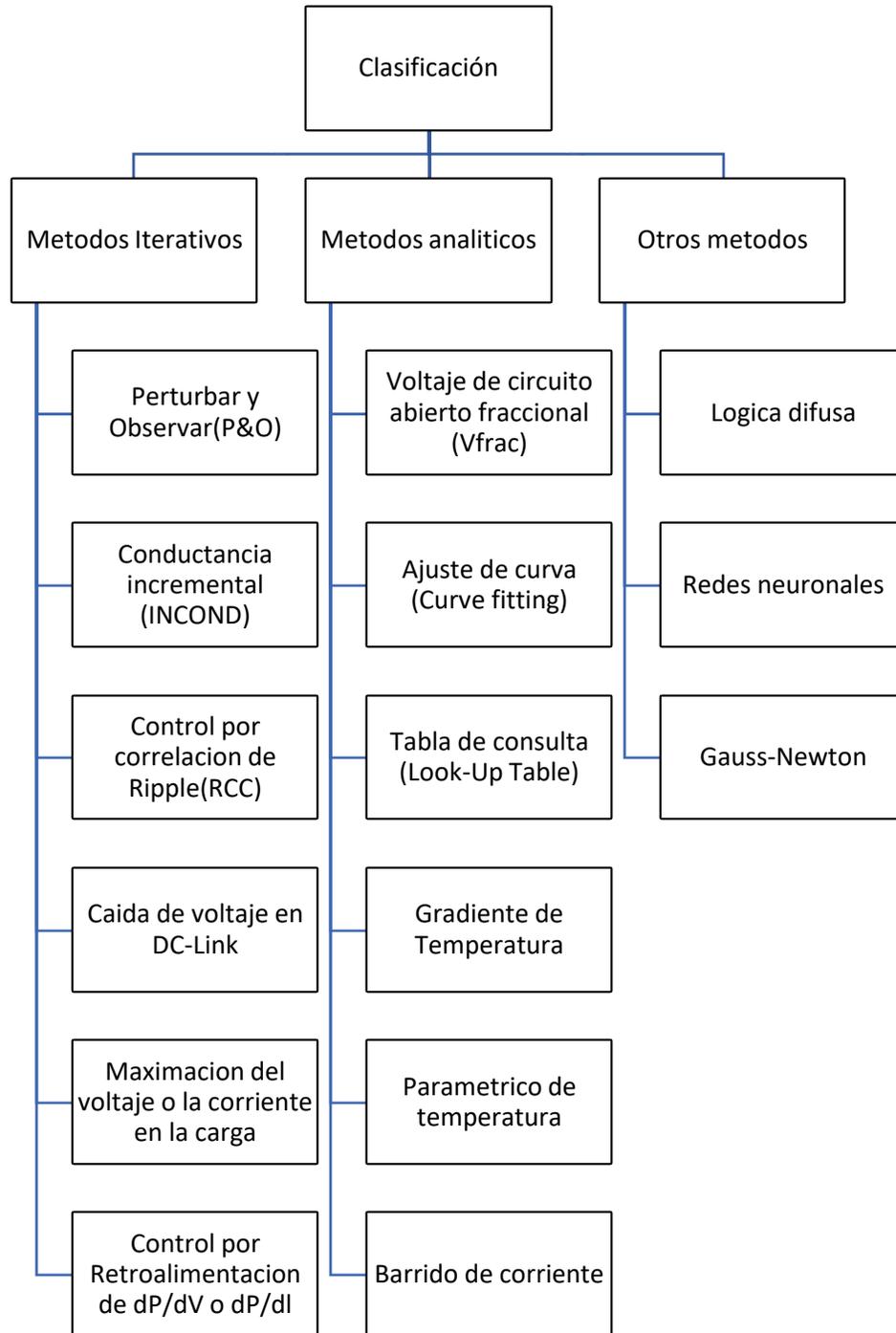


Figura 1 Cuadro comparativo técnicas para mppt.

De acuerdo al documento enlistado (8), se seleccionaron tres métodos, basado en artículos que el autor (8) analizo previamente, el método Perturbar y Observar (P&O) fue seleccionado en base a la frecuencia de uso en diferentes estudios.

Los métodos seleccionados para analizar y comparar su eficiencia son:

- Método Perturbar y Observar (P&O).
- Método Voltaje de circuito abierto fraccional
- Método Gradiente de temperatura.

Los métodos de voltaje abierto fraccional y método Gradiente de temperatura, el autor selecciono daba la facilidad, simplicidad y eficiencia para poder satisfacer las necesidades de una instalación domestica fotovoltaica. En la tabla se agrupan de acuerdo a los resultados obtenidos en (De Electrónica, n.d.), se elaboró la tabla comparativa (1) que agrupa los tres métodos seleccionados, en los cuales se mencionan las principales ventajas y desventajas.

Método empleado	Ventajas	Desventajas
MPPT y método perturbar y Observar (P&O).	La desviación con respecto al MPP en su punto de operación no es tan notorio, y la perdida de potencia no es notable.	Se mantiene en un valor fijo cuando la radiación solar disminuye, por lo tanto, no logra seguir al MPP.
Método voltaje de circuito abierto fraccional.	Sigue el MPP cuando los niveles de radiación solar sobre pasan 500[W/m ²].	Perdida de potencia al operar en circuito abierto siguiendo al MPP. Si la radiación es menor a 500[W/m ²]. No es capaz de medir voltaje de circuito abierto y entrega un voltaje inferior al que debería.
Método Gradiente de temperatura.	Ante cambios de temperatura sigue eficientemente la forma al MPP.	Presenta dificultad para seguir los cambios de radiación solar, debido a que en su algoritmo no considera esta variable (radiación solar)

Tabla 1 Tabla comparativa ventajas y desventajas tres métodos

Los métodos empleados en [9] son un algoritmo programado en Visual Basic versión 6.0 y un microcontrolador PIC18F4553.

Ventajas:

La estructura diseñada da soporte y firmeza estructural al seguidor, da soporte a los sistemas de movimiento, y ofrece unión y agarre de los mismos.

La energía generada aumento en un 27.98% en comparación con el panel fijo.

Se demostró que para el país de México de acuerdo a la ubicación que se tenía para el estudio, es necesario que la estructura cada 60 minutos se esté moviendo. Extracción de información mediante USB (grabado en automático por una unidad USB).

Desventajas:

Se tiene que ingresar manualmente las coordenadas de la ubicación, se menciona que el sistema diseñado es apto para todo el país de México.

La solución que se plantea en [10] abarcar principalmente dos puntos:

- Buscar un foco de luz o el punto de mayor luminosidad
- Seguir el movimiento del foco si este se mueve.

Esto es que se debe tener dos funcionamientos básicos como seguidor solar, se considera el movimiento solar sobre la superficie terrestre, principalmente se mueve en dos ejes , uno que es el este donde sale el sol y oeste donde se oculta el sol ,se considera cierta altura dependiendo la estación del año y la posición desde la cual se observe.

Para lograr generar el foco de luz se colocan cuatro placas fotovoltaicas, el ángulo de incisión lumínico repercute de manera crítica para obtener medidas, a lo que los sensores o celdas fotovoltaicas se deben ajustar para que todos estén en el mismo ángulo y permanezcan inmovilizados. Para poder lograr su control se elaboró un control proporcional integral derivativo (PID). Los componentes utilizados son: Microcontrolador PIC18F4520, motores polulo de corriente DC, conversor RS-232, controlador L293.

En el artículo [11] es un estudio comparativo sobre los controles de seguimiento de punto de potencia máxima basados en inteligencia artificial para sistemas fotovoltaicos. Por lo cual se hace una tabla comparativa agrupando las principales ventajas y desventajas de cada uno de los métodos. Se menciona el título de los artículos, método empleado basado en seguimiento de punto de

máxima potencia (MPPT). Algunos de los artículos mencionados se enlistan en la Tabla 2 Método MPPT con técnica tradicional, Tabla 3 Método MPPT con lógica difusa. y Tabla 4 Método MPPT con inteligencia artificial. La primera hace referencia a la utilización del método MPPT y una técnica tradicional o común, las siguientes tablas utilizan el método MPPT y lógica difusa, también ocupan algoritmos de inteligencia artificial.

Título Artículo/Tesis	Método empleado	Ventajas	Desventajas
“Flatness-Based Control for the Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic System”[12] Control basado en la planitud para el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico	Basado en un convertidor BOOST	Se basada en la planitud. Es capaz de converger en menos de 0.15 segundos, en comparación con otras técnicas MPPT, como Conductancia Incremental y Perturbación y Observación. Mejora la respuesta contra cambios repentinos en la carga o las condiciones climáticas. Muestra que el comportamiento oscilatorio alrededor del MPP se evita con el enfoque propuesto. Se detecta que no es uniforme la energía en el panel.	Se debe tener un amplio conocimiento en modelos matemáticos.

Tabla 2 Método MPPT con técnica tradicional

En Tabla 3 Método MPPT con lógica difusa. Se en listan algunos artículos utilizando el método MPPT con lógica difusa.

Título /Artículo/Tesis	Método empleado	Ventajas	Desventajas
<p>“Seguimiento de la potencia máxima de un sistema fotovoltaico genérico a través de un controlador difuso y un convertidor DC-DC de dos etapas”[13]</p>	<p>Técnica de rastreador de máxima potencia, utilizando lógica difusa</p>	<p>El seguidor de punto de máxima potencia, utiliza un convertidor de potencia de corriente continua de dos etapas. Mientras que la segunda etapa se utiliza para alimentar el bus de CC con la tensión necesaria para la conexión a la red. Proporciona un voltaje de refuerzo a la salida de la corriente continua haciéndolo más estable. La velocidad de seguimiento es más estable y rápida en comparación con el método P&O.</p>	<p>La inversión en equipo para poder ejecutar este programa.</p>
<p>“Convertidor SEPIC basado en el controlador de lógica difusa para el seguimiento máximo del punto de poder”[14]</p>	<p>Técnica de MPPT, utilizando lógica difusa.</p>	<p>Muestra una alta precisión en la transición de corriente. Mantiene el voltaje sin cambios, en caso de carga variable. Puede rastrear con precisión la señal de referencia y transferir potencia alrededor de 4.8% que un sistema convencional de un proporcional integrativo (PI).</p>	
<p>“A new intelligent MPPT method for stand-alone pv systems operating under fast transient variations of shading patterns”[15] “Un nuevo método inteligente MPPT para sistemas fv autónomos que operan bajo variaciones transitorias rápidas de patrones de sombreado”</p>	<p>Rastreo máxima potencia global en condiciones de sombra parcial, utilizando lógica difusa</p>	<p>Se combina un nuevo bucle de seguimiento basado en un controlador de lógica difusa con un algoritmo de escaneo y almacenamiento. Se diseña y valida un modelo fotovoltaico basado en Simscape (modelos de sistemas físicos dentro de Simulink), se utiliza para evaluar el rendimiento del método propuesto. Se ha demostrado que el método desarrollado ha mejorado en gran medida la eficiencia de seguimiento en PSC y disminuye significativamente el tiempo de respuesta. Las oscilaciones insignificantes en torno al GMPP, la convergencia rápida e independiente del sistema son las principales ventajas del método propuesto.</p>	

Tabla 3 Método MPPT con lógica difusa.

Título Artículo/Tesis	Método empleado	Ventajas	Desventajas
<p>“A genetic algorithm optimized ANN-based MPPT algorithm for a stand-alone PV system with induction motor drive” [16]</p> <p>Algoritmo genético optimizado basado en MPPT RNA para un sistema fotovoltaico autónomo con accionamiento por motor de inducción.</p>	<p>Técnica seguimiento del punto máxima basado en redes neuronales artificiales</p>	<p>Tiempo de respuesta fue menor debido al paso variable.</p> <p>Las oscilaciones alrededor del MPP se redujeron a obtener el máximo rendimiento de potencia en estado estacionario.</p>	<p>El MPP puede ser considerado como carga de procesamiento incluida para implementar métodos de inteligencia artificial.</p>

Tabla 4 Método MPPT con inteligencia artificial

1.9 ESTADO DEL CAMPO

En este apartado se muestran, las patentes referentes al tema que se está desarrollando.

TITULO		DESCRIPCIÓN	N. DE PUBLICACIÓN INTERNACIONAL
SEGUIDOR MECÁNICO	SOLAR	Seguidor solar mecánico que aporta un sistema de seguimiento de la posición del sol con respecto a la tierra, con el fin de direccionar sistemas captadores y transformadores de energía solar fotovoltaicos y térmicos, ya sean de radiación electromagnética dispersa o concentrada en cualquiera de sus variedades con el fin de conseguir una buena perpendicularidad en la captación y una perfecta focalización en los sistemas de concentración, con referencia al astro sol. Tiene la particularidad de que es, a grandes rasgos, un reloj astronómico, siendo en cuanto a construcción, mecánicos y permanentes en el tiempo, siguiendo fielmente los movimientos de la tierra respecto al sol, a lo largo de los años de funcionamiento. Esta invención tiene su aplicación en la industria de la transformación de energías limpias renovables.	WO2009030792A1
SEGUIDOR HIDRÁULICO DE DOS EJES	SOLAR	Seguidor solar hidráulico de dos ejes para la orientación y seguimiento de la trayectoria en los paneles colectores solares en un seguimiento de la captura de energía del entre 30 y el 40% con respecto a los paneles fijos. Este seguidor es de accionamiento hidráulico, sin ningún tipo de motor eléctrico ni reductor, todos los movimientos se consiguen gracias a tres cilindros hidráulicos. Gracias al mecanismo de movimiento utilizado, este seguidor puede ser confeccionado con materiales muy ligeros, materiales compuestos fabricados a base de resinas termoestables y fibra de vidrio.	WO2008096029A1

SEGUIDOR SOLAR	<p>Este tipo de seguidor solar consta de dos ejes y múltiples unidades/paneles, y posee las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una estructura portante modular, en la cual cada módulo consta de al menos dos largueros laterales dispuestos a 45°, los cuales soportan los ejes de giro de las unidades/paneles y apoyándose la estructura portante única y directamente al suelo por medio de ruedas fijables angularmente a voluntad a la estructura, disponiéndose las unidades/paneles en filas horizontales con simetría en altura, teniendo al menos una fila sus unidades/paneles desplazado en un sentido su centro de gravedad respecto a su eje de giro, y su correspondiente fila simétrica teniéndolo desplazado en sentido contrario. 	WO2008152162A1
SEGUIDOR SOLAR DE DOS EJES CIRCULAR, PARA PEQUEÑAS Y GRANDES INSTALACIONES DE CAPTADORES SOLARES CON UN RANGO DE POTENCIA ENTRE 5KWP-2MWP Y DE SUPERFICIE ENTRE 50M2-25.000M2	<p>Este tipo de seguidor solar es caracterizado por tener la siguiente especificación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estructura circular dispuesta en retícula, con posibilidad de giro de 360° en ambos sentidos, a través de roderas e impulsado por trenes de avance accionados por servomotores con reductor y ruedas guía. • Los captadores solares elegidos, se disponen en filas sobre las estructuras horizontales. Situados perpendicularmente en el eje horizontal, existen uno actuadores-empujadores lineales que se deslizan bajo perfiles de tracción, permitiendo el abatimiento de los captadores solares entre 0°-90°. Con lo que se garantiza la perpendicularidad de la radiación solar y se maximiza la captación solar. • Dispone de un sistema de seguridad basado en una estación meteorológica, que bloquea las filas de captadores tumbando los captadores en rachas de viento y posicionándolos verticalmente para acumulación de nieve. 	WO2009034214A2

SEGUIDOR SOLAR DE DOBLE EJE	<p>Seguidor solar que cuenta con las siguientes especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una subestructura principal conformada por una serie de pilares entre los que se disponen unos tramos de vigas unidos por unos ejes intermedios y que puede girar respecto de un eje longitudinal. • Contiene subestructuras secundarias formadas por un bastidor de fijación de los paneles solares y que giran respecto de un eje transversal al longitudinal y de unas piezas de conexión entre los bastidores y las vigas y respecto de las que quedan articuladas, siendo actuados los bastidores por unas bielas unidas a una deslizadera común. • Dispone el centro de gravedad del conjunto de la estructura muy próximo al eje longitudinal, lo que facilita su actuación, reduce la sensibilidad frente al viento y facilita el montaje, además cuenta con cierto grado de tolerancia longitudinal, y permite mejorar el aprovechamiento del terreno al poder montar una mayor potencia por metro cuadrado. 	WO2008090241A1
UN SISTEMA DINÁMICO DE SEGUIMIENTO SOLAR	<p>Se describe un sistema dinámico de seguimiento solar, para el aprovechamiento óptimo de la energía solar mediante las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paneles de placas fotovoltaicas o térmicas, las cuales desarrollan un seguidor que es de naturaleza modular. • Configuración de una viga principal susceptible de alineamiento con otras de igual naturaleza, siendo este conjunto de vigas principales susceptible de pivotamiento respecto a su eje longitudinal, estando cada una de estas vigas compuesta por un número variable de módulos formados por perfiles que en su conjunto proporcionan a cada viga una configuración a modo de malla de tetraedros. 	WO2007096439A1

	<ul style="list-style-type: none"> • Cada uno de los cuales se monta una estructura de vigas secundarias para soportar los paneles de placas, estando esta estructura secundaria sustentada por dos soportes laterales respecto a los que puede girar respecto a un eje transversal a la dirección longitudinal de las vigas principales. • El conjunto incorpora medios de control para la orientación automática de los paneles, y una estación meteorológica para la provisión de información a los medios de control. 	
DISPOSITIVO DE ACCIONAMIENTO PARA GIRO RELATIVO DE ESTRUCTURAS, Y SEGUIDOR SOLAR	<p>Este dispositivo comprende de las siguientes especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una polea motriz montada sobre un árbol soportado en una primera estructura y accionado por un motor. • Una polea conducida fijada a una segunda estructura y montada coaxialmente respecto a un eje de referencia de giro relativo entre la primera y la segunda estructuras. • Un cable dispuesto alrededor de parte de las poleas motriz y conducida. • El cable abraza la polea motriz por un ángulo mayor que 180° y menor que 360°, y dos tramos del cable se cruzan entre la polea motriz y la polea conducida. • El eje del árbol de la polea motriz esta inclinado respecto al eje de referencia. • Un ángulo suficiente para que dichos tramos no se toquen mutuamente en el punto de cruce. 	WO2009141468A1
MECANISMO DE ACTUACIÓN PARA SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR	<p>Mecanismo de actuación para sistemas de seguimiento solar o seguidores, donde se comprenden las siguientes especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una serie de múltiples apoyos o pilares, sobre los que se dispone de forma articular una estructura para soporte y fijación de unos paneles solares donde el mecanismo de actuación comprende un actuador longitudinal que ejerce sobre una barra de actuación desplazable de forma paralela al eje de giro del seguidor. 	WO2014118395A1

	<ul style="list-style-type: none"> • El actuador longitudinal puede ser de accionamiento hidráulico o de acción directa o indirecta o de accionamiento eléctrico. • Se consigue no tener limitación alguna de la dimensión del voladizo, y no suponer obstáculo alguno entre cada fila de seguidores, al disponerse longitudinalmente y no transversalmente, lo que facilita las labores de montaje y mantenimiento. 	
SEGUIDOR SOLAR A DOS EJES	<p>Seguidor solar a dos ejes, cuenta con las siguientes características</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con un sistema móvil de soporte para paneles solares que favorece al máximo la producción energética. • Esta conformado por un eje vertical y otro eje horizontal respecto de los que girará para seguir la trayectoria trazada por el sol y los cuales son los componentes de una estructura apoyada en su centro y sobre ruedas en su periferia, quedando a su vez apoyado sobre una superficie o pista de rodadura. • Una estructura que gira sobre un punto central fijo donde se apoya el eje vertical del seguidor, incorporando dicha estructura el eje horizontal sobre el que se sitúa al menos un tablero para acoger a los paneles o módulos solares, pudiendo dicho tablero o tableros girar sobre dicho eje horizontal para que los paneles solares se mantengan perpendiculares a los rayos solares. 	WO2008043871A1
SEGUIDOR SOLAR CON MECANISMO DE GIRO AZIMUTAL	<p>Seguidor solar con mecanismo de giro azimutal dispuesto en el extremo superior del pedestal que comprende las siguientes especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una base fija. • Un sombrerete hueco de soporte de la estructura portante dispuesto sobre la base. • Un elemento mecánico giratorio dispuesto entre el sombrerete y la base fija. 	WO2013178850A1

		<ul style="list-style-type: none"> • Dos cilindros hidráulicos puestos a distinta altura respecto al eje vertical del sombrerete y fijados por un extremo al sombrerete, y por el otro unidos por un mismo eje fijo a la base de manera que cuando los pistones de los cilindros se accionan, impulsan el giro del sombrerete 	
SEGUIDOR MEJORADO	SOLAR	<p>Seguidor solar para el seguimiento de la trayectoria solar en dos ejes que comprende lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poste de perfil tubular anclado a una zapata • Un soporte intermedio acoplado a dicho poste formado por una estructura en celosía • Una parrilla sujeta al soporte intermedio que tiene una pluralidad de filas dispuestas de manera separada de paneles fotovoltaicos, • Dos correas en el que uno de los dos tramos enfrentados de dicha correa presenta un grado de inclinación respecto al otro, estando dichas correas dispuestas tal que definen una superior y una inferior, y en el que una de ellas tiene una altura mayor con respecto a la otra de manera que las filas de paneles fotovoltaicos están separadas dejando un espacio. 	WO2008043869A1

Tabla 5 Patentes sobre seguidor solar

CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

2.1 RESUMEN CAPÍTULO

Este capítulo está conformado sobre la literatura que hay referente a los temas empleados para realizar el sistema mecatrónico en un panel solar.

2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los paneles solares son dispositivos que se encargan de transformar parte de la radiación solar que incide en ellos dando lugar a energía eléctrica y sus principales componentes son las celdas de silicio, estos a su vez están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad y son llamadas “celdas fotovoltaicas”. Y estas dependen del efecto fotovoltaico para transformar la energía del sol y hacer que una corriente pase entre dos placas con cargas eléctricas opuestas.

Los sistemas fotovoltaicos (FV) son sistemas de energía solar que producen electricidad directamente de la luz solar, estos producen energía limpia y confiable sin consumir combustibles fósiles y se puedan usar en una amplia gama de aplicaciones.

Para ejemplificar a continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** , se aprecian los componentes que conforman un sistema fotovoltaico.



Figura 2 Sistema fotovoltaico

Las partes que conforman un sistema fotovoltaico, así como una breve descripción de cada uno de ellos se menciona a continuación:

- Celda o panel fotovoltaico: Capta la radiación luminosa emitida del sol, luego la transforma en CA con tensión de 12V ó 24V.
- Regulador de Carga: Brinda estabilidad al sistema, evita sobrecarga y descarga en las baterías.
- Banco de baterías: Almacena la energía producida.
- Inversor: Transforma la DC disponible en las baterías a AC.
- Carga: Serie de cargas acondicionadas para ser alimentada por el sistema FV.

2.3 CELDAS Y PANELES SOLARES

2.3.1 Fundamentos físicos de las celdas solares[19]

Es necesario comprender que para realizar la transformación de la radiación solar en electricidad se deben cumplir los siguientes aspectos:

- Existencia de una unión en elementos P-N
- Incidencia de fotones con energía igual o mayor a la banda del semiconductor.
- Producción de electrones y huecos.

Una vez que se obtengan estos elementos unidos, pasan a formar lo que es una celda solar, dado que se dice es un dispositivo formado básicamente por unión de P-N, la cual convierte la energía de radiación solar en energía eléctrica.

El principio de funcionamiento de una celda, está basado en el hecho de que la incidencia solar sobre la celda genera un voltaje y corriente, los cuales pueden ser utilizados para energizar algún equipo eléctrico, equipo o accesorios del mismo tipo.

2.3.2 Panel fotovoltaico o módulos fotovoltaicos[19].

Es un arreglo de celdas solares individuales, que si se conectan entre si forman un panel solar, la conexión de las celdas se realiza en serie. El conjunto de varios paneles forma un sistema fotovoltaico.

Para obtener un mayor rendimiento en los módulos fotovoltaicos se recomienda evitar hacer interconexiones de celdas solares con distintas características.

La vida útil de los módulos fotovoltaicos es de 25 a 30 año para aquellos basados en silicio. En la cual en la Figura 3 Estructura panel de silicio .

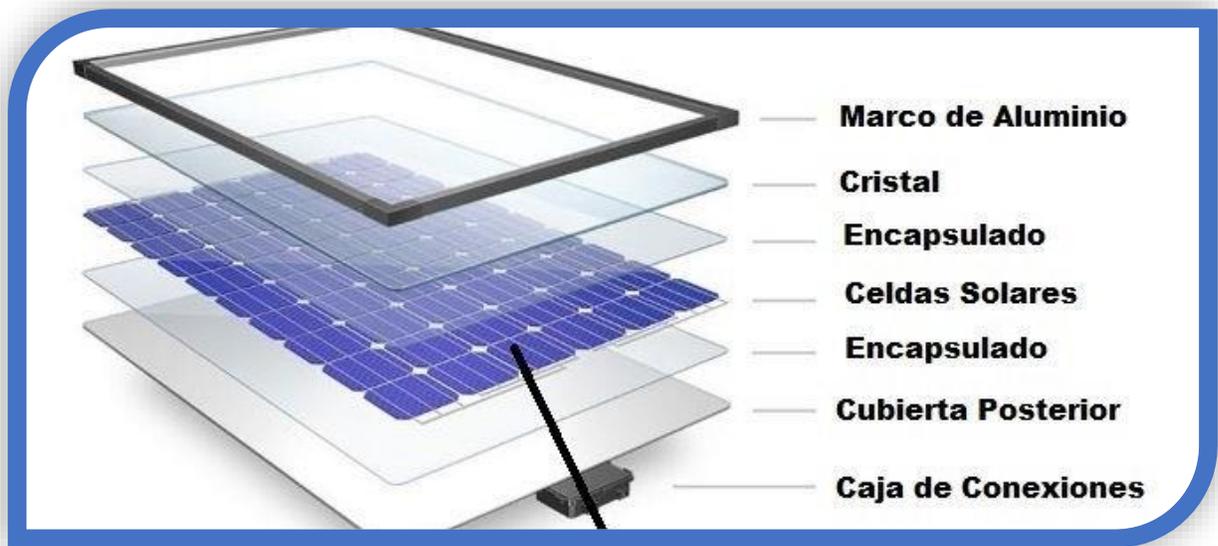


Figura 3 Estructura panel de silicio

Algunos usos que se les da a los paneles solares y sistemas fotovoltaicos son:

- Centrales solares
- Sistemas de iluminación
- Sistemas de tratamiento de aguas
- Sistemas de electrificación conectada a la red industrial o zonas urbanas.

2.4 SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

Los sistemas fotovoltaicos deben recoger la mayor cantidad posible de energía recibida en un determinado lugar, esta condición exige que la superficie colectora sea, en todo momento, perpendicular a los rayos solares y, por lo tanto, una colección óptima solo puede conseguirse si dicha superficie está dotada de un movimiento de seguimiento del sol.

Un sistema de seguimiento solar es un dispositivo capaz de orientar los paneles solares de forma perpendicular a los rayos solares para un mejor aprovechamiento de la radiación solar.

Las dos orientaciones más comunes de un sistema que sigue la trayectoria del sol para conseguir el mayor rendimiento posible de las radiaciones solares que inciden sobre una superficie o punto específico, son:

- Un eje para seguir al sol de este a oeste.
- Dos ejes que garantizan seguir siempre al sol de forma directa.

Para esto es importante conocer los tipos de seguidores solares:

- **Estructuras fijas.** son las más robustas y flexibles del mercado y estos permiten adaptarse a cualquier tipo de terreno con desniveles superiores.
- **Seguidores de un eje:** el seguidor solar estacional de un eje incrementa la producción de energía eléctrica en un 28 % más respecto a una instalación fija.
- **Seguidores de dos ejes.** Los seguidores a dos ejes permiten incrementar de manera gradual la eficiencia de la producción de energía eléctrica de los paneles solares fotovoltaicos.

El sistema de dos ejes es el mejor para aprovechar al máximo la radiación solar en todo momento, este sistema de seguimiento aprovecha tanto la radiación directa como la difusa

2.5 CONTROL DE POSICIÓN DE MOTOR CORRIENTE DIRECTA[20]

2.5.1 Definición de términos básicos de control según [20].

- Variable controlada: es la cantidad o condición que se mide y controla.
- Señal de control o variable manipulada: es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada, normalmente la variable controlada es la salida del sistema.
- Controlar: Es medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medio respecto del valor deseado.
- Plantas: se menciona que una planta es un conjunto de elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. De acuerdo con el autor [20] el término usado en el libro corresponde a cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial).
- Procesos : Para el autor [20] lo define como cualquier operación que se va a controlar.
- Sistemas: combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. No está limitado a los sistemas físicos.
- Perturbaciones: es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Existen dos tipos de perturbaciones:
 - Interna la que se genera dentro del sistema
 - Externa es la que se genera fuera del sistema y es una entrada.

- Control realimentado: se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia.

2.5.2 Clasificación de los sistemas de control

Los sistemas de control se clasifican principalmente en dos, puede ser sistema de control de lazo cerrado o sistema de control de lazo abierto, a continuación, se explica brevemente en que consiste cada uno.

Los sistemas de control realimentados o sistemas de control lazo cerrado son aquellos que mantienen una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control. En la práctica, los términos control realimentado y control lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control de lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.[20]

Sistemas de control en lazo abierto: sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control. Es decir, no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

Comparación entre los sistemas de control de lazo cerrado y lazo abierto.

Ventaja de sistema de control lazo cerrado:

- El uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema.
- Se ocupan cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema

Desventaja de sistema de control lazo cerrado:

- El número de componentes usados es mayor
- Costes mayores

Ventaja de sistema de control lazo abierto:

- Construcción simple y facilidad de mantenimiento
- Menos costosos que el sistema de lazo cerrado
- No hay problemas de estabilidad

Desventaja de sistema de control lazo cerrado:

- La perturbación y el cambio en la calibración originan errores, la salida puede ser diferente de lo que se desea
- Para mantener la calidad requerida en la salida, es necesaria la recalibración de vez en cuando.

2.6 CONCEPTOS BASICOS APLICABLES PARA EL PROTOTIPO EN DESARROLLO.

2.6.1 Modulación ancho de banda (pwm).

El autor [21] dice que al método de PWM se le puede llamar modulación por duración de pulso (PDM) o modulación por longitud de pulso (PLM). El ancho de pulso se refiere a la parte activa del ciclo de trabajo, es proporcional a la amplitud de la señal analógica.

En [22] define que la modulación por ancho de pulso es una señal de voltaje la cual se ocupa para modificar o enviar información sobre la cantidad de energía que se envía a una carga.

Para el sistema que se está realizando; en el microcontrolador Arduino se ocupan los pines de pwm, con ellos se realiza el control de la cantidad de energía que se envía a los encoder de los motores. Figura como señal analógica en circuitos digitales.

[22] dice que la señal es de tipo cuadrada, las cuales se cambia el ancho respecto al periodo de la misma, al cambio que se presenta se le llama ciclo de trabajo, para simular una señal analógica se cambia el ciclo de trabajo de tal que el valor promedio de la señal sea el voltaje aproximado que se desea obtener, par Arduino va en un rango de 0 Volts a 5 Volts.

2.6.2 Driver L298.

En [23] se menciona el uso que se le da al puente H, el cual sirve para controlar el giro de dos motores, el cual consiste en que los diodos actúan como controladores de la polaridad que se le aplica al motor. El controlador L298 Figura 4 Driver L298 o Puente H, ya cuenta con toda la electrónica instalada necesaria para realizar la operación de control de giro de motor .

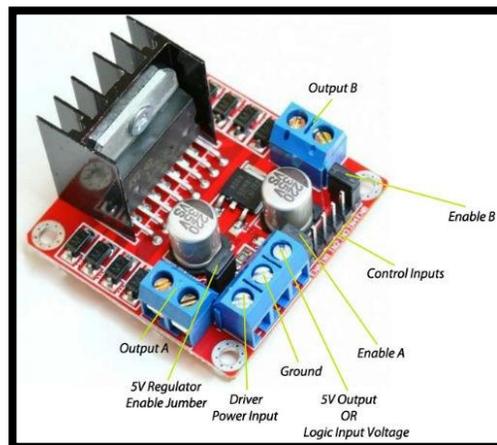


Figura 4 Driver L298 o Puente H

2.6.3 Principio de funcionamiento del motor de corriente directa

Se define como principio de funcionamiento de los motores eléctricos de corriente directa o continua se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente. De acuerdo con la ley de Lorentz, interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje. A este electroimán se denomina “rotor” y su eje le permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del imán permanente situado dentro de la carcasa o cuerpo del motor.[24]

2.7 MECANICA DE MATERIALES[25]

Es una rama de la mecánica aplicada que trata del comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a varios tipos de carga. Y estudia las relaciones entre las cargas externas aplicadas a un cuerpo deformable y la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro del cuerpo, esta a su vez implica calcular las deformaciones del cuerpo y proveer un estudio de la estabilidad del mismo cuando es sometido a fuerzas externas.

- **Equilibrio de un cuerpo deformable**

Es importante tener conocimiento de los principios fundamentales de la mecánica de materiales, en breve se definirán los conceptos básicos para tener un buen conocimiento sobre el tema.

- **Cargas externas.**

Un cuerpo puede estar sometido a diversos tipos de cargas externas y estas a su vez pueden clasificarse como fuerza de superficie o fuerza de cuerpo.

- **Fuerzas de superficie.**

Son causadas por el contacto directo de un cuerpo con la superficie de otro y estas son distribuidas sobre el área de contacto entre los cuerpos. En particular si esta es pequeña en comparación con el área total del cuerpo, entonces la fuerza superficial puede idealizarse como una sola fuerza concentrada, que es aplicada a un punto sobre el cuerpo.

- **Una fuerza de cuerpo**

Se desarrolla cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo sin contacto físico directo entre los cuerpos. Aunque las fuerzas de un cuerpo afectan cada una de las partículas que forman el cuerpo, esas normalmente se representan por una sola fuerza concentrada actuando sobre el cuerpo.

- **Reacciones en los soportes**

Las fuerzas de superficie que se desarrollan en los soportes o puntos de contacto entre cuerpos se llaman reacciones. En cuerpos sometidos a sistemas de fuerzas coplanares, los soportes más comunes se observan a continuación en la Figura 5 Reacciones de soportes en conexiones para fuerza aplicada.

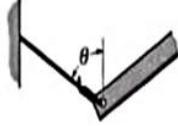
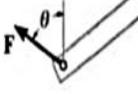
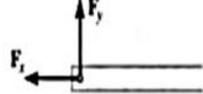
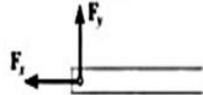
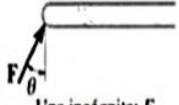
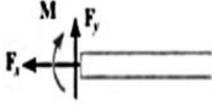
Tipo de conexión	Reacción	Tipo de conexión	Reacción
 Cable	 Una incógnita: F	 Pasador externo	 Dos incógnitas: F_x, F_y
 Rodillo	 Una incógnita: F	 Pasador interno	 Dos incógnitas: F_x, F_y
 Soporte liso	 Una incógnita: F	 Empotramiento	 Tres incógnitas: F_x, F_y, M

Figura 5 Reacciones de soportes en conexiones para fuerza aplicada

- **Ecuaciones de equilibrio**

El equilibrio de un miembro requiere un balance de fuerzas para impedir que el cuerpo se traslade o tenga movimiento acelerado a lo largo de una trayectoria recta o curva, y un balance de momentos para impedir que el cuerpo gire.

Se puede expresar matemáticamente con dos ecuaciones vectoriales

$$\sum F = 0$$

$$\sum M_0 = 0$$

- Aquí $\sum F$ representa todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo
- $\sum M_0$ es la suma de los momentos de todas las fuerzas respecto a cualquier punto 0 sobre o fuera del cuerpo.

- **Cargas internas resultantes**

Una de las aplicaciones más importantes de la estática en el análisis de los problemas de la mecánica de materiales es determinar la fuerza y momentos resultantes que actúan dentro de un cuerpo y que estas son necesarias para mantenerlo unido cuando está sometido a cargas externas. Para obtener las cargas internas que actúan sobre la región específica dentro del cuerpo es necesario usar el método de secciones, el cual requiere hacer una sección imaginaria o “corte” a través de la región donde van a determinarse las cargas internas.

- **Esfuerzo**

Se describe como la intensidad de la fuerza interna sobre un plano específico o también conocido como área y que pasa por un punto. Como se aprecia en la Figura 6 Plano de esfuerzo.

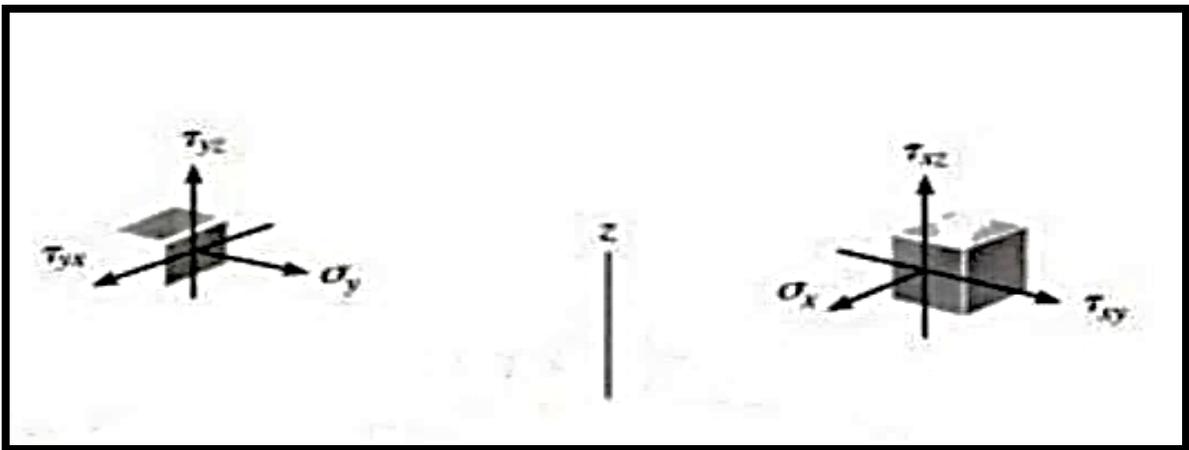


Figura 6 Plano de esfuerzo

- **Esfuerzo normal**

La intensidad de la fuerza, o fuerza por área unitaria, actuando normalmente ΔA y este se define como el esfuerzo normal, σ (sigma). Como ΔF_2 es normalmente al área.

- **Esfuerzo cortante.**

La intensidad de fuerza, o fuerza por área unitaria, actuando tangente se llama esfuerzo cortante.

- **Estado general de esfuerzo**

Este esfuerzo es caracterizado por tres componentes que actúan sobre cada cara del elemento. Y describen el estado de esfuerzo en el punto solo para el elemento orientado a lo largo de los ejes x, y, z .

- **Unidades**

En el sistema SI, las magnitudes de los esfuerzos normal y cortante se especifican en las unidades básicas de newtons por metro cuadrado (N/m^2)

2.7.1 Transmisión de movimiento

Se enfoca en estudiar los componentes que se emplean para transmitir movimiento de un conjunto mecánico, los principales componentes que se emplean son engranes, poleas y correas, cadenas. El movimiento que se genera se estudia desde donde se originan, debido a una fuente de energía.

2.7.2 Transmisión de movimiento por engranajes

Los engranes son elementos mecánicos que transmiten movimiento entre ejes no alineados, afectando la velocidad de giro. Los ejes pueden ser de diferentes formas, paralelos, cruzarse o cortarse formando cierto ángulo. La velocidad de giro de los ejes depende de los diámetros primitivos de los engranajes empleados.

Su principio de operación es mediante una rueda que trasmite el movimiento a la otra, de forma que no patinen entre sí, para lo cual las ruedas tienen “dientes” que se adaptan entre ambas, ver Figura 7 Engranaje cilíndrico y cónico. Se muestra de forma esquemática como una rueda puede transmitir el movimiento.

La rueda de menor tamaño, se denomina piñón o motriz y a la otra rueda se le denomina corona.

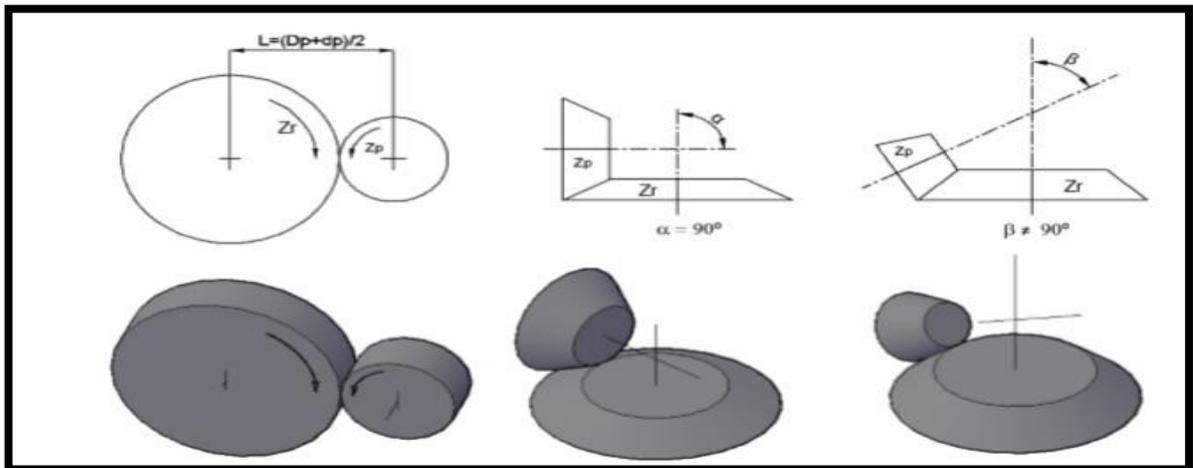


Figura 7 Engranaje cilíndrico y cónico

Para el sistema mecatrónico de dos ejes que se está desarrollando se ocupó el sistema de transmisión por engranajes cilíndricos con dentado recto, tal como se muestra en la Figura 8 Engranaje cilíndrico, dentado recto.



Figura 8 Engranaje cilíndrico, dentado recto

2.8 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR ARDUINO

2.8.1 Definición y uso de Arduino[26]

Se define a Arduino como una plataforma electrónica de código abierto, el hardware y software son fáciles de usar.

Las tarjetas Arduino cuentan con un circuito integrado programable (microcontrolador) en este caso, particularmente se ocupó el microcontrolador Atmel SAM3X8EARM Cortex-M3 CPU, el cual está instalado en la tarjeta Arduino Due, tiene 54 entradas/salidas digitales, 12 se ocupan como PWM, 12 entradas analógicas, 2 DAC, USB.

Las instrucciones que se programan se basan en el cableado (conexiones –cables-pines-componentes) utilizando programación de lenguaje Arduino y el software Arduino (IDE), basado en el procesamiento. Es un lenguaje con unas sentencias y sintaxis muy similares a las de lenguaje C.

Como se muestra en la Figura 9 Diagrama Clasificación lenguaje programación Arduino, existen varias instrucciones a utilizar en la programación, esas instrucciones a su vez están clasificadas de acuerdo a su uso.

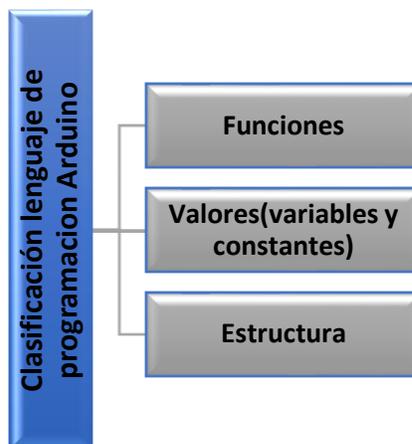


Figura 9 Diagrama Clasificación lenguaje programación Arduino

Se ha elegido utilizar la plataforma Arduino para el control del seguidor porque proporciona una facilidad de uso muy grande y la programación que exigen es bastante sencilla e intuitiva. A diferencia con otros microcontroladores, esta plataforma facilita la configuración del microcontrolador gracias a unas librerías que podemos encontrar en la página oficial de Arduino. En la Figura 10 Arduino DUE, se puede ver la imagen de la tarjeta de Arduino DUE.

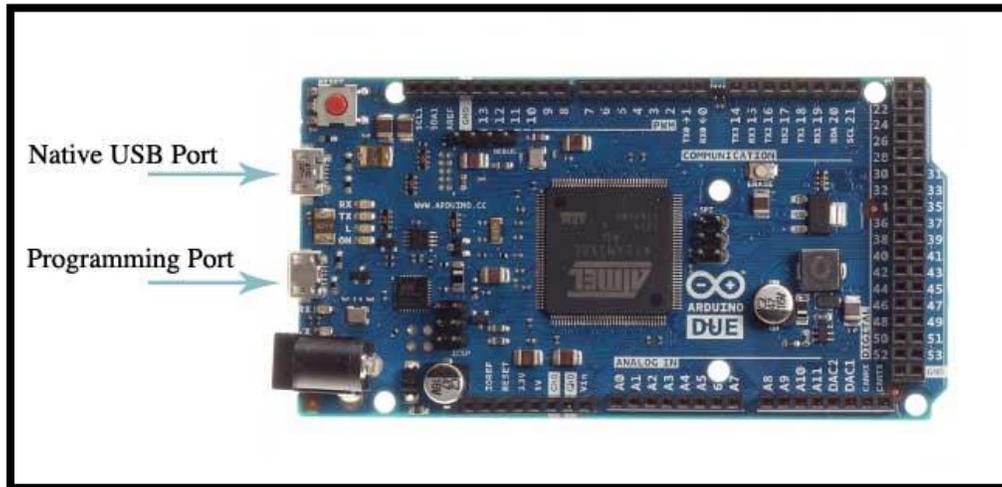


Figura 10 Arduino DUE

2.8.2 Matlab

Cabe mencionar que MATLAB es software dedicado al análisis iterativo y los procesos de diseño con lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arreglos directamente.[27]

Los archivos que se generan con extensión m, donde se incluye todos los comandos a ejecutar. Algunas cosas que se realizan con MATLAB son la integración con orígenes de datos y sistemas empresariales, ejecución en dispositivos embebidos, es decir hace de forma automática la conversión en código C/C++ y HDL. También se realiza la integración con el diseño basado en modelo, para esto se colabora con Simulink, que consta de una simulación multidominio.

2.9 RED NEURONAL [28]

2.9.1 Definiciones

El autor define a una red neuronal artificial, como aquella que simula el comportamiento de una neurona biológica, menciona que la red neuronal aún está muy lejana a poder procesar información como lo hace una red biológica.

Dentro de la red neuronal artificial, cada neurona se representa como una unidad de proceso que forma parte de una entidad mayor es decir la red neuronal.

En la Figura 11 Diagrama de comportamiento de neurona artificial, se muestra el comportamiento de una neurona artificial la cual de forma simplificada imita a la neurona biológica.

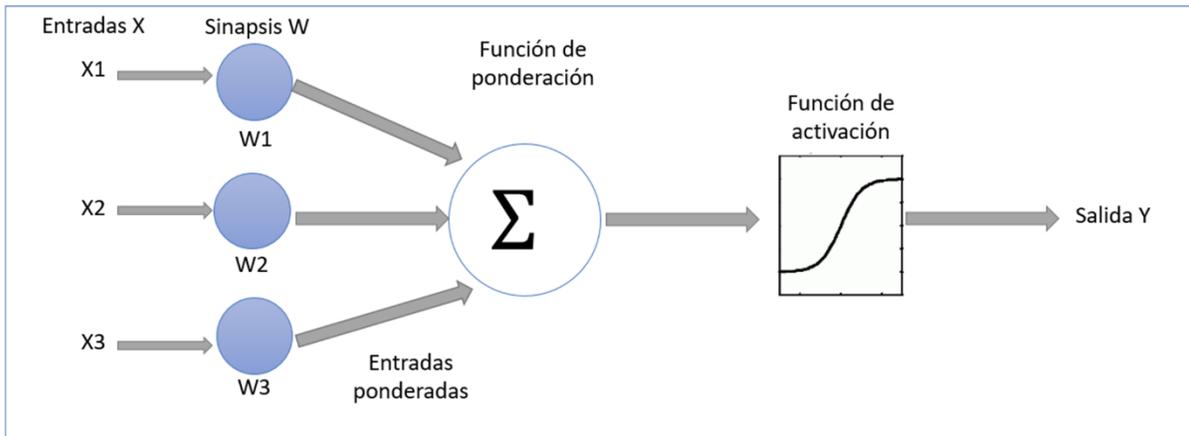


Figura 11 Diagrama de comportamiento de neurona artificial

Por lo tanto, en la Figura 11 Diagrama de comportamiento de neurona artificial, las entradas X representan los valores que llegan, estos pueden ser enteros, binarios o reales.

La sinapsis W se refiere a los pesos de las conexiones (para la neurona biológica es la efectividad de la sinapsis) y la interacción entre X y W la cual inducen a la neurona a cambiar su comportamiento, la neurona biológica W representa los mecanismos que existen en la sinapsis para a transmitir la señal, a modo que la unión entre X y W equivalen a las señales químicas inhibitorias y excitadoras que se dan en la sinapsis para cambiar su comportamiento.

X y W (suma de entradas y pesos sinápticos) son los valores de entrada de la función de ponderación, los cuales los convierte en uno solo llamado potencial.

La salida de función de ponderación llega a la función de activación que transforma este valor en otro en el dominio que trabajan las salidas de las neuronas, las salidas en esta parte del proceso suelen ser la función identidad, aunque hay sistemas en que no es así.

Dentro de la red neuronal se tienen diferentes niveles o capas, mostrados en Figura 12 Niveles dentro de una red neuronal, las cuales se agrupan en tres:

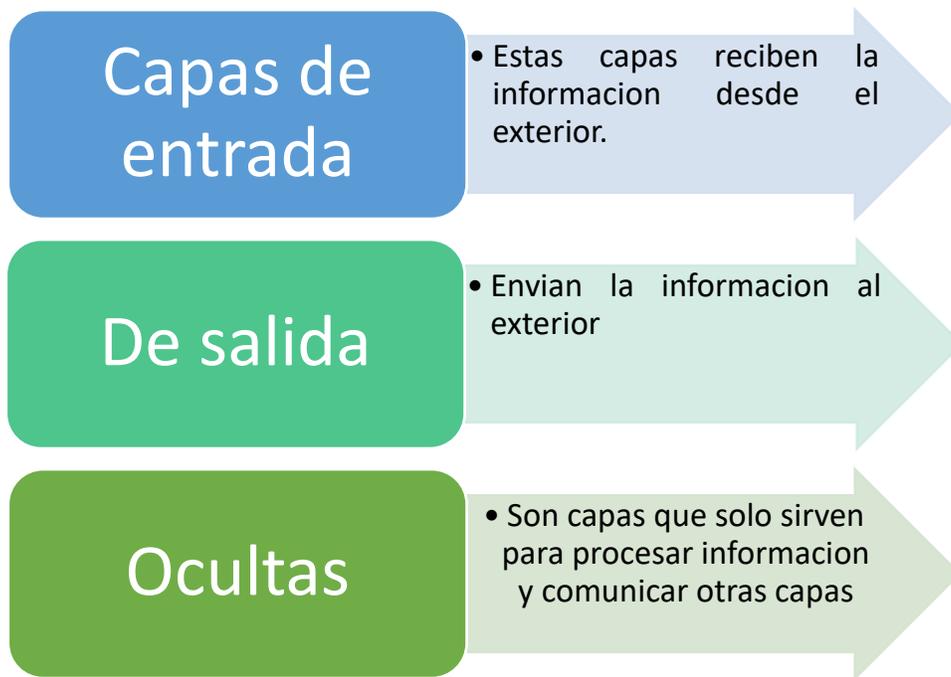


Figura 12 Niveles dentro de una red neuronal

Cabe mencionar que algunos autores no consideran las entradas y salidas como capas, simplemente se usan como sensores, ya que para ellos las entradas y salidas no son válidas para producir procesamiento.

Las capas se pueden conectar de diferentes formas [28]

Unión todos con todos, consiste en unir cada neurona de una capa con todas las neuronas de la otra capa, este tipo de conexión se usa en todas las redes neuronales, desde la perceptrón multicapa a las redes de Hopfield o BAM. Para entender lo mencionado ver Figura 13 Unión de capas todos con todos.

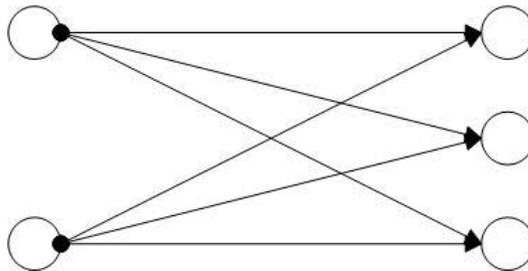


Figura 13 Unión de capas todos con todos

La siguiente opción de unión de las capas es de forma lineal, esta unión se usa normalmente para unir la capa de entrada con la capa de procesamiento, si la capa de entrada se usa como sensor. También se usa en algunas redes de aprendizaje competitivo. Ver Figura 14 Unión de capas lineal.

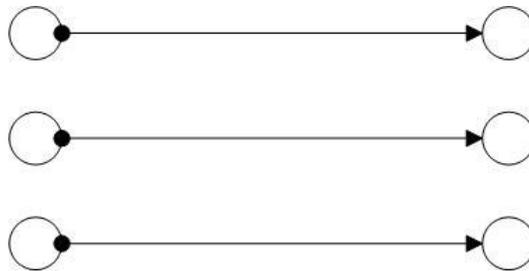


Figura 14 Unión de capas lineal

Unión de capas predeterminado, esta conexión aparece en redes que tienen la propiedad de agregar o eliminar neuronas de sus capas y de eliminar también conexiones. Ver Figura 15 Conexión predeterminada.

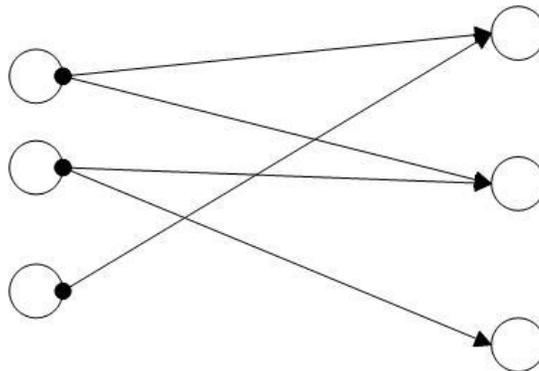


Figura 15 Conexión predeterminada

El orden de las conexiones puede ser adelante o hacia atrás o conexiones laterales, las cuales puede clasificar a las redes feedforward o hacia adelante, no tienen ninguna conexión hacia atrás, y feedback.

2.9.2 Clasificación de las redes neuronales[28].

Esta clasificación el autor la realiza de acuerdo a las funciones más sobresalientes de cada red, misma que aparece en Figura 16 Diagrama de clasificación de redes neuronales.

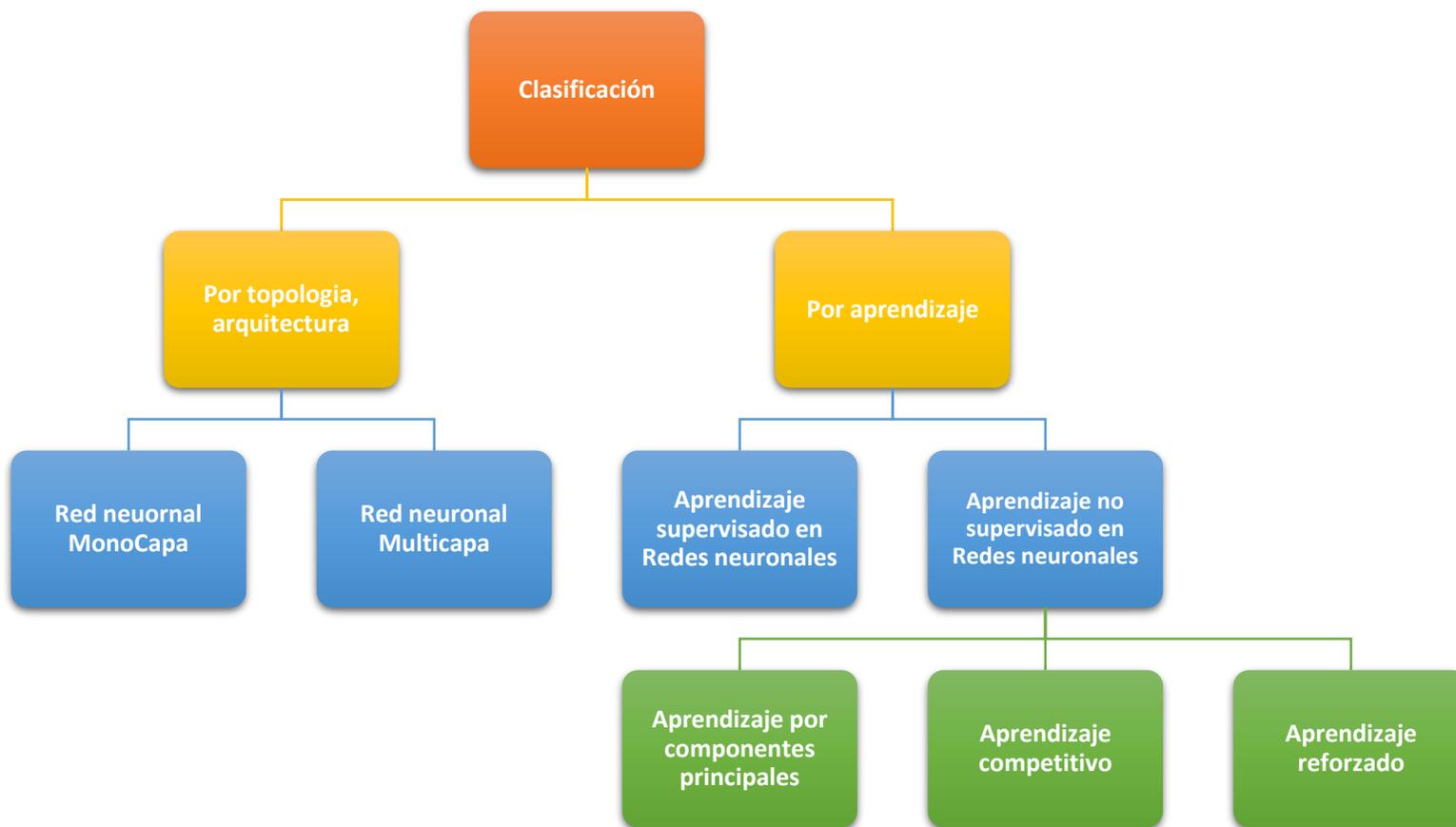


Figura 16 Diagrama de clasificación de redes neuronales

2.9.3 Tipos de redes neuronales[28].

La Figura 17 Clasificación tipos de redes neuronales, muestra una de las principales clasificaciones de los diferentes tipos de redes neuronales de acuerdo a [28].

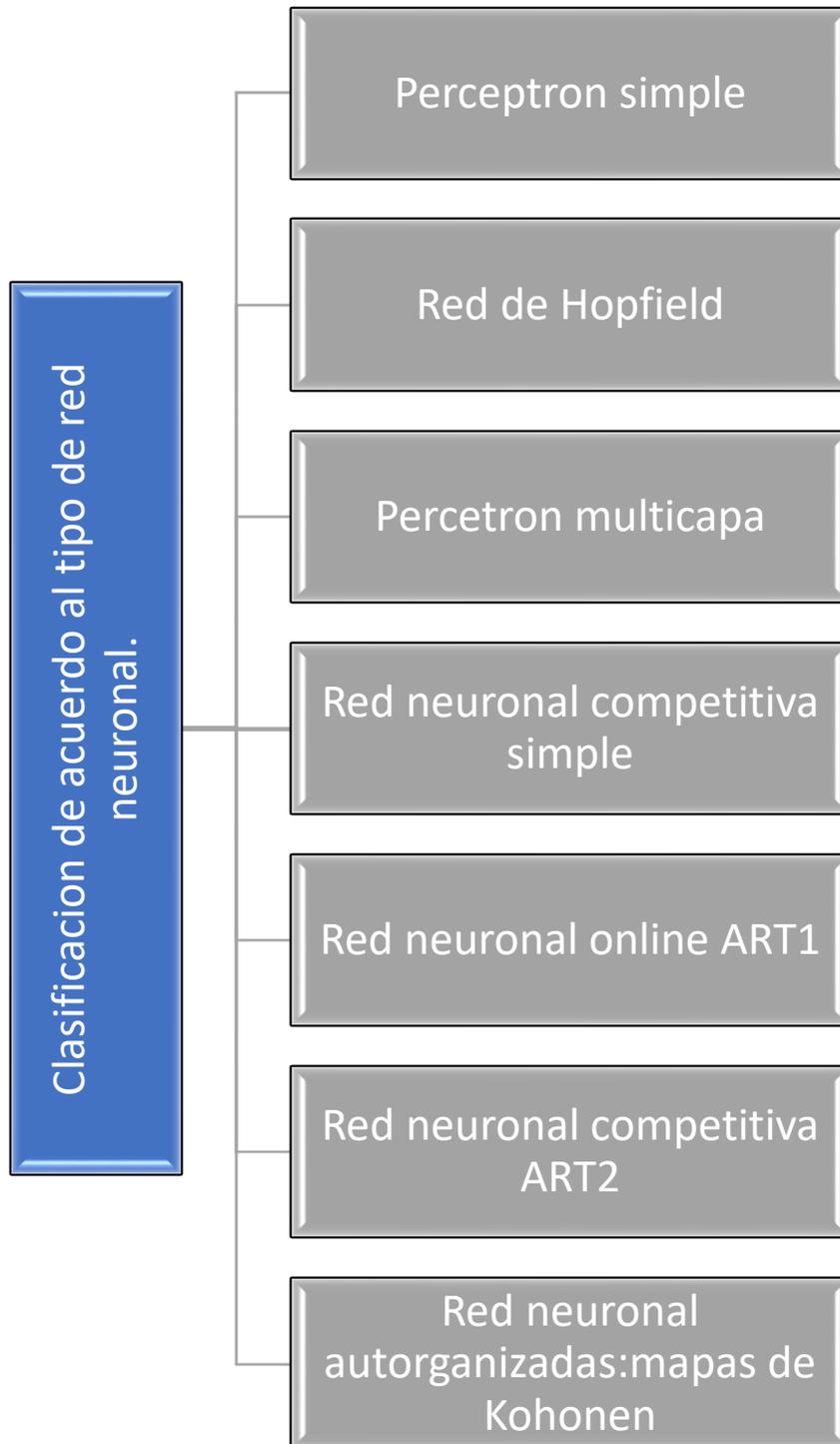


Figura 17 Clasificación tipos de redes neuronales

Redes neuronales Multicapa: Estas redes se caracterizan por estar formadas por varias capas. Estas a su vez se subclasifican de acuerdo al tipo de conexión entre sus capas.

Que son las redes con conexión hacia delante o feedforward, usualmente están ordenadas de acuerdo a la señal de entrada hasta la salida y están unidas en ese orden; ejemplos de estas redes son: Perceptron, adaline, Mandaline, Backpropagation y los modelos LQV y TMP de Kohonen.

Es importante resaltar que la red neuronal a ocupar en este proyecto es una red de conexión específicamente utilizando la técnica de entrenamiento Backpropagation.

CAPÍTULO III. DESARROLLO

3.1 RESUMEN CAPÍTULO

En este capítulo se describe como se fue desarrollando el proyecto desde la forma mecánica hasta la puesta en operación. Cabe mencionar que para poder ejecutar estas actividades fue necesario desarrollar habilidades, por ejemplo, aprender a diseñar en un programa específico (fusión 360).

3.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA MECATRONICO

3.2.1 Diseños y materiales

Se inició con diseños en fusión 360, especificando las características que el diseño tendría. Se elaboraron varios diseños, se seleccionó el diseño más económico para realizarse pero que cumpliera con el objetivo.

Además de evaluar los movimientos mecánicos que debe estar realizando la estructura.

Cabe mencionar las características del panel solar policristalino son las siguiente Tabla 6 Datos técnicos de panel solar:

Descripción	Unidad de medida	N.
Máxima capacidad producción.	Watt	10
Tolerancia.	Porcentaje	± 3
Máximo voltaje.	Volt	18.3
Máxima Corriente.	Amper	0.52
Voltaje en circuito abierto	Volt	21.2
Corriente de corto circuito	Amper	0.65
Voltaje máximo del sistema	VCD	600
Tamaño	Mm	341x280x18
Peso	Kg	1.22
Condición ambiente	1000W/m ² , 1.5amper, 25°C.	

Tabla 6 Datos técnicos de panel solar

A continuación, se muestran los diferentes diseños evaluados para realizar el prototipo del sistema mecatrónico. Los cuales se pueden observar en las figuras de la 24 a la 30.

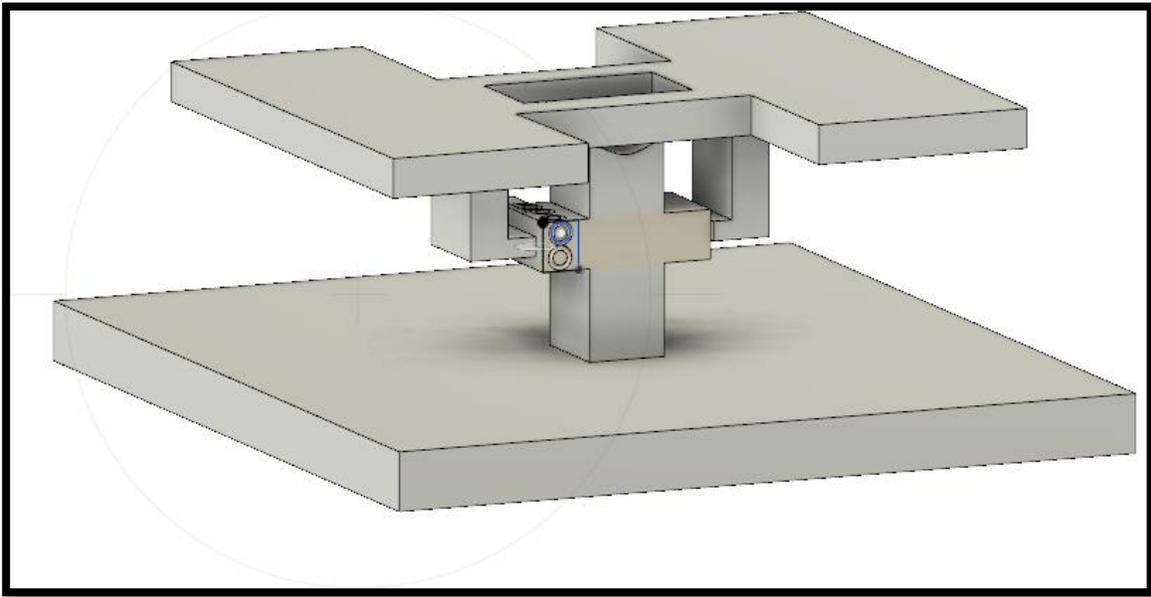


Figura 18 Propuesta "a" de diseño de estructura para panel

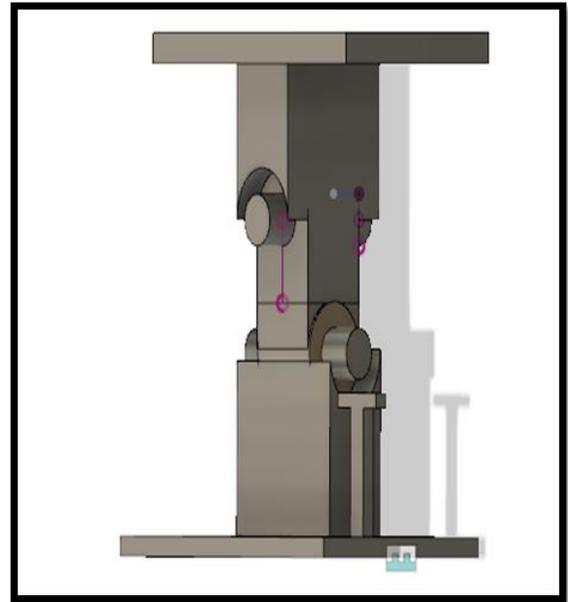
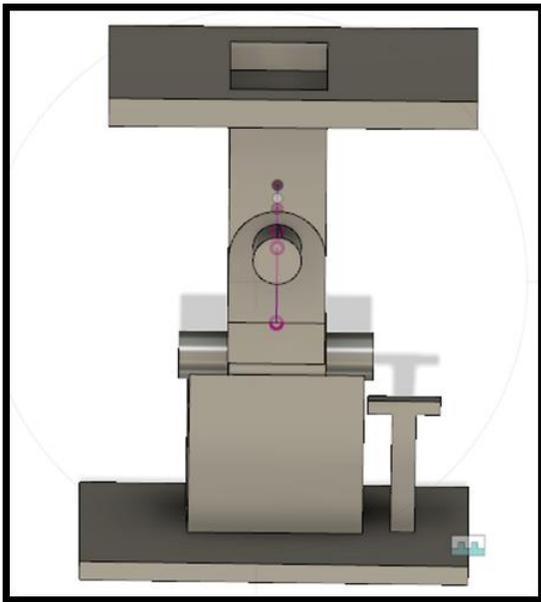


Figura 19 Propuesta "b" de diseño de estructura para panel

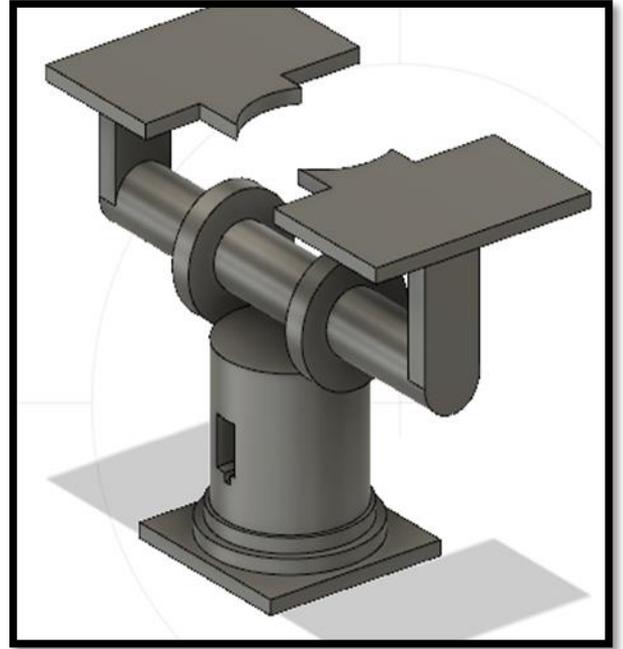
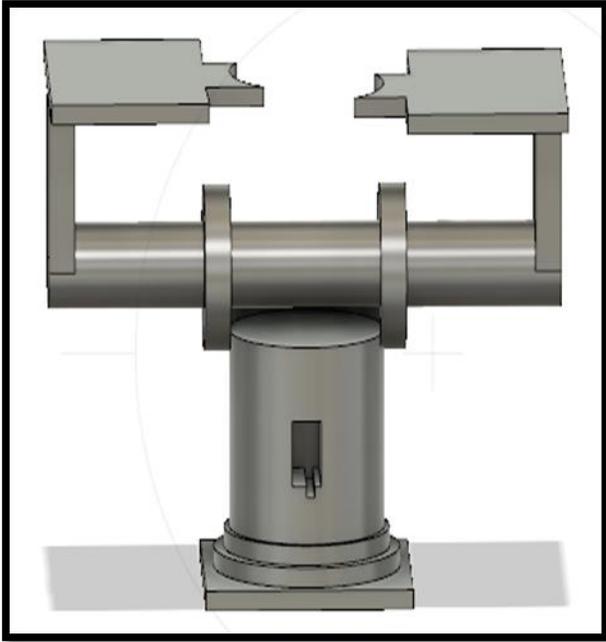


Figura 20 Propuesta "c" de diseño de estructura para panel

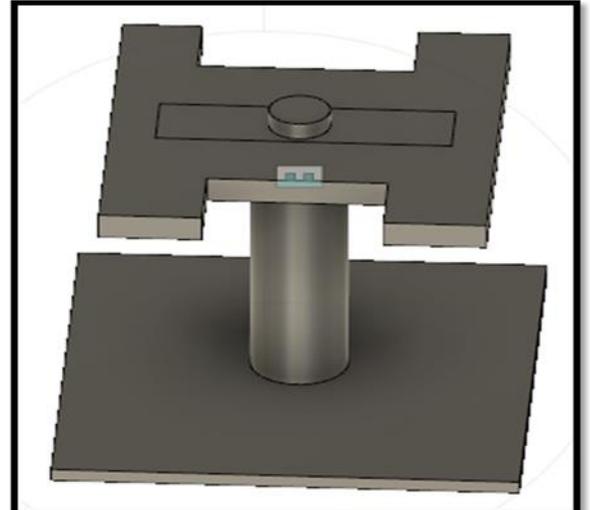
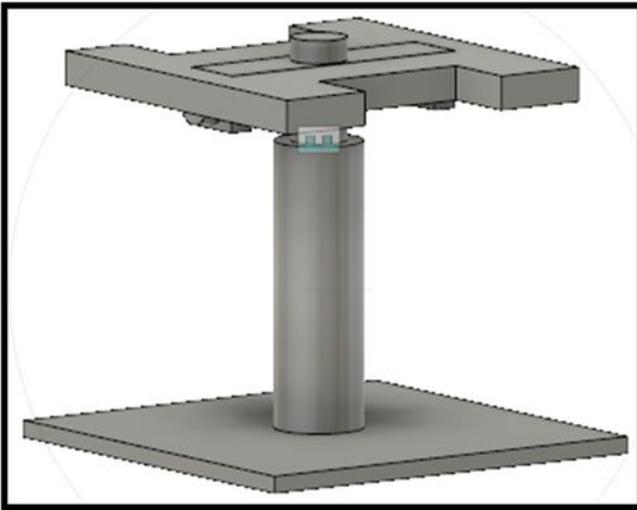


Figura 21 Propuesta "d" de diseño de estructura para panel



Figura 22 Propuesta “e” de diseño de estructura para panel

El diseño seleccionado para ser realizado es el mostrado en la Figura 22 Propuesta “e” de diseño de estructura para panel, debido a que su construcción es económica, cumple con la función que se necesita, por la forma en la que esta facilita la rotación y elevación/inclinación para el panel.

La base y la escuadra que sostendrá al panel son de aluminio debido a la maleabilidad que tiene este material, su costo, peso y resistencia al exterior.

La parte baja que se encargara de dar altura y rigidez a la base está conformada por 4 tubos de 15cm de alto, el tubo es de material nylamid. Ver Figura 23 Tubo o barra redonda de nylamid



Figura 23 Tubo o barra redonda de nylamid

Entre la unión de la base y el eje contenedor de panel, se coloca una base giratoria cuadrada de 6", hecha de acero con acabado galvanizado, altura de 8mm, giro 360° y soporta hasta 227kg. Ver Figura 24 Base giratoria cuadrada de 6"

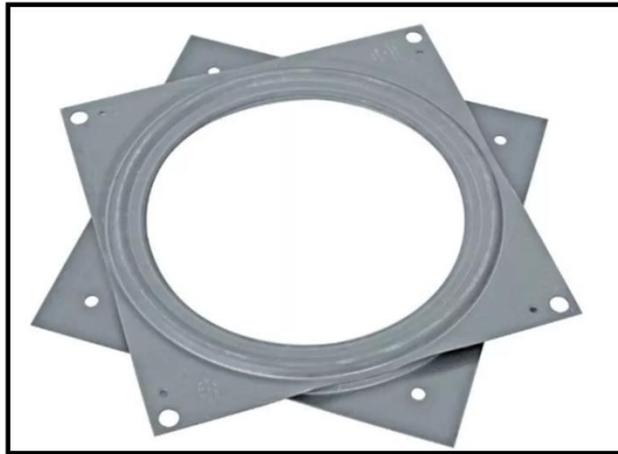


Figura 24 Base giratoria cuadrada de 6"

La unión entre panel y ejes laterales de aluminio se realiza con una varilla roscada zincada.



Figura 25 Varilla roscada

Entre la varilla roscada y los laterales se colocó un balero de cada lado, para facilitar el movimiento giratorio de la varilla y panel.



Figura 26 Balero 6202 2rs

En el desarrollo del arreglo mecánico para poder automatizar el movimiento, se ocuparon varias técnicas, se intentó con un arreglo de poleas, en algún momento se perdía la función deseada, se hizo la prueba con arreglo de polea y contra pesos, se complicaba entre la colocación de los contrapesos, dejarlos de forma fija etc.

Por último, se intentó con un arreglo de engranes, los cuales se basó en el principio de trasmisión, que es el que se encarga de la relación entre las velocidades de rotación de dos engranes conectados, la relación se da por la diferencia de diámetro entre uno y otro engrane.

Se inició con diseño en fusión 360, para imprimir el engrane y ver la factibilidad de este mecanismo.

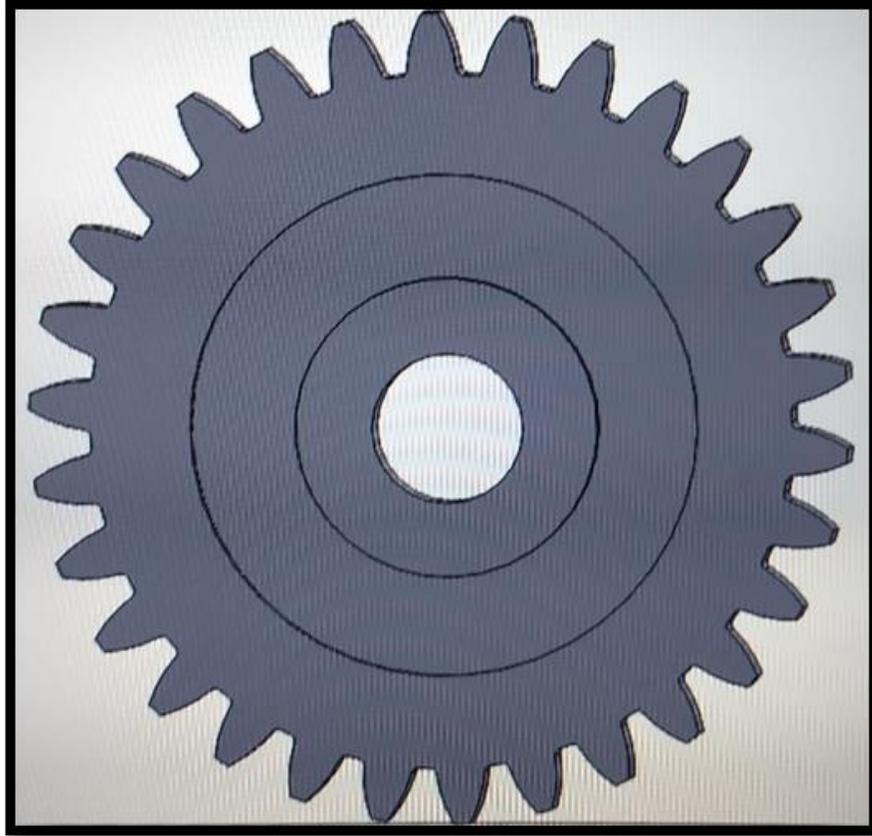


Figura 27 Diseño de piñon

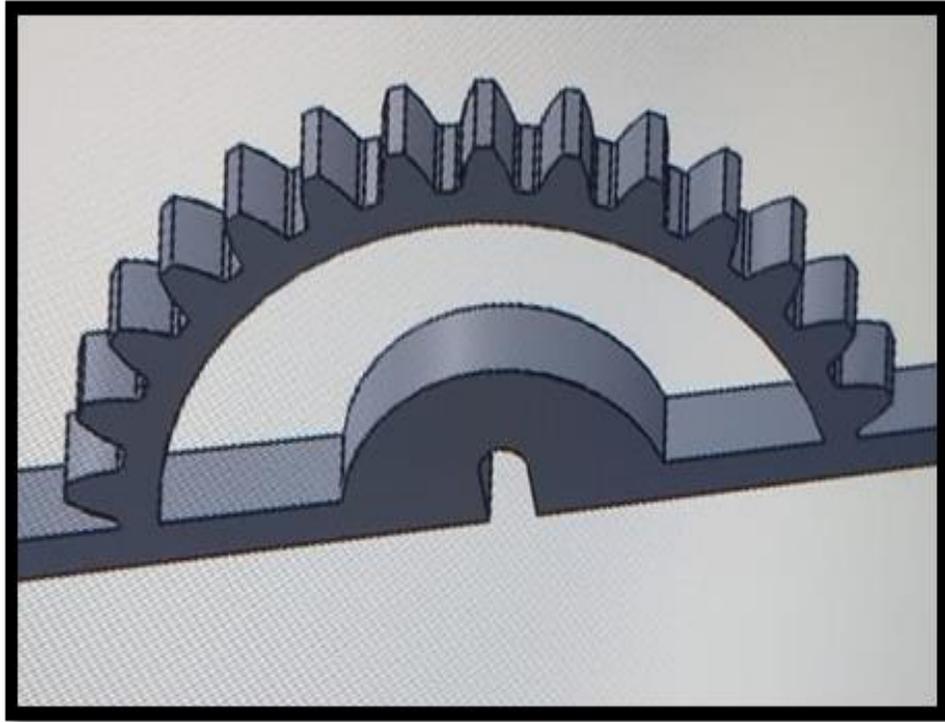


Figura 28 Diseño engrane vista lateral "d"

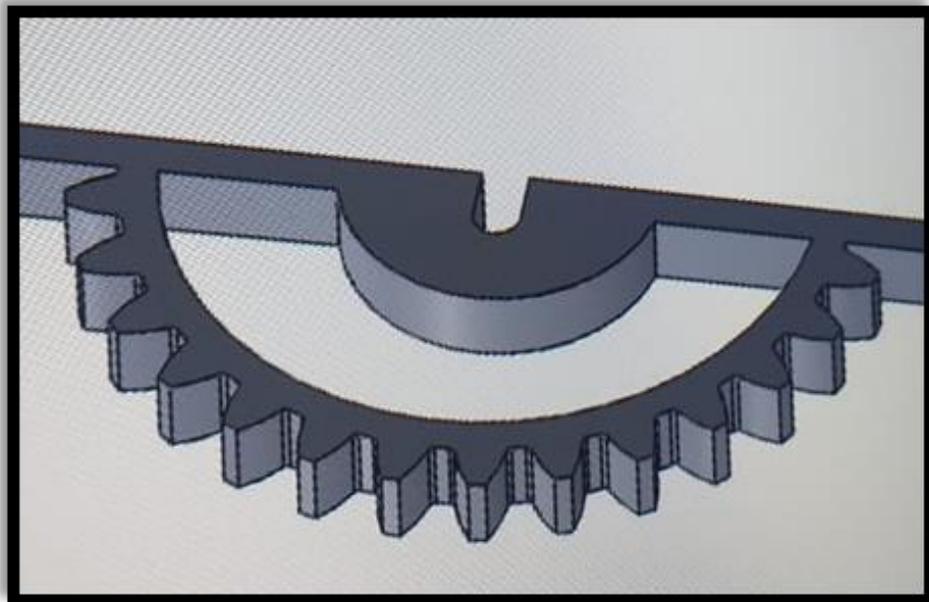


Figura 29 Diseño engrane vista lateral "e"



Figura 30 Prueba engrane

En la Figura 30 Prueba engrane, se muestra cómo se probó un diseño de engrane junto con un piñón, este arreglo se descartó dada la forma interior del engrane obstruía el giro con el panel y la varilla.

En la Figura 28 Diseño engrane vista lateral “d”, se muestra el diseño final del engrane a imprimir en 3d, este diseño fue el más adecuado para la estructura que se tiene.

Para el piñón o engrande pequeño fue necesario reforzar su estructura interior por medio de resina epoxi, con el fin de darle rigidez al piñón. En la Figura 31 Arreglo de trasmisión (final), se muestra la estructura final en relación al arreglo de trasmisión.



Figura 31 Arreglo de trasmisión (final)

Para la colocación del motor fue necesario cortar nylamid en forma de rectángulos de 4cm ancho por 10 cm largo, se cortaron en fresadora, se ocuparon 3 piezas, se pintaron y perforaron como se muestra en la Figura 32 Prueba base nylamid con guarda(se está haciendo la prueba con una sola pieza), también se diseñó e imprimió una guarda para el motor Figura 33 Diseño final de guarda de motor , a la flecha del motor se le coloco un coplee con el diámetro del piñón Figura 35 Diseño final cople para flecha, se hicieron varios diseños como se ve en la Figura 34 Diseño de coples

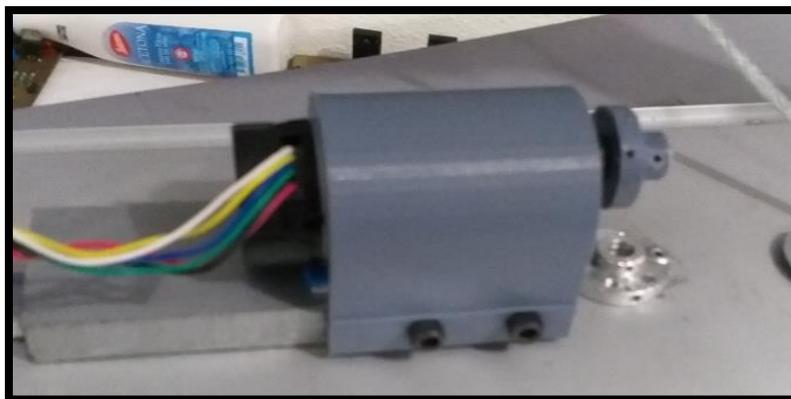


Figura 32 Prueba base nylamid con guarda

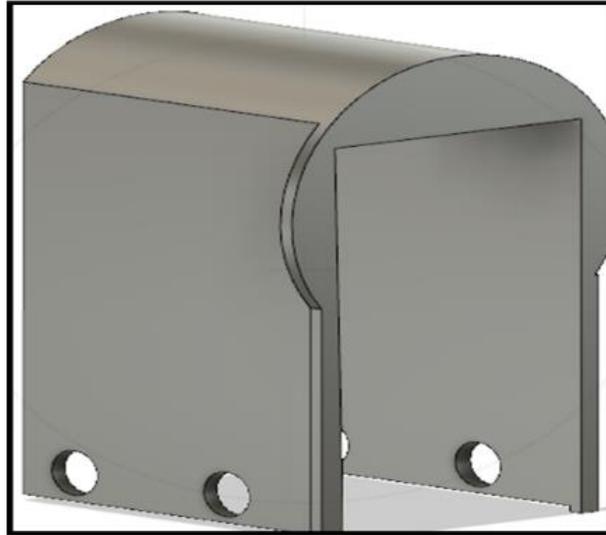


Figura 33 Diseño final de guarda de motor

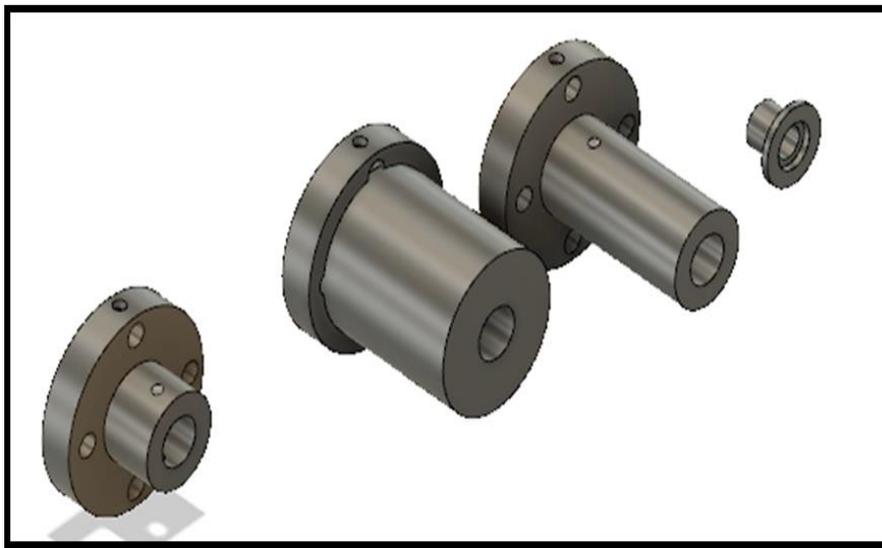


Figura 34 Diseño de coples

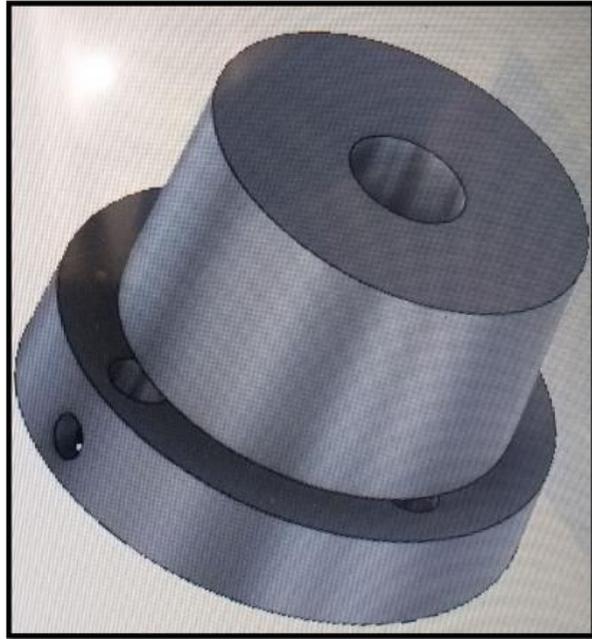


Figura 35 Diseño final cople para flecha

Este motor es el que se encarga de dar movimiento al piñón que a su vez da movimiento al engrane que mueve el panel.

Para la parte giratoria se colocó un motor en la parte baja de la base, también se le diseñó un cople que sirvió como extensión de la flecha del motor como se ve en la Figura 35 Diseño final cople para flecha, fue necesario diseñar e imprimir una figura para poder colocar el motor y fijarlo a la base de aluminio como se aprecia en la Figura 37 Base final de motor inferior, la Figura 36 Base de motor inferior, es un ejemplo de los varios diseños que se hicieron para colocar el motor.



Figura 36 Base de motor inferior

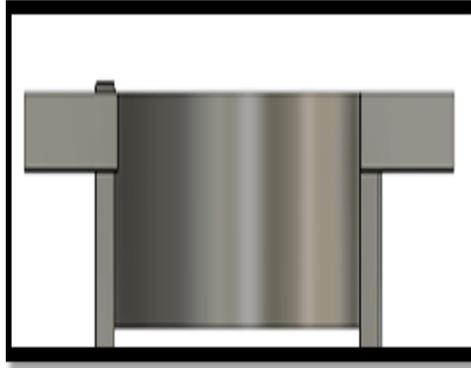


Figura 37 Base final de motor inferior

En la Figura 38 Soporte motor inferior, se puede apreciar el diseño impreso y colocado en la estructura. Este arreglo permite asegurar que el motor este colocado de forma fija, y que solo la flecha sea la que se mueve y trasmite el movimiento a la base giratoria.

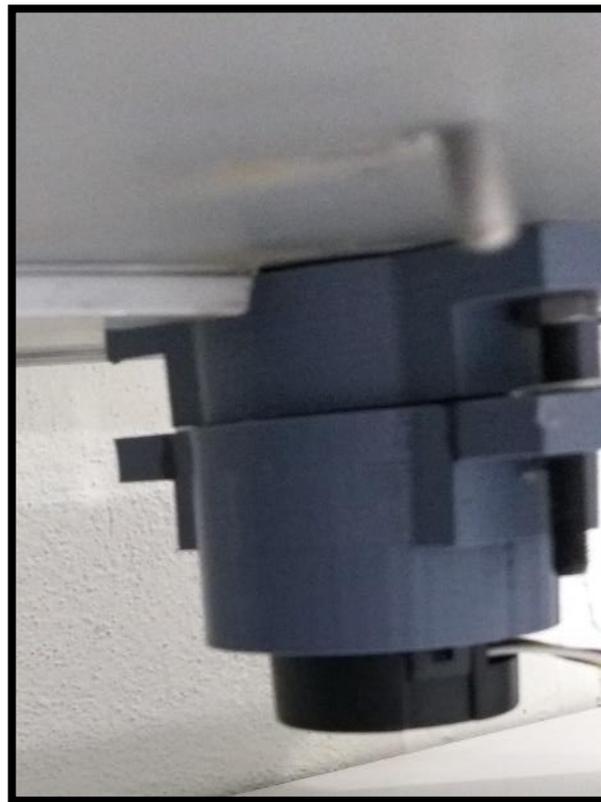


Figura 38 Soporte motor inferior

Se colocó una varilla de $\frac{1}{4}$ " de grosor para dar rigidez a los laterales de aluminio que sostienen el panel, ver ilustración 34.

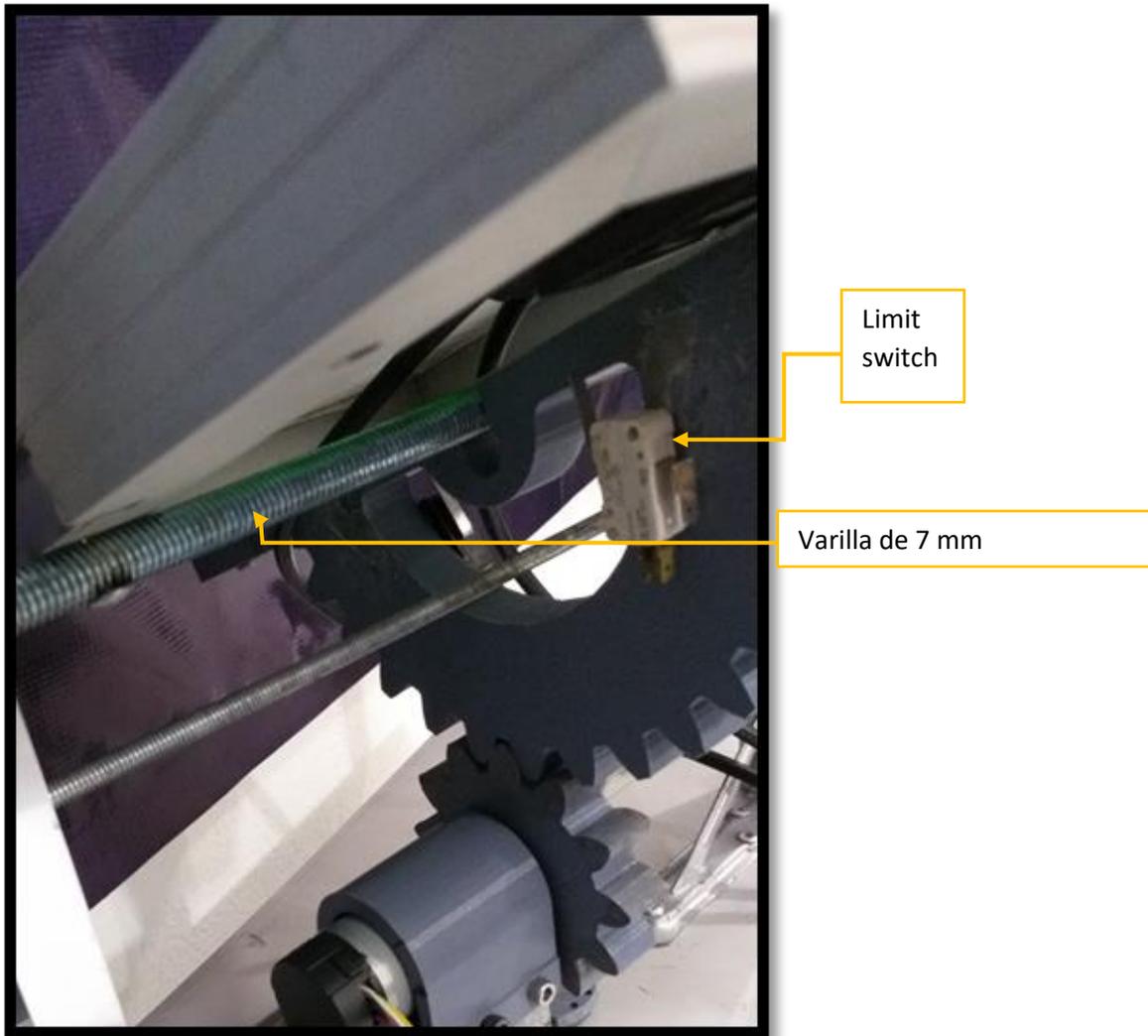


Figura 39 Estructura varilla y limit switch

Por último, se colocaron dos limit switch en el engrane superior, de tal forma que se pueda programar un tope o un límite para cuando este girando el panel, ver Figura 39 Estructura varilla y limit switch. Cabe mencionar que la varilla más gruesa de $\frac{1}{2}$ ", se atornillo al panel. A continuación, en las figuras 40 y 41 (Figura 40 Estructura final del prototipo y Figura 41 Estructura final del prototipo panel elevado), se muestra el resultado final del prototipo.



Figura 40 Estructura final del prototipo



Figura 41 Estructura final del prototipo panel elevado

Se han realizado pruebas de funcionamiento referente a estructura, para verificar que gire correctamente y el panel también se mueva como corresponde.

3.3 CONTROL DE POSICIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

Para poder realizar las conexiones fue necesario elaborar la unión de cables mediante soldadura, cada cable mide 95cm. Los colores ocupados son los colores que tiene la salida de cables del motor, salvo que se sustituyó el color verde y azul por morado y gris.

Se etiquetaron todos los cables con el fin de realizar rápidamente su identificación, los cables se agruparon utilizando termofit.

A continuación, se muestran las tablas que describen la relación de los colores de cables en motor, así como la letra que los identifica.

Color cable en motor	Color de cable elaborado	Letra de identificación en cableado		Conexión Arduino	Conexión Puente H
		Motor 1	Motor 2		
Rojo	Rojo	A	G	n/a	Out 1 y 3
Negro	Negro	B	H	n/a	Out 2 y 4
Verde	Morado	C	I	GND	
Azul	Gris	D	J	3.3 volts.	
Amarillo	Amarillo	E	K	Pwm4	
Blanco	Blanco	F	L	Pwm5	

Tabla 7 Relación colores para identificación y conexión motor, cableado, arduino y puente H

Puente H	Motor	Arduino Señal digital	Fuente 12V
Out 1 y 3	A y H	n/a	
Out 2 y 4	B y H	n/a	
+5 Volts		5Votls	
+ 12 Volts			12 Volts
Int 1		52	
Int 2		50	
Int 3		48	
Int 4		46	

Tabla 8 relación arduino y puente H

Fue necesario identificar cada sensor de fin de carrera para realizar su conexión en conjunto al microprocesador Arduino.

Nombre digital asignado	Letra para identificar	Pin digital de conexión
S1	OH	32
S2	GK	30
S3	FN	28

Tabla 9 identificación de conexión de sensor fin de carrera

3.4 PROGRAMACION EN MICROCONTROLADOR

3.4.1 Adquisición de datos:

Para poder elaborar el programa fue necesario primero saber cuántos pulsos por revolución tiene el motor y así obtener la relación de la resolución del encoder.

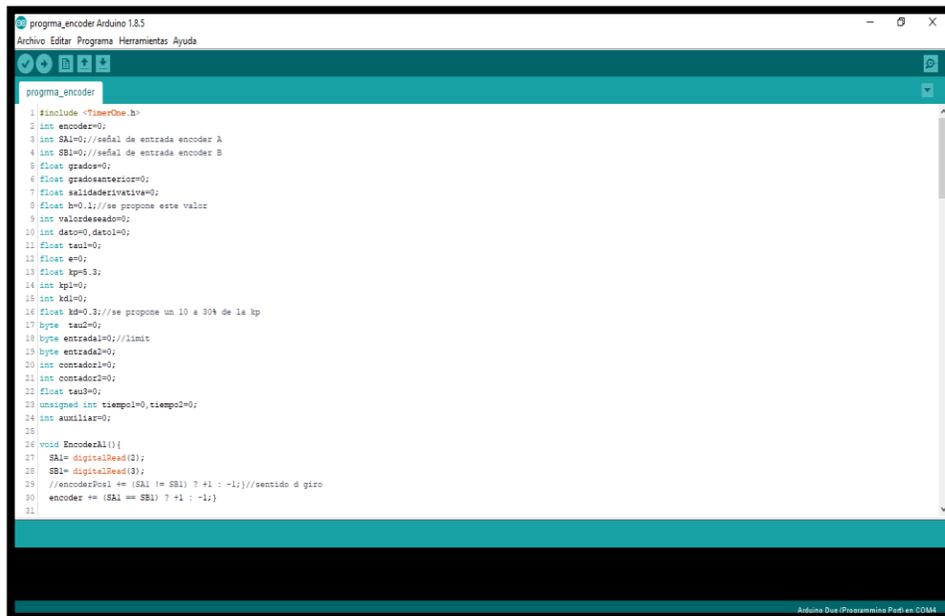
Se hicieron 5 pruebas:

Vuelta	N. de pulsos
1	1514
2	1586
3	1590
4	1589
5	1593

Tabla 10 Resolución de encoder de motor

Se realizó la conexión entre el sistema mecatrónico y Arduino a través del sistema de cableado que se elaborado.

Se hizo un código en el IDE de Arduino, este programa tiene la función de leer las vueltas que da el encoder del motor cuando se mueve la estructura. Ver Figura 48 Código encoder.



```
1 #include <TimerOne.h>
2 int encoder=0;
3 int SA1=0;//señal de entrada encoder A
4 int SB1=0;//señal de entrada encoder B
5 float grados=0;
6 float gradosanterior=0;
7 float salidaDerivativa=0;
8 float b=0.1;//se propone este valor
9 int valordeseado=0;
10 int dato=0,dato1=0;
11 float tau1=0;
12 float e=0;
13 float kp=5.3;
14 int kp1=0;
15 int kd1=0;
16 float kd=0.3;//se propone un 10 a 30% de la kp
17 byte tau2=0;
18 byte entrada1=0;//limit
19 byte entrada2=0;
20 int contador1=0;
21 int contador2=0;
22 float tau3=0;
23 unsigned int tiempo1=0,tiempo2=0;
24 int auxiliar=0;
25
26 void EncodedAll(){
27   SA1= digitalRead(2);
28   SB1= digitalRead(3);
29   //encoderPos1 += (SA1 != SB1) ? +1 : -1;//sentido d giro
30   encoder += (SA1 == SB1) ? +1 : -1;
31 }
```

Figura 42 Código encoder

3.3 EXPERIMENTACIÓN

3.3.2 Experimentación del sistema mecánico

Las pruebas realizadas al sistema mecánico consistieron en conectar directamente los motores a una fuente de alimentación, se probó que ambos motores giraran, se fueron alimentando con diferente voltaje, el máximo voltaje suministrado fue de 12 Volts , para el motor de la base y el voltaje mínimo para empezar a girar de 6 volts.

Mientras tanto para el motor del sistema de transmisión solo fue necesario alimentar 6 volts, dado que no se necesita que el motor este girando a una velocidad muy elevada. Se observó que el engrane y el piñón empatan completamente no importando la posición de la flecha del motor.

3.3.3 Experimentación del sistema electrónico

A continuación, se muestran imágenes de puesta en operación del control programado en Arduino, junto con la estructura mecatrónica previamente elaborada. Figura 43 Conexión arduino, puente H y estructura.

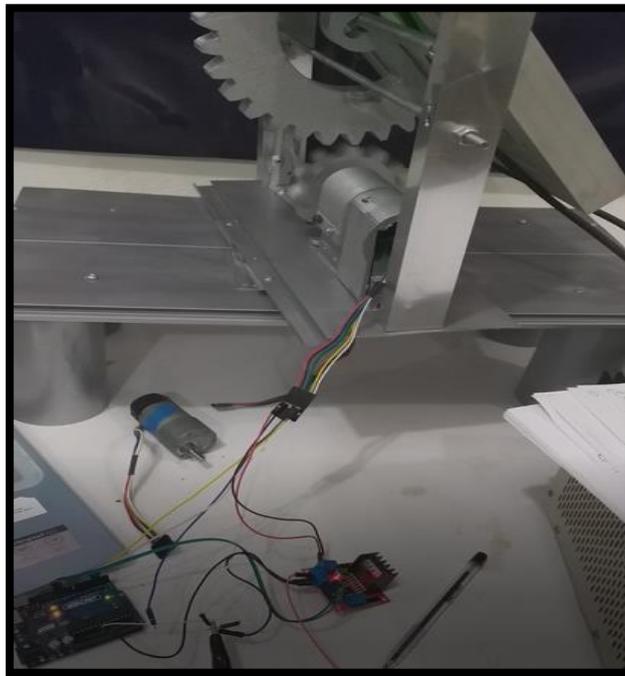


Figura 43 Conexión arduino, puente H y estructura

En la Figura 44 Estructura final, se muestra el sistema con todos sus componentes ya montados. Desde sistema mecatronico, el control electrónico y el módulo de sensores.

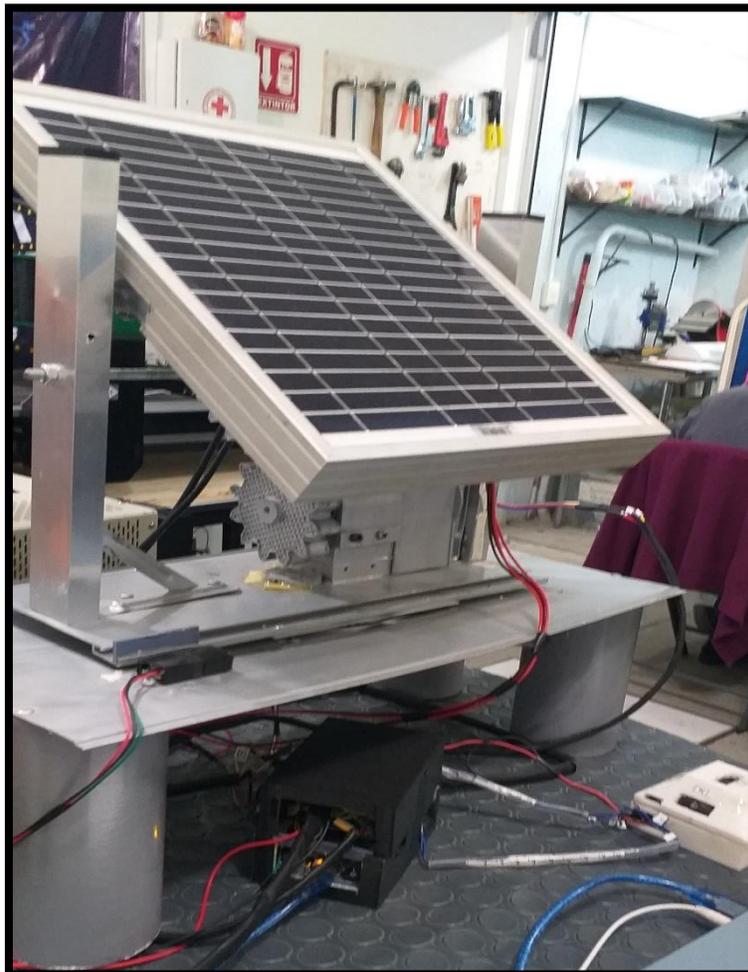


Figura 44 Estructura final

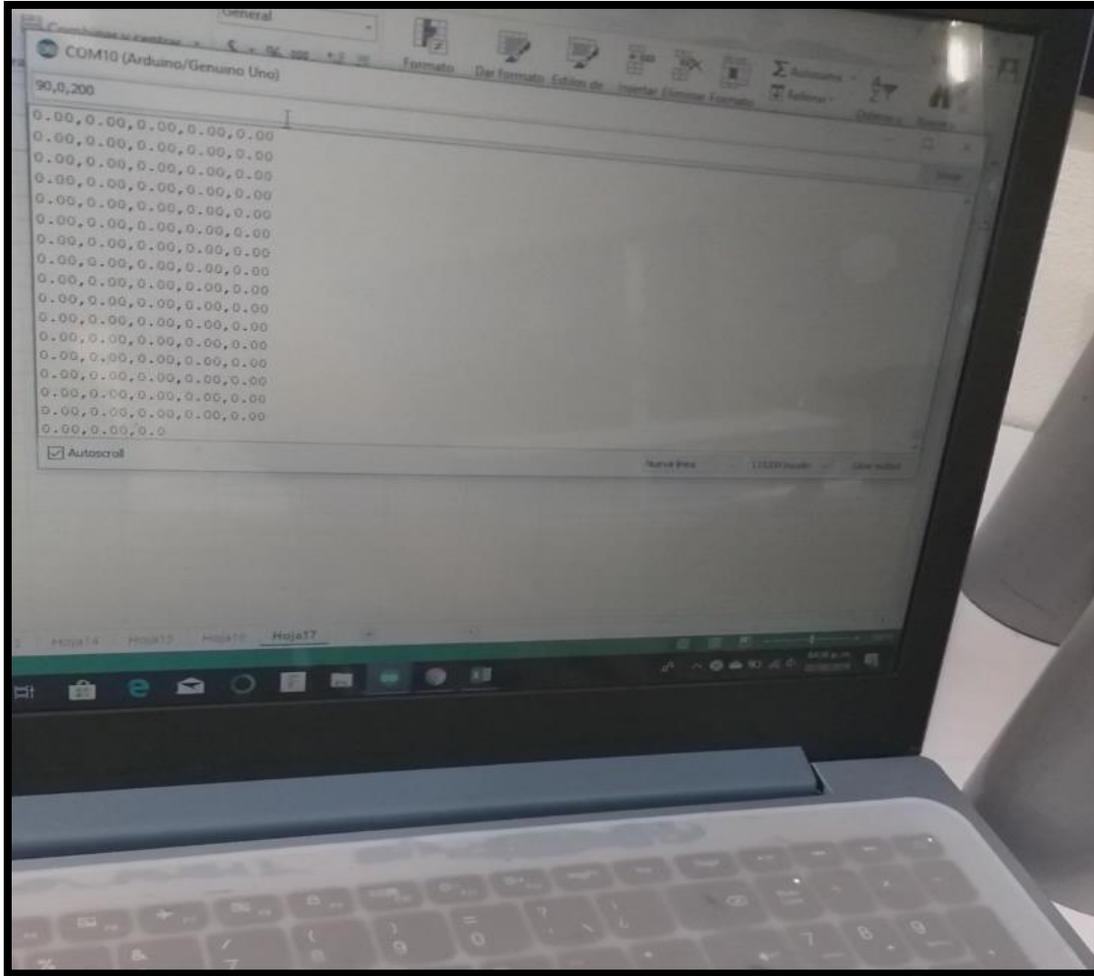


Figura 45 Monitor serial

Como se muestra en la Figura 45 Monitor serial, el monitor serial tiene los tres valores que son colocados por el usuario. A su vez arroja un resultado para usuario y una acción en la estructura

En la Figura 43 Conexión arduino, puente H y estructura, se puede ver la conexión realizada para la prueba del control, es una conexión computadora-Arduino-puente H y finalmente llega a la estructura.

3.3.4 Diseño del módulo de sensores

Para el diseño del módulo de sensores, se buscó la mayor cantidad de luz de acuerdo a la posición del sol durante el transcurso del día, y al mismo tiempo poder determinar el punto cardinal en el cual la cantidad de luz es mayor, para esto se determinó que la geometría piramidal es la mejor opción para esta aplicación, a su vez el módulo consta de cinco fotodiodos.

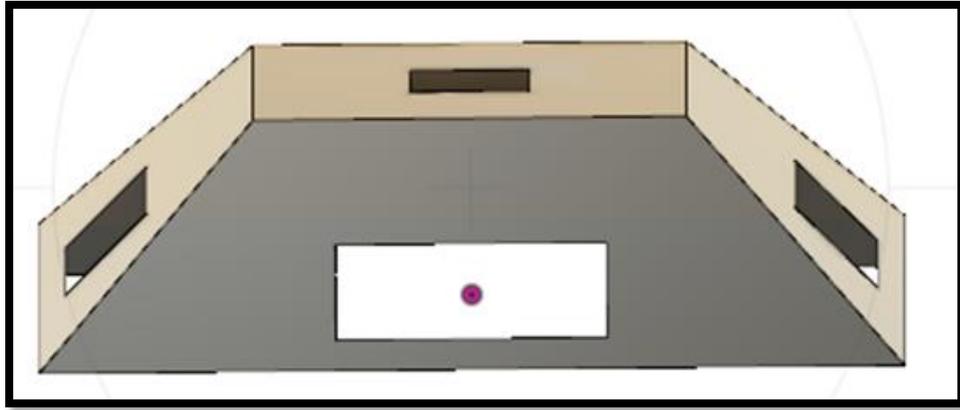


Figura 46 Diseño de estructura modulo sensores

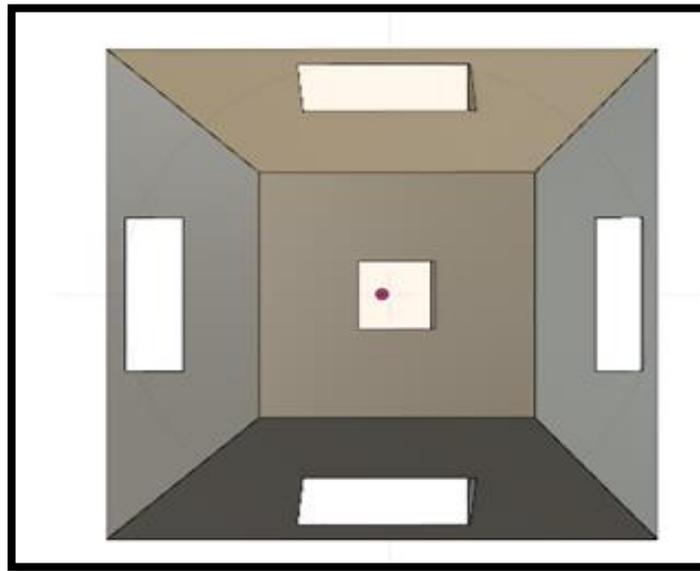


Figura 47 Vista frontal del diseño modulo sensores

El diseño se realizó en Fusión 360. Se imprimió la pieza y el resultado del diseño es mostrado en las Figura 46 Diseño de estructura modulo sensores y Figura 48 Modulo de sensores impreso y conexiones. Cuando se colocaron los sensores se observó que se estaba reflejando luz entre un sensor y otro, por lo tanto, el resultado de la lectura del voltaje se veía afectado, por lo cual se determinó aislar ópticamente los diferentes sensores. En la ilustración 41 se muestra como esta internamente el módulo de sensores. Cabe mencionar que se realizaron tres circuitos (de los cinco utilizados) para el montaje de los sensores, los otros dos sensores al compararlos ya incluían circuito.



Figura 48 Modulo de sensores impreso y conexiones

Se decidió colocar un material opaco que impidiera la reflexión de la luz, para lo cual se utilizó fomi, dejando solo la abertura donde se localiza el sensor. Tal como se muestra en la Figura 49 Aislamiento de sensores en modulo, se recortó el material a la medida requerida, y se fijó a sensor, se realizaron pruebas de voltaje, se observó que ya no se reflejaba la luz solar entre uno y otro sensor.

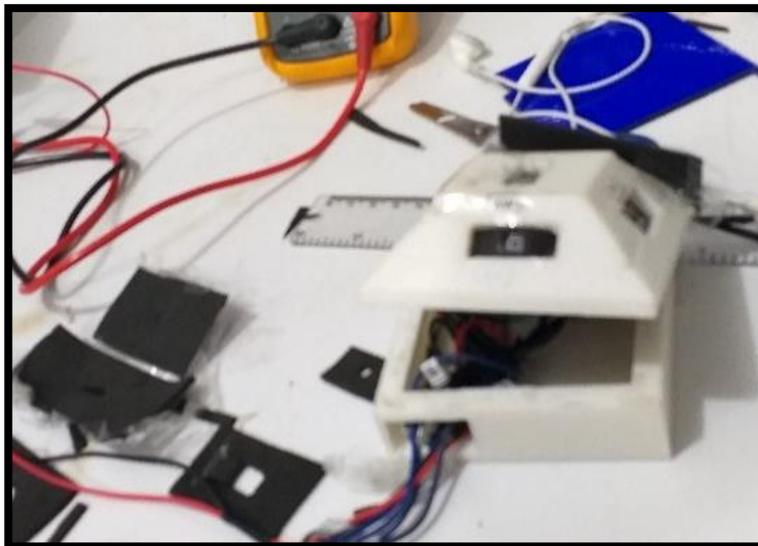


Figura 49 Aislamiento de sensores en modulo

3.3.5 Experimentación módulo de sensores.

Para la caracterización del sistema se tomaron varias lecturas, en diferentes grados, simulando la trayectoria solar, como se señala en la Figura 50 Simulación de trayectoria solar. Con un foco incandescente como se muestra en la Figura 51 Simulación trayectoria solar con foco, se fueron tomando lecturas de voltaje en diferentes grados.

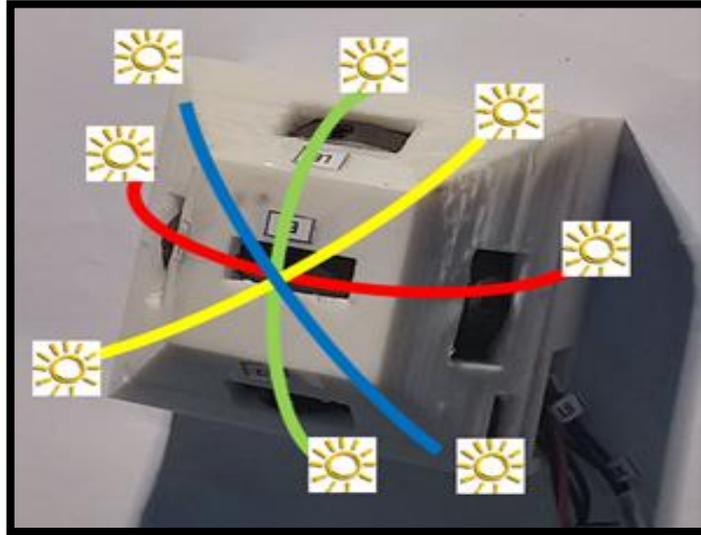


Figura 50 Simulación de trayectoria solar

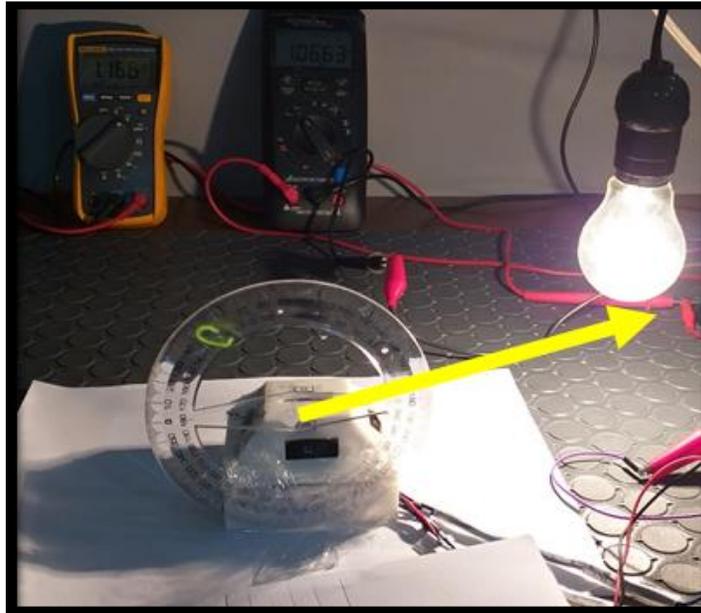


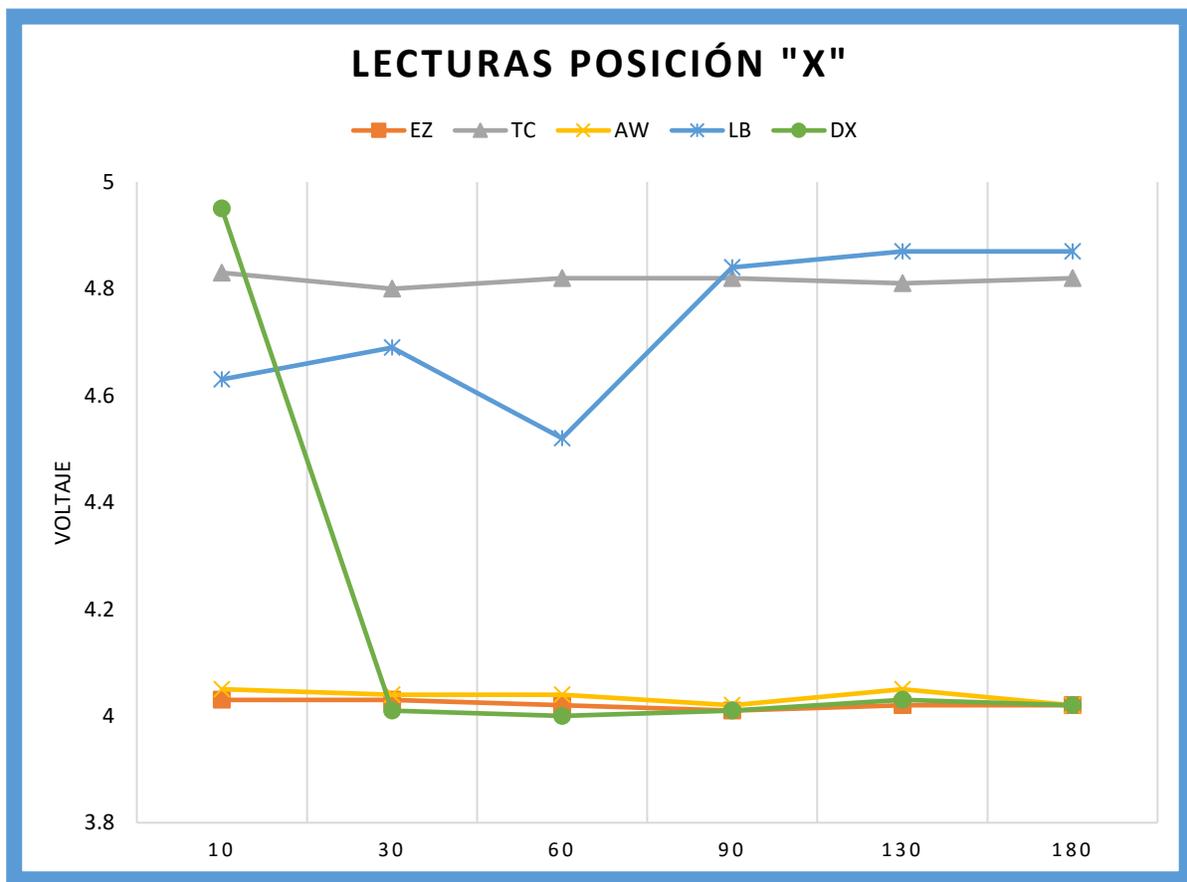
Figura 51 Simulación trayectoria solar con foco

Como resultado se obtuvieron las lecturas mostradas en la *Tabla 11 Lecturas de sensores correspondientes a "X"* . Las cuales para el eje X (línea roja) y eje Y (línea verde) se tomaron posición horizontal y vertical, a su vez las transversales de cada uno. El fenómeno que se aprecia en las lecturas es que el voltaje debe ser mayor de un lado (donde se localice el foco) y del lado contrario donde no está el foco las lecturas son menores.

Las lecturas se agruparon de acuerdo a los grados correspondientes en X,Y,Z. Se muestra en la tabla las lecturas correspondientes a esos grados, en la gráfica 1 se observan los diferentes voltajes obtenidos.

Posición X	TETHA	RADIO	Sensores				
			EZ	TC	AW	LB	DX
0	10	14	4.03	4.83	4.05	4.63	4.95
0	30	14	4.03	4.80	4.04	4.69	4.01
0	60	14	4.02	4.82	4.04	4.52	4.00
0	90	14	4.01	4.82	4.02	4.84	4.01
0	130	14	4.02	4.81	4.05	4.87	4.03
0	180	14	4.02	4.82	4.02	4.87	4.02

Tabla 11 Lecturas de sensores correspondientes a "X"



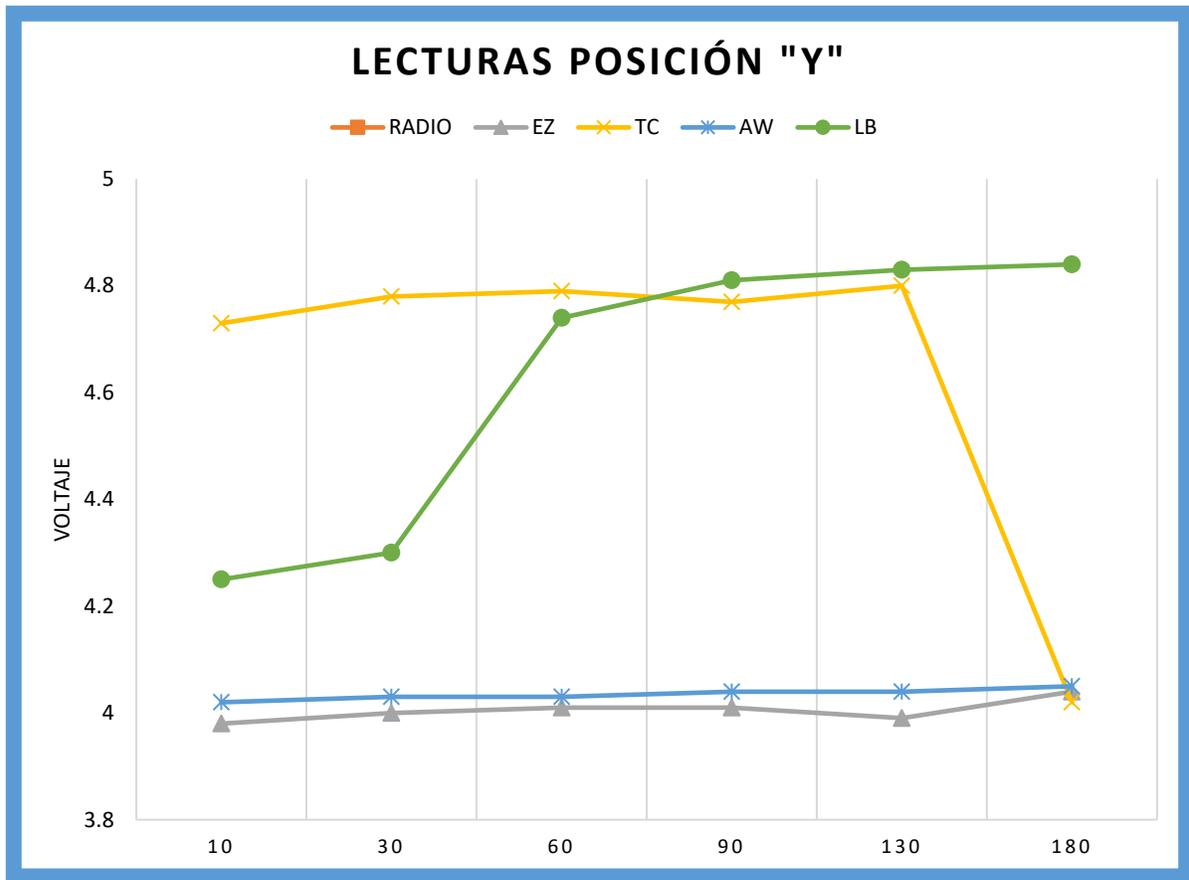
Grafica 1 Comportamiento voltaje de sensores en X

La grafica 1 muestra el comportamiento del voltaje en los distintos sensores, lecturas tomadas en cero grados para eje "X". Se observa que los sensores LB y TC, en la posición cero grados con referencia a eje x, pero considerando los diferentes grados del ángulo Θ , se aprecia que reciben la mayor intensidad de luz.

La Tabla 12 Lecturas de sensores correspondientes a "Y", muestra las lecturas referentes al eje Y, o bien lecturas referentes a la línea verde de Figura 50 Simulación de trayectoria solar.

Posición Y	TETHA	RADIO	Sensores				
			EZ	TC	AW	LB	DX
90	10	14	3.98	4.73	4.02	4.25	3.97
90	30	14	4.00	4.78	4.03	4.30	4.00
90	60	14	4.01	4.79	4.03	4.74	4.01
90	90	14	4.01	4.77	4.04	4.81	4.02
90	130	14	3.99	4.80	4.04	4.83	4.03
90	180	14	4.04	4.02	4.05	4.84	4.03

Tabla 12 Lecturas de sensores correspondientes a "Y"



Grafica 2 Comportamiento voltaje de sensores en Y

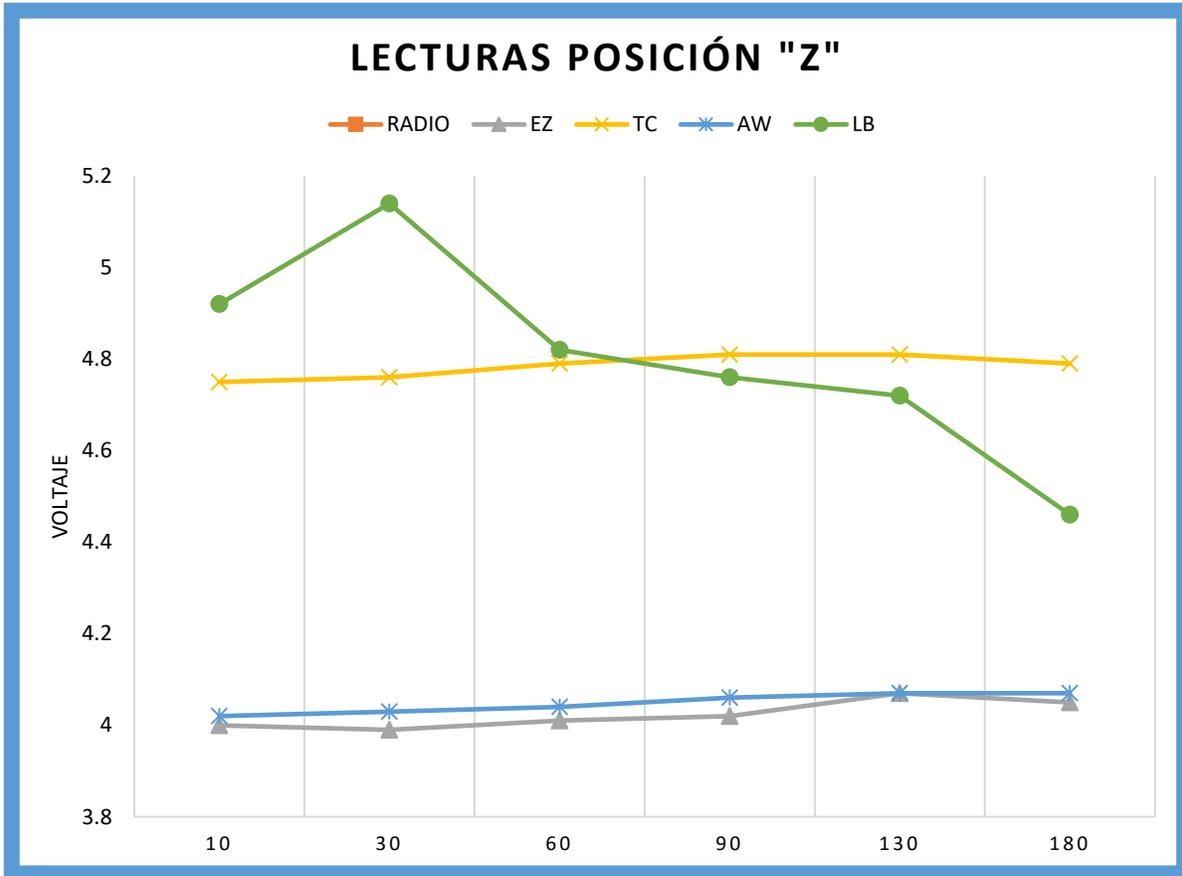
Los sensores que más incidencia solar detectaron fueron TC y LB, a lo largo de las diferentes lecturas tomadas de 10° a 180°.

En la Tabla 13 Lecturas de sensores en Z, se muestran las lecturas en Z, o las correspondientes a la línea azul de la Figura 50 Simulación de trayectoria solar.

Posición Z	TETHA	RADIO	Sensores				
			EZ	TC	AW	LB	DX
45	10	14	4.00	4.75	4.02	4.92	4.02
45	30	14	3.99	4.76	4.03	5.14	4.02
45	60	14	4.01	4.79	4.04	4.82	4.02

45	90	14	4.02	4.81	4.06	4.76	4.01
45	130	14	4.07	4.81	4.07	4.72	4.03
45	180	14	4.05	4.79	4.07	4.46	4.03

Tabla 13 Lecturas de sensores en Z



Grafica 3 Comportamiento voltaje de sensores en Z

Se aprecia en el grafico 3 que los sensores que menos recibieron luz para el ángulo en Z, fueron AW y EZ.

Se determinaron los valores máximos y mínimos de cada renglón al igual que la diferencia entre ellos. Esto se puede observar en la Tabla 14 Máximos y .Una vez obtenido el valor máximo y mínimo, se procede a realizar una resta entre el valor máximo obtenido de un renglón (las cinco lecturas obtenidas), y se va restando valor máximo menos lectura del sensor EZ, valor máximo menos TC, y así sucesivamente en cada uno de los valores obtenidos como se muestra en la Tabla 15 Diferencia de mínimos y máximos

MAXIMO	MINIMO	DIF.O RESTA
4.95	4.03	0.91
4.80	4.01	0.80
4.82	4.00	0.82
4.84	4.01	0.83
4.87	4.02	0.85
4.87	4.02	0.86
4.92	4.00	0.92
5.14	3.99	1.16
4.82	4.01	0.81
4.81	4.01	0.81
4.81	4.03	0.78
4.79	4.03	0.76
4.73	3.97	0.76
4.78	4.00	0.78
4.79	4.01	0.79
4.81	4.01	
4.83	3.99	0.84
4.84	4.02	0.82

Tabla 14 Máximos y mínimos

Max -N				
EZ	TC	AW	LB	DX
0.91	0.12	0.90	0.32	0.00
0.77	0.00	0.76	0.11	0.80
0.80	0.00	0.77	0.30	0.82
0.83	0.02	0.82	0.00	0.83
0.85	0.06	0.83	0.00	0.85
0.86	0.05	0.86	0.00	0.85
0.92	0.17	0.90	0.00	0.91
1.16	0.39	1.12	0.00	1.13
0.81	0.04	0.79	0.00	0.81
0.80	0.00	0.75	0.05	0.81
0.74	0.00	0.74	0.09	0.78
0.74	0.00	0.72	0.32	0.76
0.76	0.00	0.72	0.48	0.76
0.78	0.00	0.76	0.48	0.78
0.78	0.00	0.76	0.05	0.79
0.80	0.04	0.77	0.00	0.79
0.84	0.02	0.79	0.00	0.80
0.81	0.82	0.80	0.00	0.81

Tabla 15 Diferencia de mínimos y máximos

Se tomo el valor de la lectura menos el mínimo sobre el máximo menos el mínimo, así fue como se obtuvieron los valores escalados de "0" a "1".

EZ	TC	AW	LB	DX
0	0.86652079	0.01531729	0.65317287	1
0.02893082	1	0.04779874	0.861635220	0
0.0207824	1	0.05378973	0.638141809	0
0.00480192	0.97959184	0.01680672	1	0
0	0.92714454	0.0293772	1	0.00587544
0.00233372	0.93815636	0	1	0.00583431
0	0.81481481	0.01742919	1	0.014161220
0	0.66695502	0.03546713	1	0.02681661
0	0.95700246	0.03439803	1	0.009828010
0.01485149	1	0.07054455	0.93316832	0
0.05377721	1	0.0524968	0.891165173	0
0.02642008	1	0.04755614	0.571994716	0
0.00263158	1	0.05526316	0.36710526	0
0	1	0.03452685	0.3887468	0.00639386
0.00888325	1	0.03045685	0.93527919	0
0	0.95018680	0.03486924	1	0.017434620
0	0.972455090	0.05389222	1	0.04071856
0.02063107	0	0.03519417	1	0.01213592

Tabla 16 Datos escalados

Estos datos obtenidos, son los parámetros a utilizar para programar la red neuronal en MATLAB. Es por eso que el cálculo debe estar verificado, asegurando que sea el correcto para evitar fallos o mal procesamiento de la red.

3.3.6 Experimentación del sistema del algoritmo de inteligencia artificial. en matlab.

La red que se está haciendo está formada por tres capas: entrada, ocultas y de salida. Por lo tanto, todas las neuronas de una capa están conectadas a todas las neuronas en la siguiente capa, por ejemplo, las neuronas de la entrada estas conectadas con las de la capa oculta y las de salida de la capa oculta están conectadas a la salida general. Para poder realizar esta experimentación se hizo uso del software MATLAB, se inició colocando en su editor las diferentes lecturas que se obtuvieron, lecturas ya normalizadas, Figura 52 Datos normalizados.

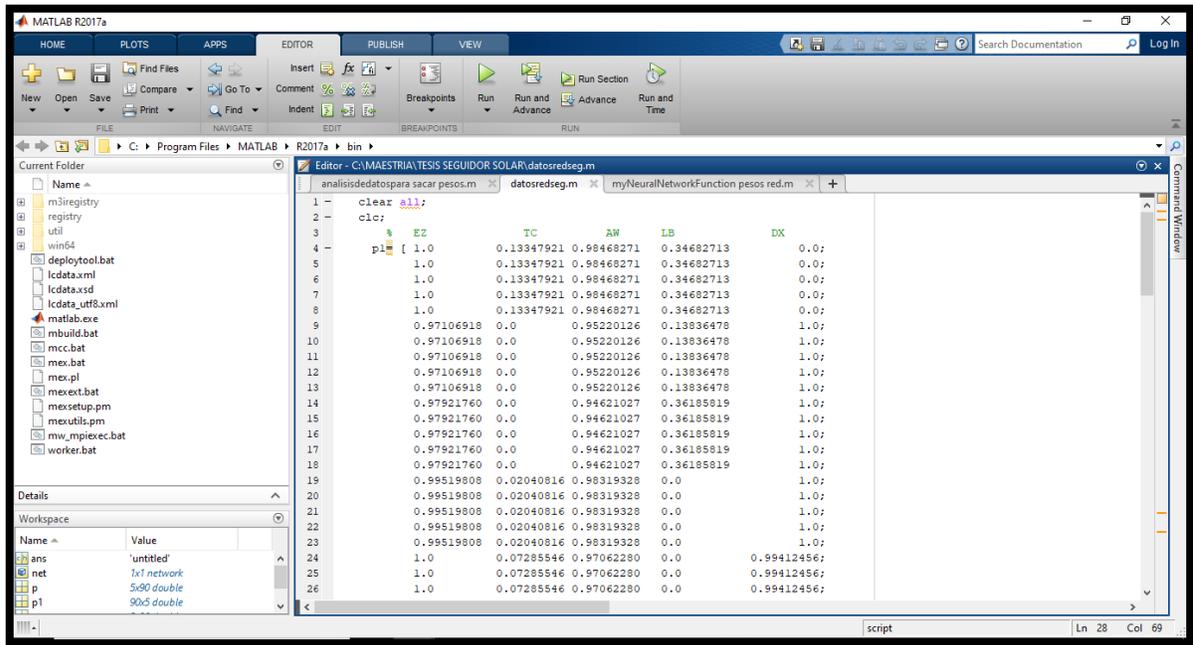


Figura 52 Datos normalizados

Cada dato se repitió cinco veces, para tener una mayor precisión a la hora de ejecutar la red neuronal y los resultados que se obtengan.

También se colocó la matriz de los grados en relación con X,Y,Z, ver Figura 53 Matriz de relación X, Y, Z.

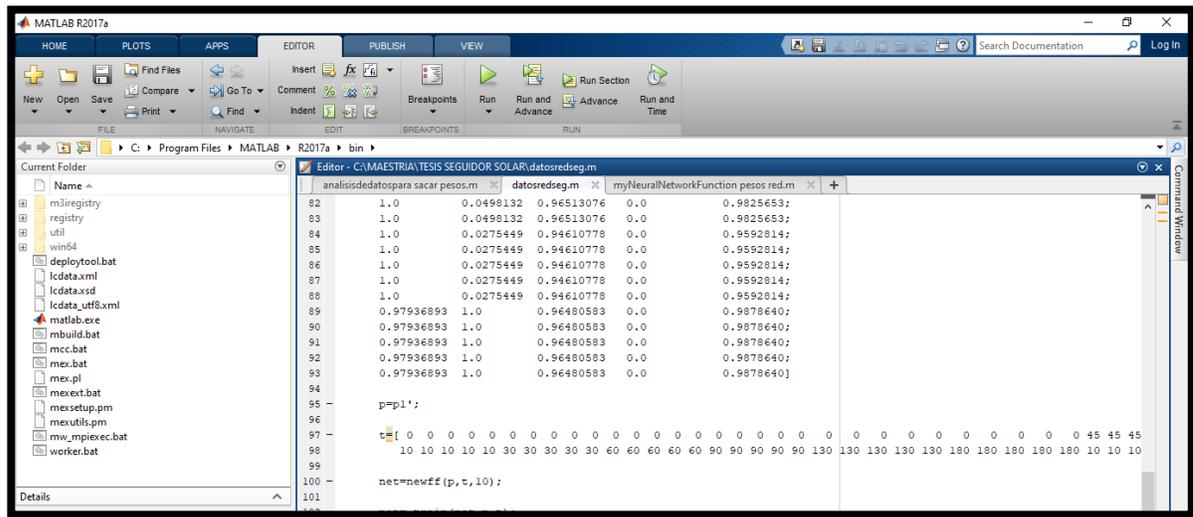


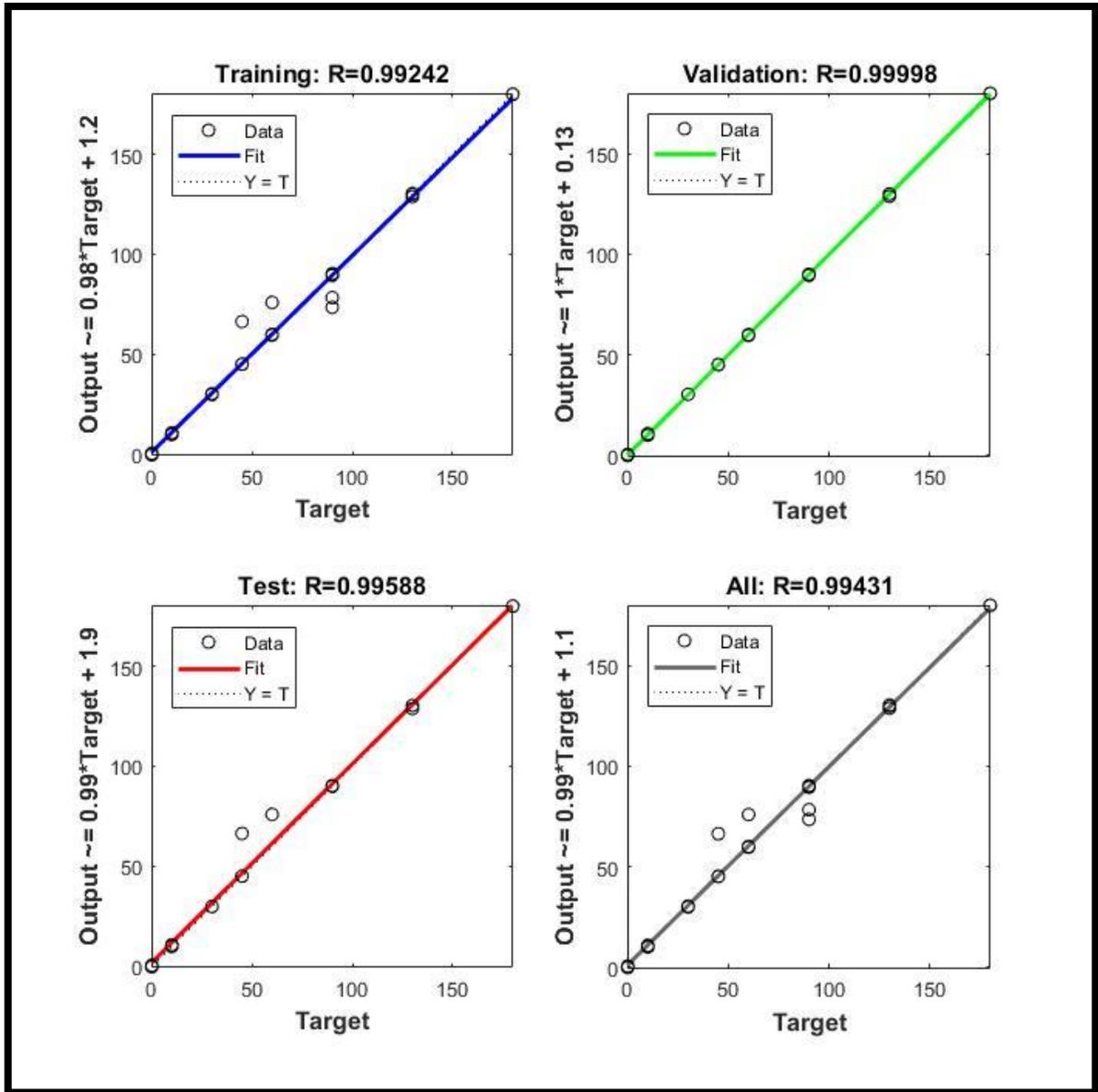
Figura 53 Matriz de relación X, Y, Z.

Para la ejecución del programa se ingresó la instrucción “net=newff (p,t,10)”(ver Figura 53 Matriz de relación X, Y, Z.), la cual indica crear la red con los datos en “p” que corresponde a los valores normalizados, tomando los valores en “t” que es la matriz de relación en grados, por último el numero 10 indica el número de neuronas a necesitar.

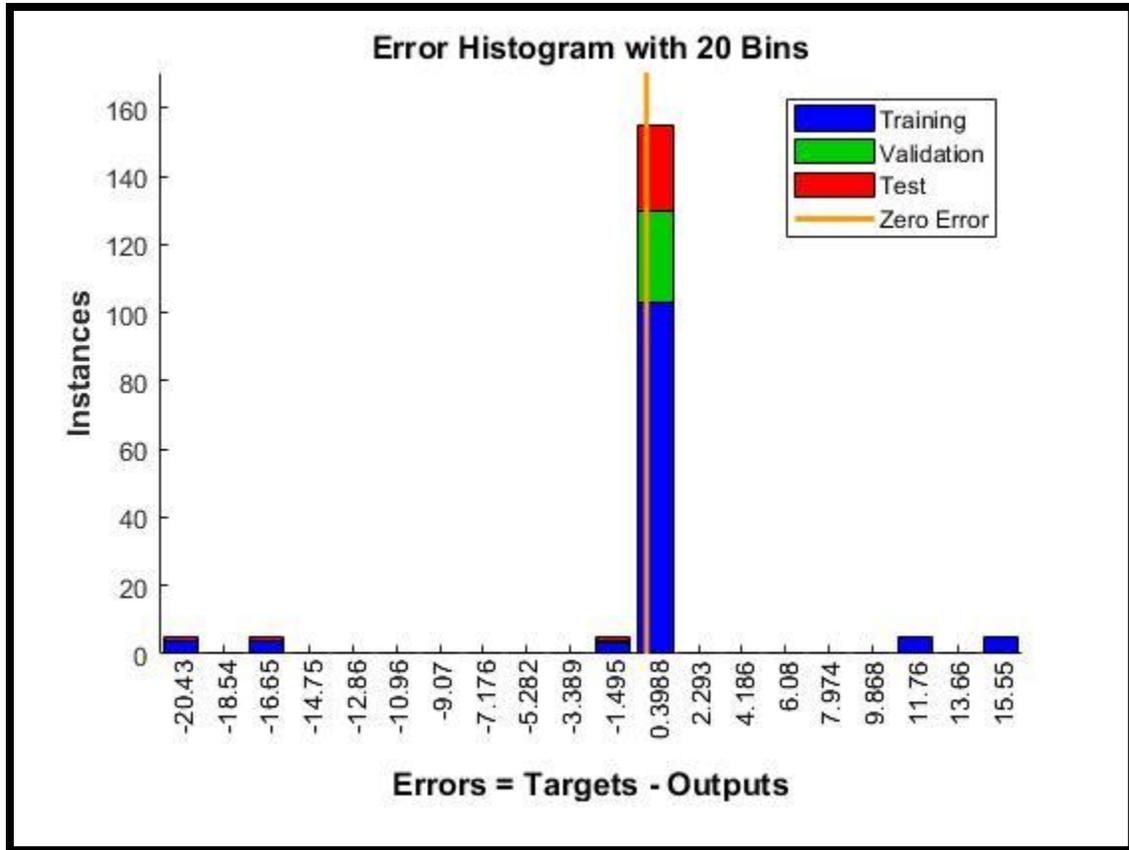
Cabe mencionar que para poder obtener el resultado de las diez neuronas fue necesario entrenar la red con diferentes neuronas.

Se entrenó con 40, 30, 20, 15, 10,9 neuronas. Los resultados se muestran en las siguiente graficas que corresponden a la regresión lineal de cada interacción aleatoria en cuanto al número de neuronas a interactuar.

En la Grafica 4 De regresión lineal para 40 neuronas, se muestra las gráficas correspondientes a la regresión lineal utilizando 40 neuronas. Se observa que solo en una “etiqueta”, existe correlación en las demás, existe dispersión en las gráficas correspondientes al entrenamiento y al de los datos de prueba.

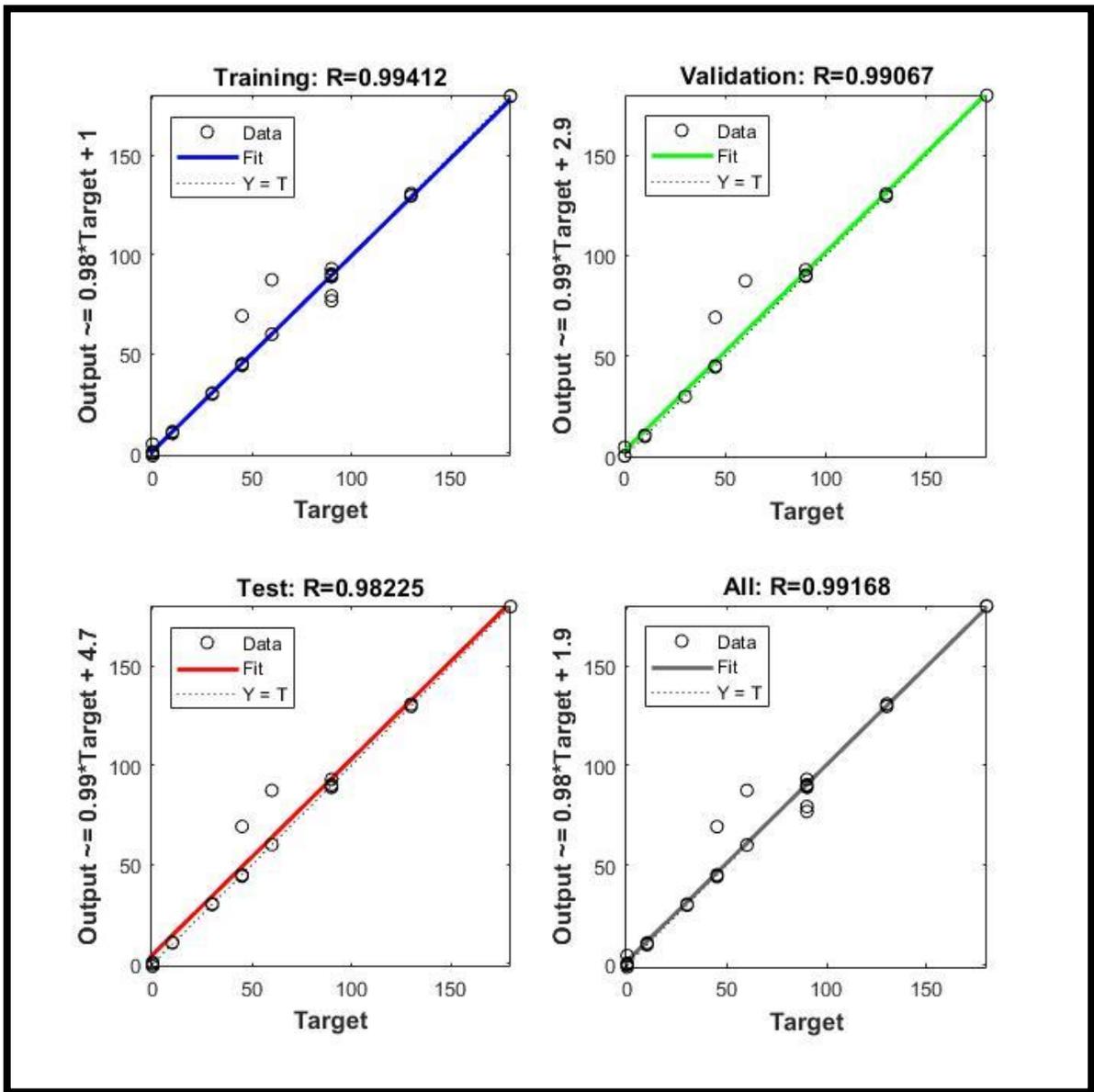


Grafica 4 De regresión lineal para 40 neuronas



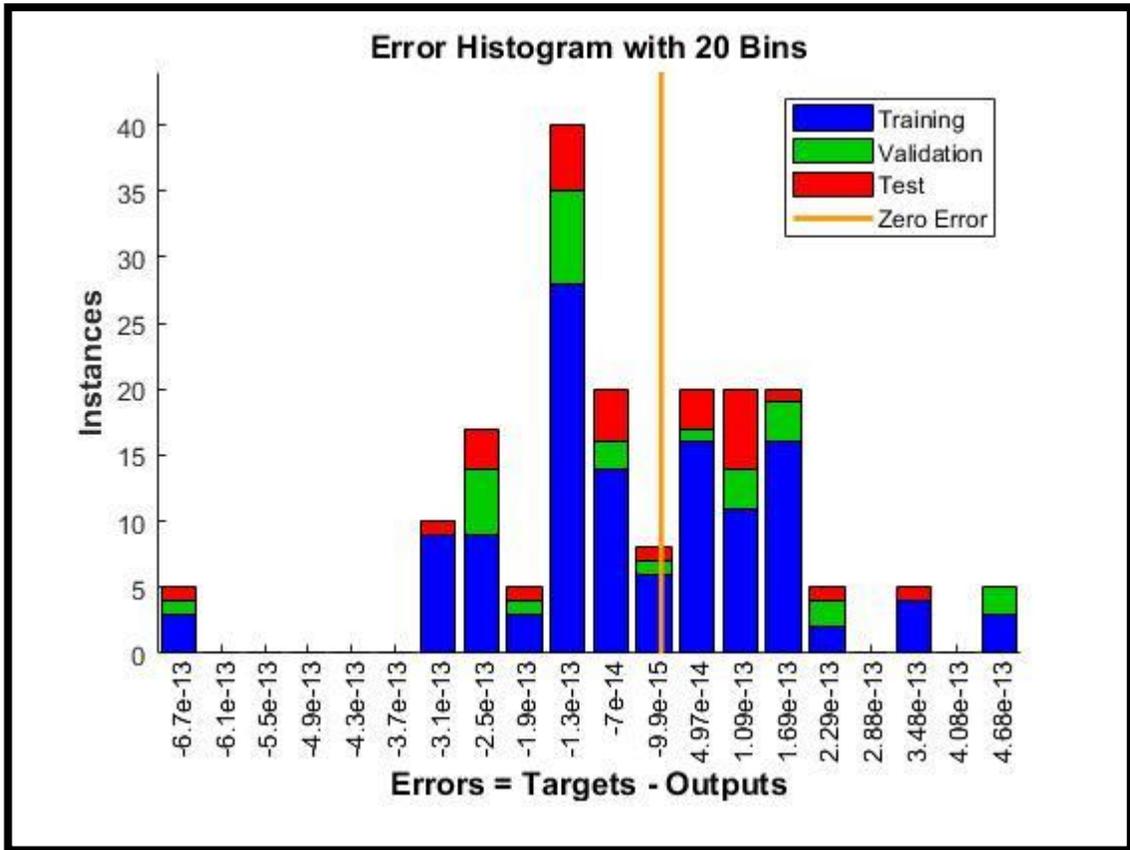
Grafica 5 Error para 40 neuronas

En el Grafica 6 De regresión lineal para 30 neuronas, se muestran las diferentes regresiones lineales correspondientes a los datos de entrenamiento y datos de validación. Se observa que no existe una correlación uniforme.



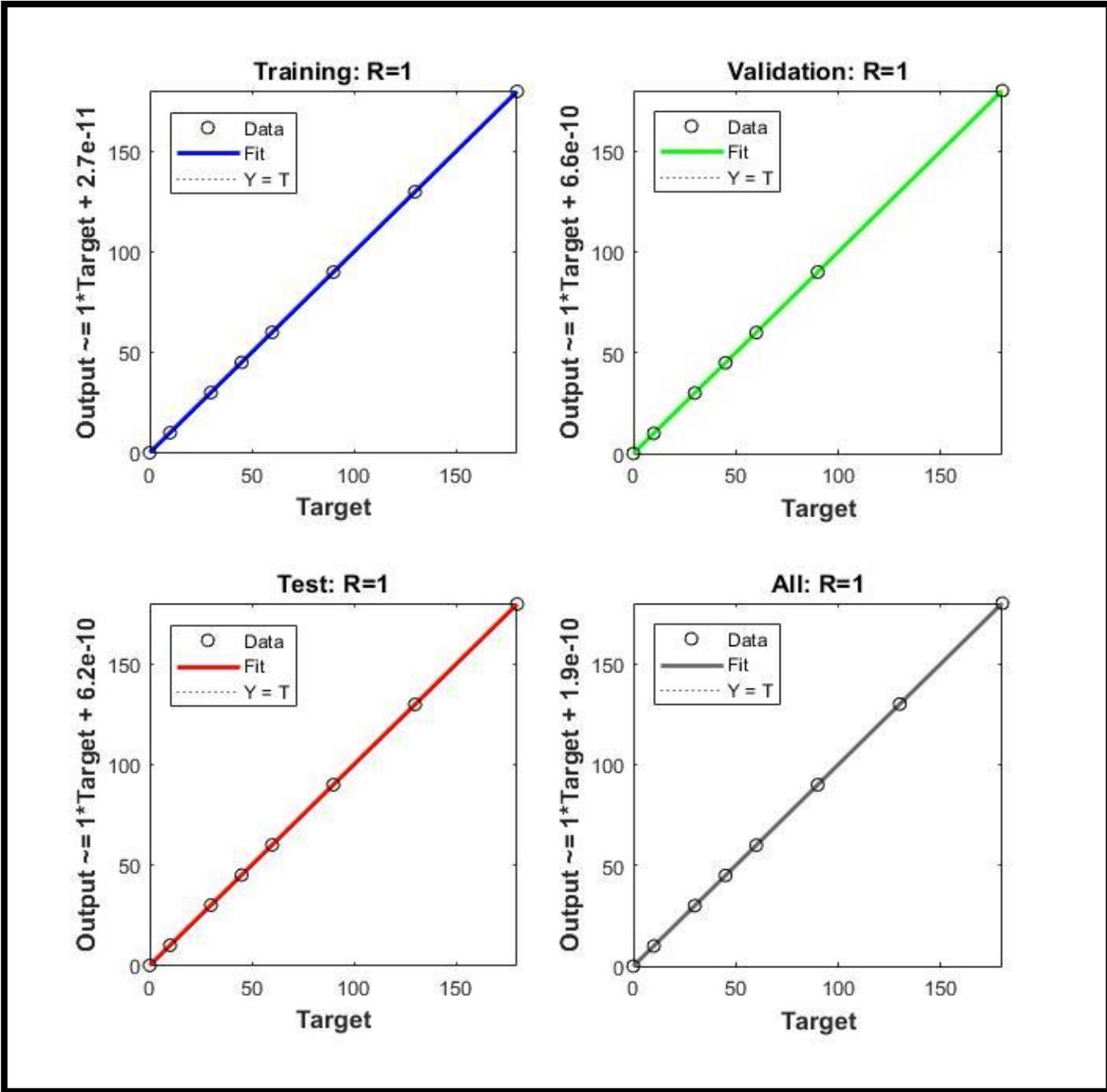
Grafica 6 De regresión lineal para 30 neuronas

En la Grafica 7 Error para 30 neuronas, se muestra el error existente de los datos analizados correspondiente a 30 neuronas.

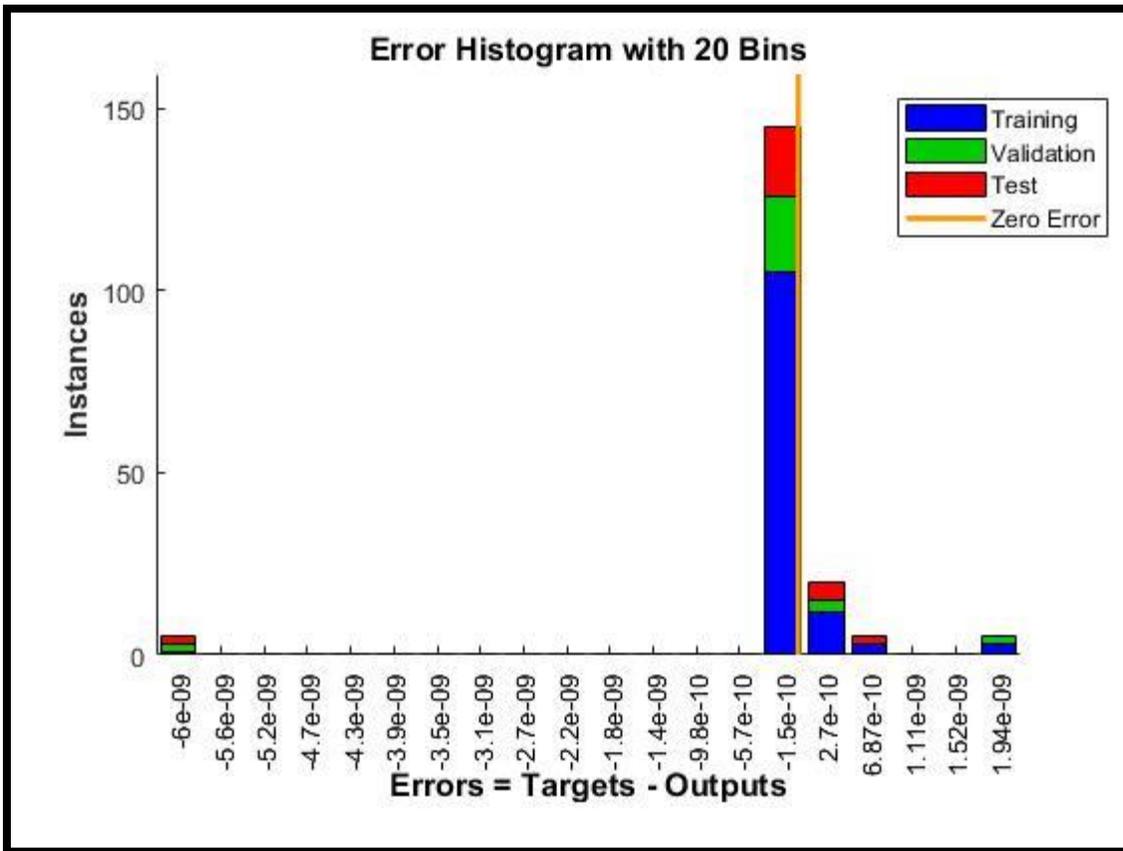


Grafica 7 Error para 30 neuronas

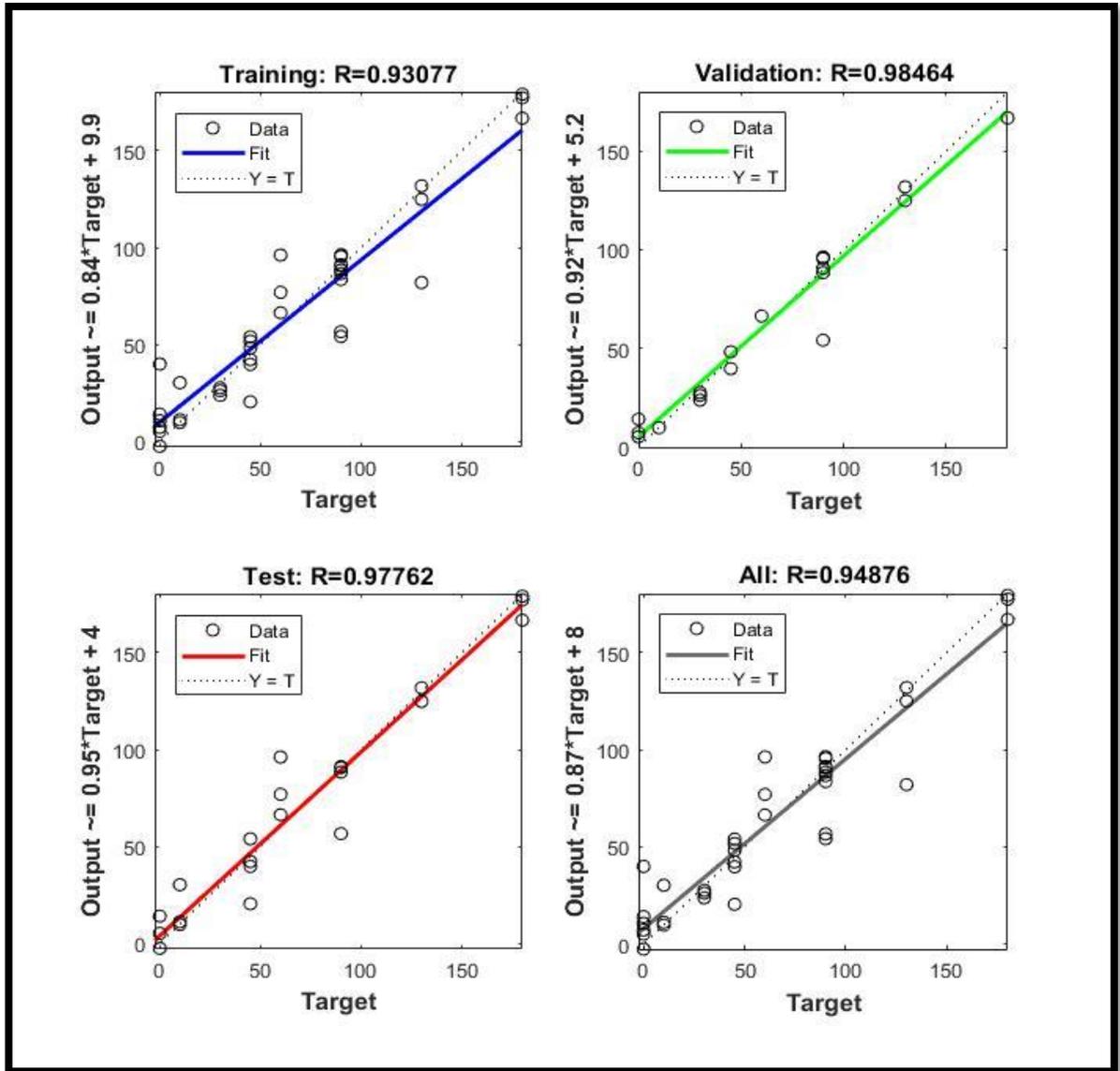
En el Grafica 8 Regresión lineal correspondiente a 20 neuronas, se puede observar el resultado del entrenamiento realizado correspondiente a 20 neuronas. Se observa que ya existe una correlación entre los datos entrenados, por lo tanto, se podría tomar el entrenamiento con 20 neuronas.



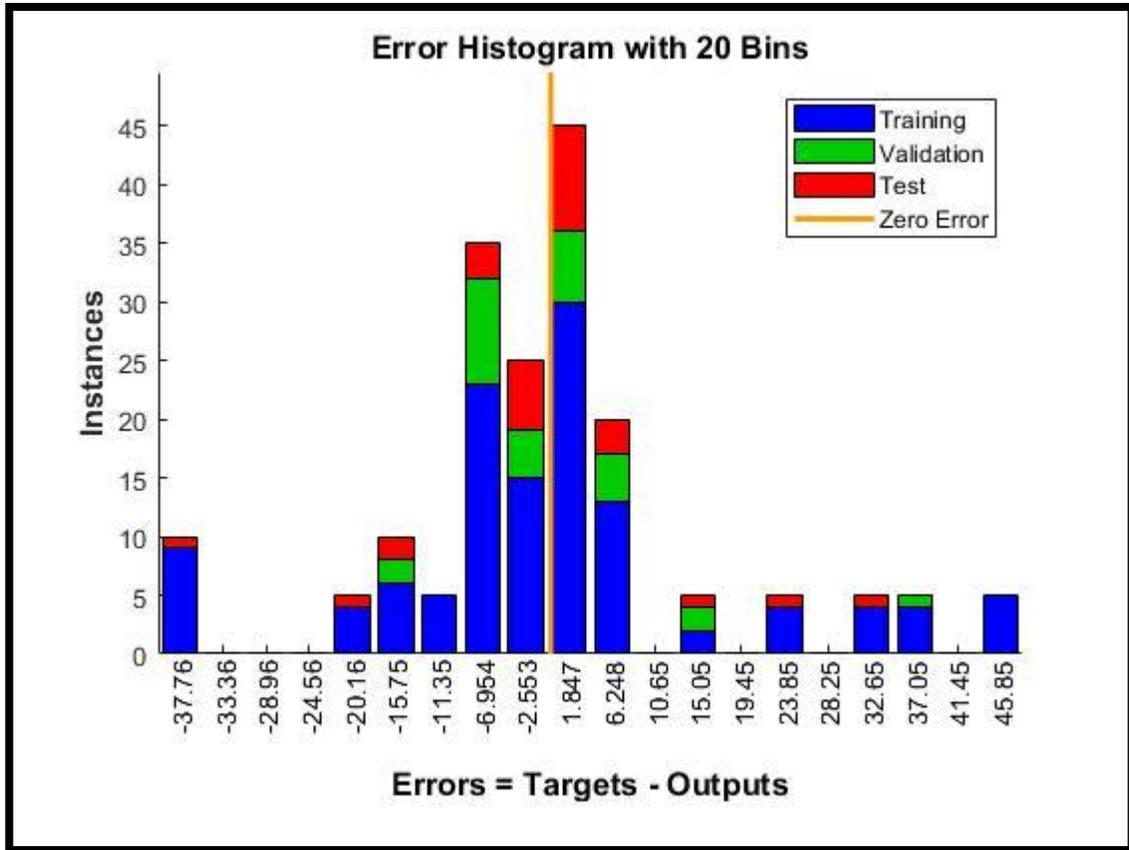
Grafica 8 Regresión lineal correspondiente a 20 neuronas



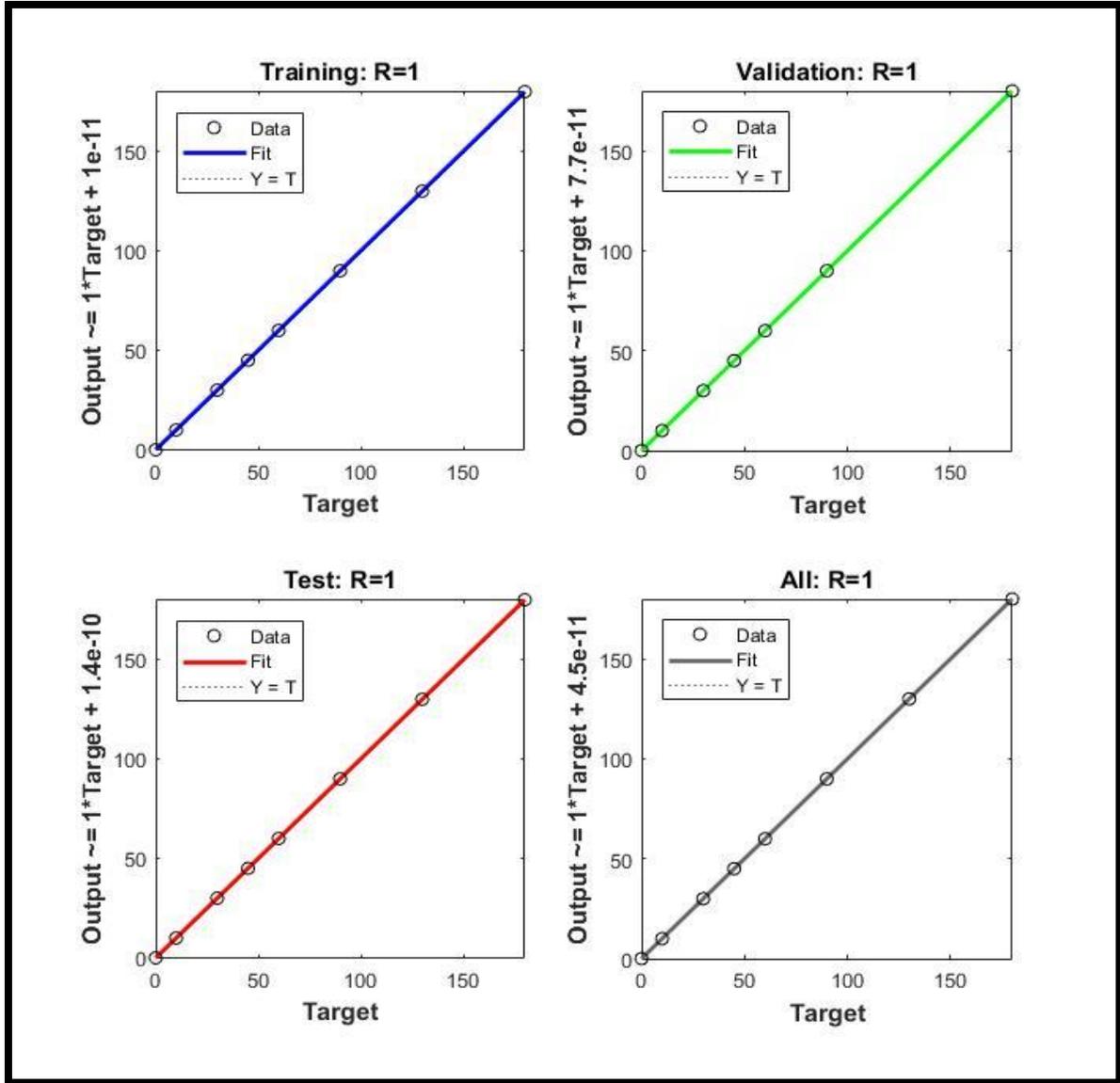
Grafica 9 Error con 20 neuronas.



Grafica 10 Regresión lineal para 15 neuronas



Grafica 11 error para 15 neuronas



Grafica 12 Regresión lineal para 10 neuronas

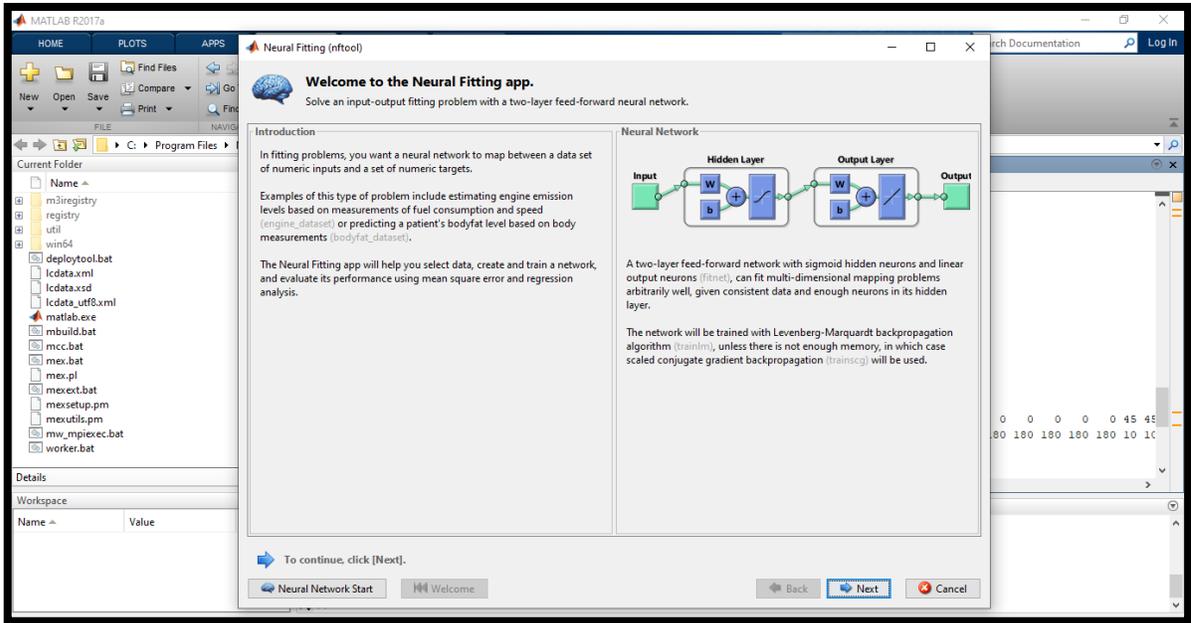


Figura 56 interfaz de introducción a la red neuronal

En la Figura 56 interfaz de introducción a la red neuronal, se muestra la interfaz para tener acceso a lo que es la red neuronal, en este menú obtendremos los pesos, el esquemático a través de SIMULINK. En las figuras 63 a la 65 se muestra el esquemático de la red neuronal en Simulink.

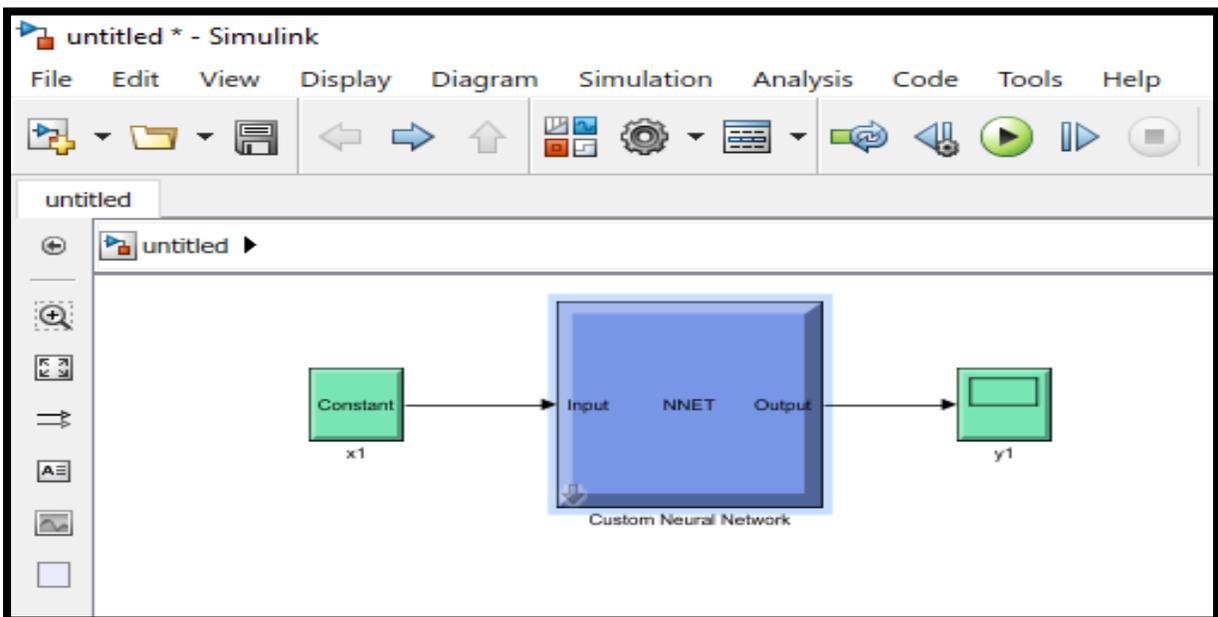


Figura 57 Vista general de Red Neuronal en Simulink

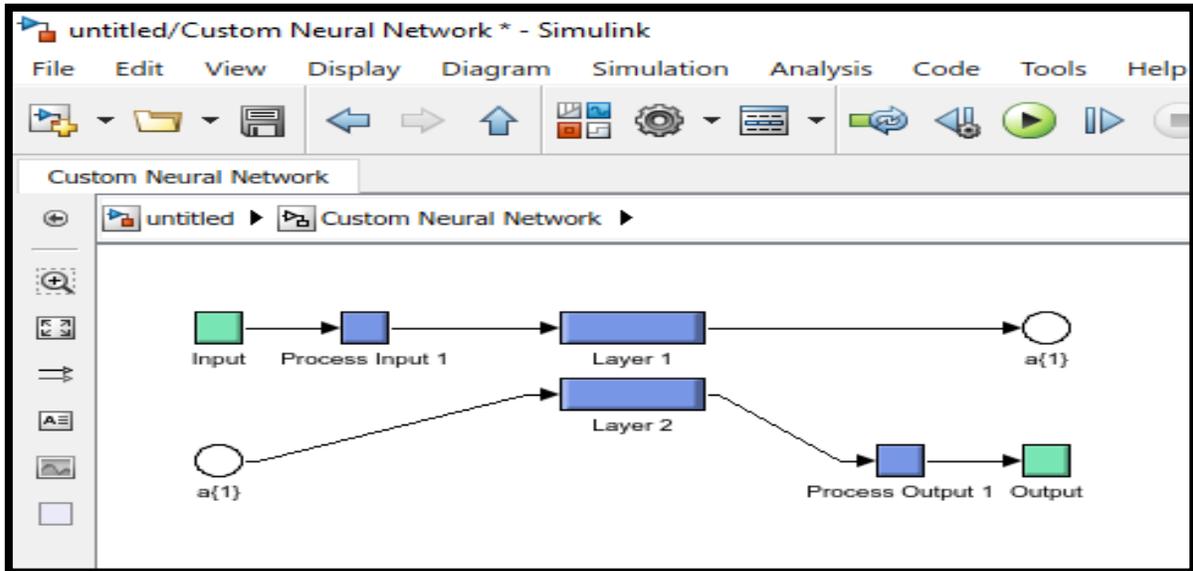


Figura 58 Vista sub-interior de red neuronal

En la Figura 58 Vista sub-interior de red neuronal, se puede observar el sub-interior de la red programada en matlab, utilizando simulink

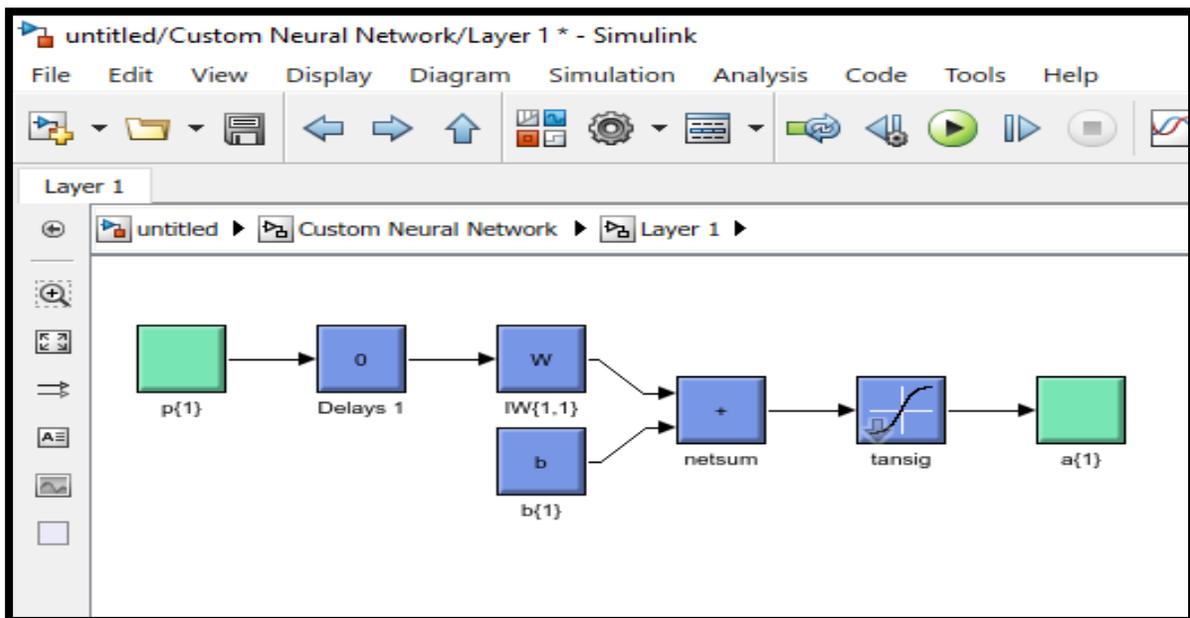


Figura 59 Vista interior de la red neuronal

En la Figura 59 Vista interior de la red neuronal, se puede observar el interior de la red, cabe mencionar que se aprecia perfectamente cómo se cumple el comportamiento de la red neuronal teórico establecido en el capítulo dos. Como manera general para asegurar una mayor precisión, adicional a las pruebas anteriores, se elaboraron diferentes ensayos, con diferentes pesos a introducirse en Arduino.

3.3.7 Experimentación del sistema del algoritmo de inteligencia artificial. en Arduino.

Para el proceso de desarrollo del código en la placa de Arduino, fue necesario establecer parámetros, importar librerías.

Al inicio del programa se manda a llamar las librerías, posteriormente se declaran las variables a ocupar, así como de que tipo son, es decir, flotante, entera, constante, etc., ver



```
1 #include <stdio.h>
2 #include <string.h>
3 #include <Array.h>
4 int serial=0;
5 int motor1 = 9;
6 int motor2 = 11;
7 float valmaxarr;//valor máximo
8 float valminarr;//valor mínimo
9 float val_in[5];//{4.03,4.80,4.04,4.69,4.01};//{4.03, 4.83, 4.05, 4.63, 4.95};//val_in[5]={4.03,4.80,4.04,4.69,4.01};
10 float val_in2[5];
11 float Xin[5];
12 int s[2];//arreglo de numeros enteros positivos
13 //Variables Globales utilizadas en Rn
14 int Entradas = 5;
15 int NeuronasHiddenLayer = 10;
16 char inputString[40]; // cadena para contener datos entrantes y los convierte
17 char outputString[40]; //cadena para contener datos salientes y los convierte
18 String valorTotal;//cadenas a partir de diferentes tipos de datos es decir, las formatean como secuencias de caracteres
19 String val[20]; //Configurado para datos de 4Bytes
20 int x[10] = {0,0,0,0,0, 0, 0, 0, 0, 0}; //Configurado para un máximo de 10 entradas
21 int xmemu[10] = {0,0,0,0,0, 0, 0, 0, 0, 0};
22 int i = 0, j = 0;
23 double inputANN[5] = {0, 0, 0, 0, 0};
24
25
26 class ANN
27 {
28     //Atributos
29     public:
30     float pesosA[10][5] = {{-0.7539496168897023,1.900120876964686,0.60172358295204709,-0.53091588847751503,0.89562878646914479},
```

Figura 60 inicio de red neuronal, programación Arduino.

Se establecen matrices en el código, para ser ejecutados, como se ve en Figura 60 inicio de red neuronal, programación Arduino. Continuando con la programación se colocan los pesos obtenidos en la red de Matlab. Como se menciona en el capítulo dos, los pesos en una neurona representan los mecanismos existentes para enviar o transmitir la señal. En la Figura 60 inicio de red neuronal, programación Arduino. Muestran los pesos ocupados particularmente para esta red.

```

programabien_final_febrero11del2020redcomentada Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
programabien_final_febrero11del2020redcomentada $
47 {
48 ////////////////////////////////////////////////////////////////////DECLARACION DE DATOS TOMADOS DE RED EN MATLAB, LOS PESOS REPRESENTAN LOS MECANISMOS DE TRANSMISION DE INFORMACION, SON LOS PARAMETROS
49 public:
50 float pesosA[10][5] = {{-0.7539496168897023,1.900120876964696,0.60172358235204709,-0.530915888947751503,0.89562878646914479},
51 {0.45130067851556738,1.0000250904006217,3.2568396455426845,1.404949012332066,-1.6397059306517517},
52 {2.5128795988193633,0.15220892224737615,0.10756694723031124,0.42497701132093801,0.28707081105283494},
53 {-0.90467444896059945,-0.55437666478470982,0.45411889008213208,1.5054075004421008,-7.2563981752310803},
54 {-2.1214226482696917,0.93663126326068991,1.30934828594353993,1.1463969034829901,-1.0351652766466265},
55 {-4.2263469394038788,1.131946461119919,3.4794399714978856,0.93974949211019421,1.452340869020513},
56 {-0.993810787373786,-2.3677177162540124,-6.324343103908637,0.89046508949193014,1.728490303979399},
57 {1.5608761525707544,2.8733938580109164,-1.0821462782308948,-3.14838602678634,-0.38821820420794042},
58 {-2.1003136972320608,-0.60631454455442424,-4.5146260820055915,0.44475369661439451,-0.42918489110815766},
59 {-0.3906359927226276,-1.5248069162690046,1.0244220653075422,-0.3260656316989792,0.66315653691400366},
60 };
61 //arreglo bidimensional pesosA[10][5] indica 10 renglones por 5 columnas
62 float biasA[10] = {2.3252426293744906,-3.864464023672368,-0.61149970218956451,-8.9903885272210489,1.5962594331941292,-0.56624542996088512,-0.71844453082203785,0.38205070445362838,-2.8:
63
64
65
66 float pesosB[5][10] = {{-1.6932339591652132,-2.1089177260132949,2.7198542637269902,-8.69436161464656,-1.7202968239582406,1.2546964641149701,0.24247646452666985,-5.456363872969674,-2.2:
67 {-1.7010723559047736,0.52565000174712564,-2.8523395241326992,-4.5549073265493627,-0.5955701945216276,-2.7458472106804819,-1.8988800202604328,-1.8470397393293183,:
68 };
69 float biasB[2] = {-0.67855658891096588,-0.20829176236366967};
70
71 double MinI[5] = {0,0,0,0,3.6710630000000002,0};
72 double MaxI[5] = {0,0.6377159999999997,1,0.07054459999999999,1,1};
73 double MinF[2] = {0,10};
74 double MaxF[2] = {90,180};
75 //SALIDA MAXIMA Y SALIDA MINIMA
76 double OutMax = 1;
77
Subido
Done in 7.464 seconds
Set boot flash true
CPU reset.
Arduino Due (Programming Port) en COM4

```

Figura 61 Pesos para red neuronal, ide arduino

Se introducen las condiciones de operación de la red, cabe mencionar que esta red cuenta con dos capas (layer 1, layer 2). Ver Figura 62 Capa 1 y Figura 63 Capa 2.

```

programabien_final_febrero11del2020redcomentada Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
programabien_final_febrero11del2020redcomentada $
..
103
104 void Layer1()
105 {
106     for (int B = 0; B < NeuronasHiddenLayer; B++)
107     {
108         for (int A = 0; A < Entradas; A++)
109         {
110             MWA[B] = XmapI[A] * pesosA[B][A] + MWA[B];
111             //Serial.print("Multiplicacion pesos por entradas");
112             // Serial.print(MWA[B]);
113             // Serial.println(",");
114         }
115     }
116
117     for (int i = 0; i < NeuronasHiddenLayer; i++)
118     {
119         SUMA[i] = MWA[i] + biasA[i];
120         // Serial.print("Multiplicacion pesos por entradas + bias ");
121         // Serial.println(SUMA[i],10);//10 digitos
122     }
123
124     for (int i = 0; i < NeuronasHiddenLayer; i++)
125     {
126         TSA[i] = (2 / (1 + exp(-2 * (SUMA[i])))) - 1;
127         // Serial.print("tansig : ");
128         // Serial.println((float)TSA[i],10); //Arroja datos entre -1.0000 y 1.0000, el numero 10 corresponde al numero de veces que se repite
129     }
130 }
131
Subido
Done in 7.464 seconds
Set boot flash true
CPU reset.
Arduino Due (Programming Port) en COM4

```

Figura 62 Capa 1

```

programabien_final_febrero11del2020redcomentada Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
programabien_final_febrero11del2020redcomentada$
132 void Layer2()
133 {
134 // Serial.println("Layer 2 Ws");
135 for (int B = 0; B < 2; B++) // Neuronas Salidas
136 {
137 for (int A = 0; A <= 10; A++) // Neuronas HiddenLayer //10
138 {
139 MWB[B] = TSA[A] * pesosB[B][A] + MWB[B];
140 //Serial.println(MWB[B]);
141 }
142 // Serial.println(MWB[0]);
143 // Serial.println(MWB[1]);
144 }
145
146 for (int i = 0; i < 2; i++)
147 {
148 SUMB[i] = MWB[i] + biasB[i];
149 // Serial.print("Pesos Layer 2: ");
150 // Serial.println((float)SUMB[i],14);
151 }
152
153 for (int i = 0; i < 2; i++)
154 {
155 salida[i] = ((SUMB[i] - INMin) * (MaxF[i] - MinF[i])) / (INMax - INMin) + MinF[i];
156 // Serial.print("Salida ANN: ");
157 // Serial.println((float)salida[i], 10);
158 // Serial.println((float)SUMB[i]);
159 // Serial.println((double)INMin);

```

Subido
Done in 7.464 seconds
Set boot flash true
CPU reset.

123 Arduino Due (Programming Port) en COM4

Figura 63 Capa 2

3.3.8 Validación de red neuronal en Arduino (comparativo Arduino -Matlab).

El proceso de validación de la red, consiste en introducir los valores previamente tomados (lecturas tomadas), en el monitor serial, los resultados escalados que se visualicen en el monitor serial deben coincidir con los que arroja en Simulink, para poder hacer un comparativo, se deben introducir los mismos datos en Simulink (datos colocados en el monitor serial).

Se ejecutan ambos procesos (Arduino y Simulink).

A continuación, se muestran las pruebas realizadas con diferentes neuronas, cabe mencionar que el dato confirmado es de diez neuronas.

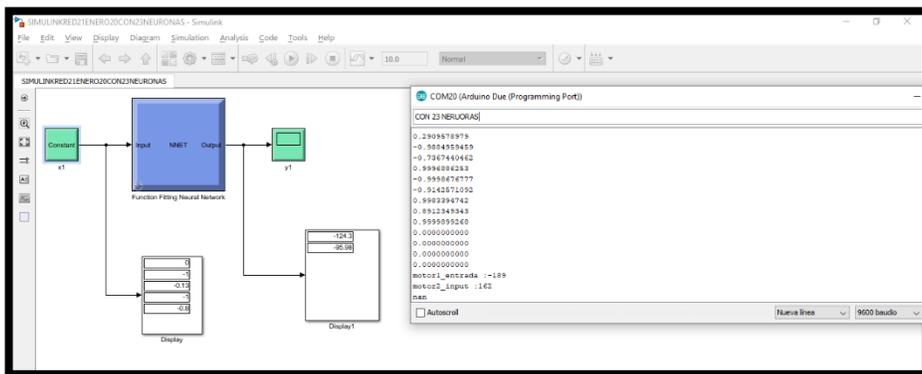


Figura 64 Comparativo resultados 23 neuronas

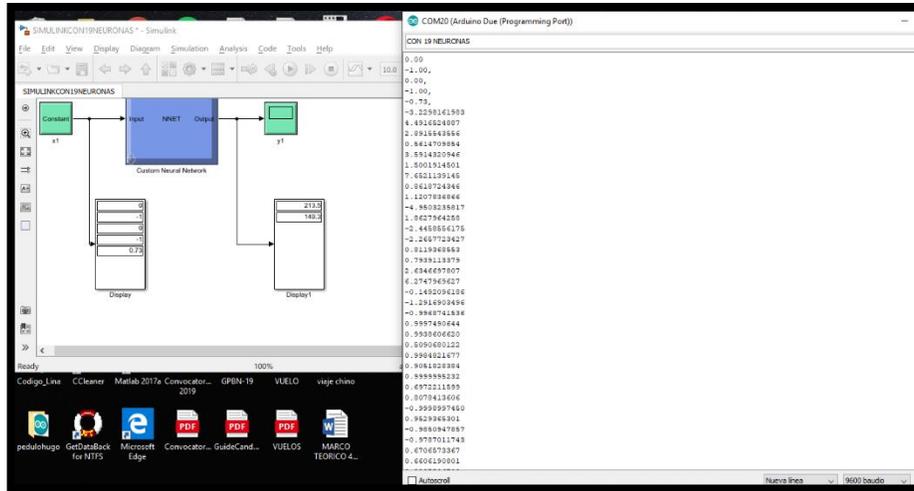


Figura 65 Comparativo con 19 neuronas

Cabe mencionar que con cincuenta neuronas también se tuvo un buen resultado, la precisión fue la misma, por cuestión de procesamiento se elige trabajar con diez neuronas. Ver figura....

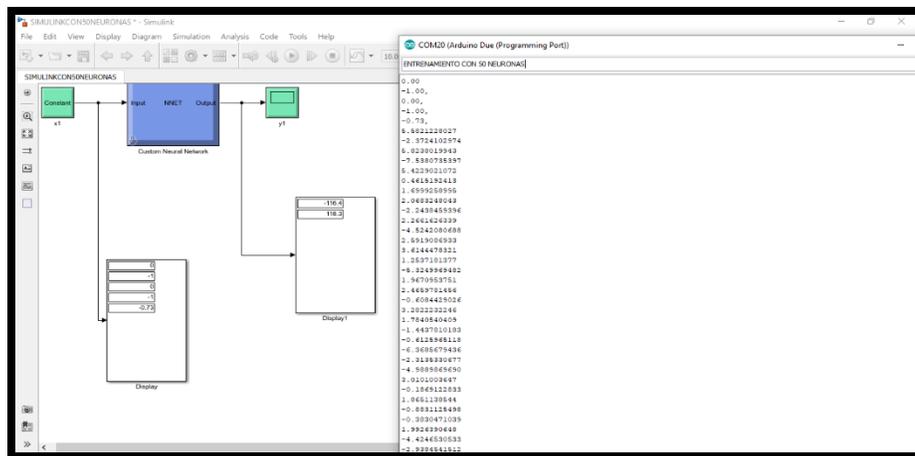


Figura 66 Prueba con 50 neuronas

Después de que se defino que se trabajara con diez neuronas, se continúan con las pruebas de validación, esto es retomar que los valores que entran en ambas redes (Simulink y Arduino). Deben ser iguales, por lo tanto, se esperan resultados iguales. Como se muestran en la figura... en la cual se hace el comparativo de la salida de ambas redes.

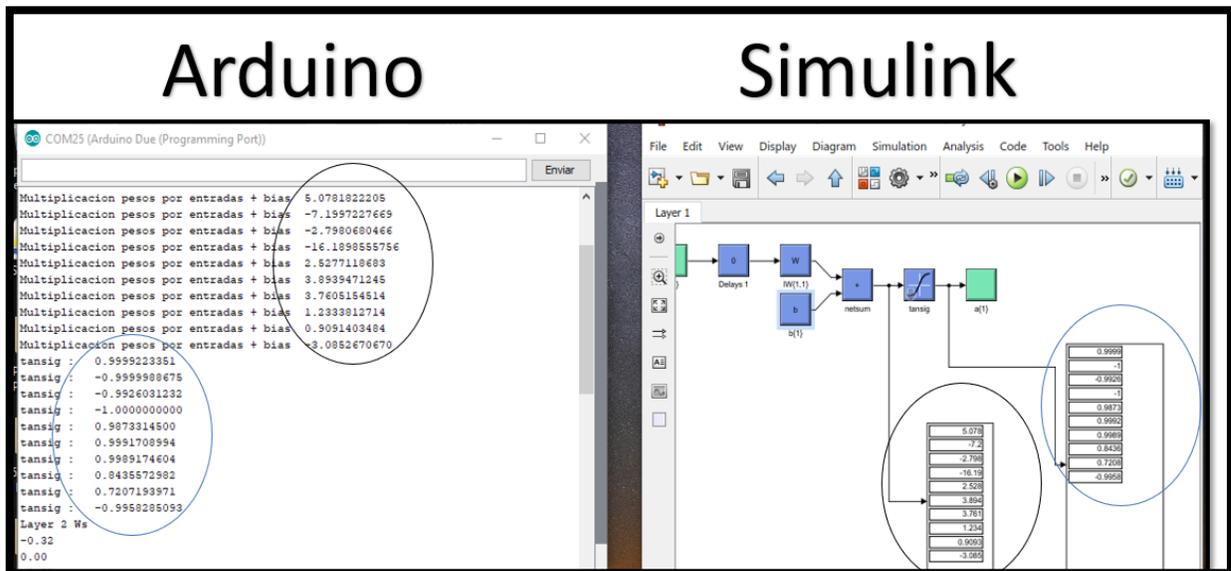


Figura 67 Validación de red

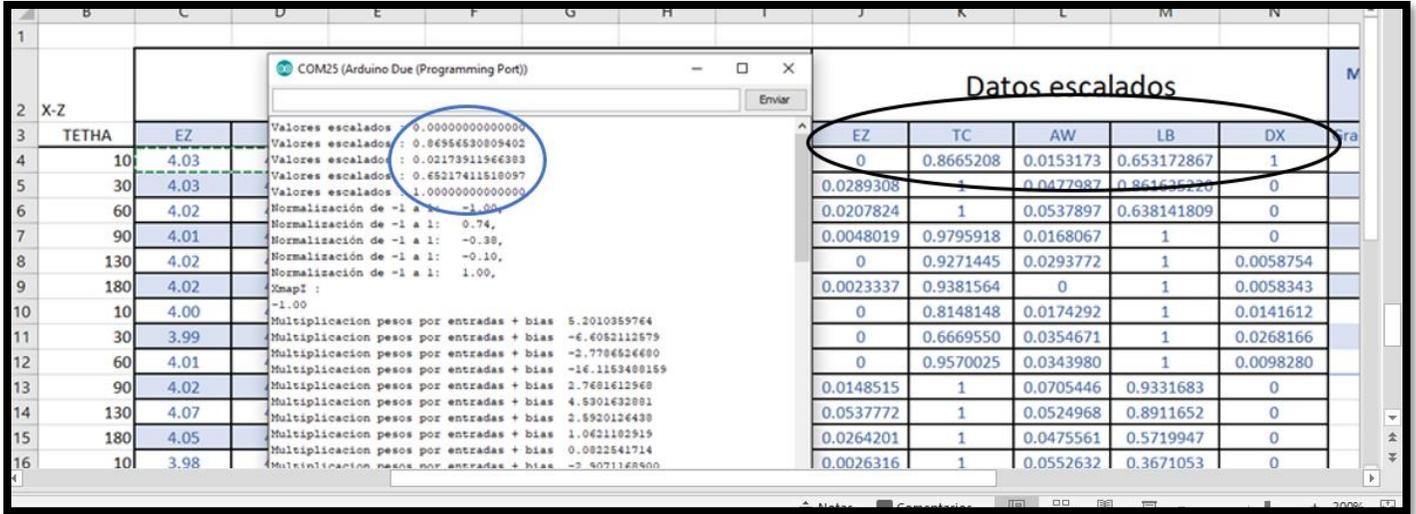


Figura 68 Comparativo datos calculados Excel vs resultados Arduino

En la Figura 68 Comparativo datos calculados Excel vs resultados Arduino, se muestra una validación adicional que se hizo, la cual consistió en comparar los datos escalados calculados en Excel, contra los datos obtenidos en Arduino.

CAPÍTULO IV. PUESTA EN OPERACION

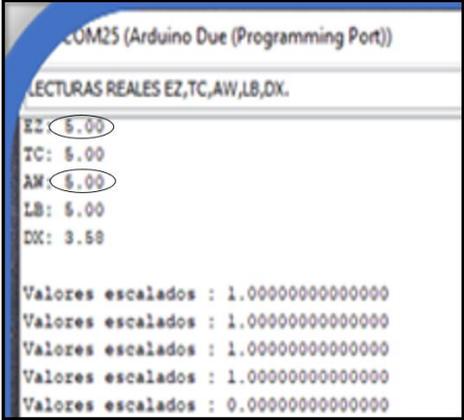
4.1 RESUMEN CAPÍTULO

4.2 PRUEBAS EN GRAL DEL SISTEMA

Se realiza la unión de códigos el código de red neuronal y el código de lectura del módulo de sensores.

A continuación, se muestra un comparativo entre los datos del muestreo y los datos en tiempo real, donde se valida que efectivamente la red junto con las lecturas del módulo está funcionando correctamente.

Lecturas obtenidas				
EZ	TC	AW	LB	DX
4.03	4.83	4.05	4.63	4.95
4.03	4.80	4.04	4.69	4.01
4.02	4.82	4.04	4.52	4.00
4.01	4.82	4.02	4.84	4.01
4.02	4.81	4.05	4.87	4.03
4.02	4.82	4.02	4.87	4.02
4.00	4.75	4.02	4.92	4.02
3.99	4.76	4.03	5.14	4.02
4.01	4.79	4.04	4.82	4.02
4.02	4.81	4.06	4.76	4.01
4.07	4.81	4.07	4.72	4.03
4.05	4.79	4.07	4.46	4.03
3.98	4.73	4.02	4.25	3.97
4.00	4.78	4.03	4.30	4.00
4.01	4.79	4.03	4.74	4.01



```
COM25 (Arduino Due (Programming Port))
LECTURAS REALES EZ,TC,AW,LB,DX.
EZ: 5.00
TC: 5.00
AW: 5.00
LB: 5.00
DX: 3.50
Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 0.0000000000000000
```

Figura 69 Comparativo lecturas vs Arduino

Datos escalados				
EZ	TC	AW	LB	DX
0	0.8665208	0.01531729	0.653172867	1
0.02893082	1	0.04779874	0.861635220	0
0.0207824	1	0.05378973	0.638141809	0
0.00480192	0.9795918	0.01680672	1	0
0	0.9271445	0.0293772	1	0.0058754
0.00233372	0.9381564	0	1	0.0058343
0	0.8148148	0.0174292	1	0.0141612
0	0.6669550	0.0354671	1	0.0268166
0	0.9570025	0.0343980	1	0.0098280
0.01485149	1	0.0705446	0.9331683	0
0.05377721	1	0.0524968	0.8911652	0
0.02642008	1	0.0475561	0.5719947	0
0.00263158	1	0.0552632	0.3671053	0

```

Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 1.0000000000000000
Valores escalados : 0.0000000000000000
Normalización de -1 a 1: 36.19
Normalización de -1 a 1: 1.00
Normalización de -1 a 1: 27.35
Normalización de -1 a 1: 1.00
Normalización de -1 a 1: -1.00
Multiplicación pesos por entradas + bias -8.0293254852
Multiplicación pesos por entradas + bias 105.5903701782
Multiplicación pesos por entradas + bias 93.6030044556
Multiplicación pesos por entradas + bias -21.0623959106
Multiplicación pesos por entradas + bias -36.2610206604
Multiplicación pesos por entradas + bias -57.9057950159
Multiplicación pesos por entradas + bias -212.8668823242
Multiplicación pesos por entradas + bias 27.0895099640
Multiplicación pesos por entradas + bias -202.0514373779
Multiplicación pesos por entradas + bias 8.8943481445
tansig : -0.9999997616
tansig : 1.0000000000
tansig : 1.0000000000
tansig : -1.0000000000
tansig : 1.0000000000
tansig : -1.0000000000
tansig : -1.0000000000
tansig : 0.9999999404
Layer 2 Ws

```

Figura 70 Comparativo 2, lecturas vs Arduino

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la validación de los resultados, se hizo la prueba de seguimiento de luz, esta prueba consistió en establecer la relación entre la radiación que el módulo de sensores está detectando, en base a eso el sistema mecatrónico debe responder moviéndose al lado donde se encuentre la fuente de emisión de luz.

El recorrido que se hizo en las pruebas fue el mismo recorrido que se ocupó cuando se determinaron los parámetros para hacer la red neuronal. En la Figura 71 Trayectoria a seguir con luz para validación, se muestra las trayectorias que se usaran para seguir la luz.

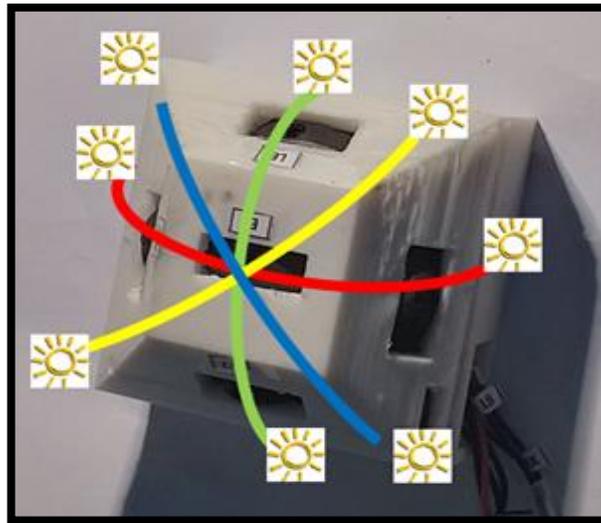


Figura 71 Trayectoria a seguir con luz para validación

Las pruebas se realizaron primero de forma horizontal y posterior verticalmente simulando la trayectoria del sol. Como se ve en las figuras: Figura 73 Seguimiento horizontal, Figura 73 Trayectoria horizontal, Figura 74 Trayectoria horizontal centro.

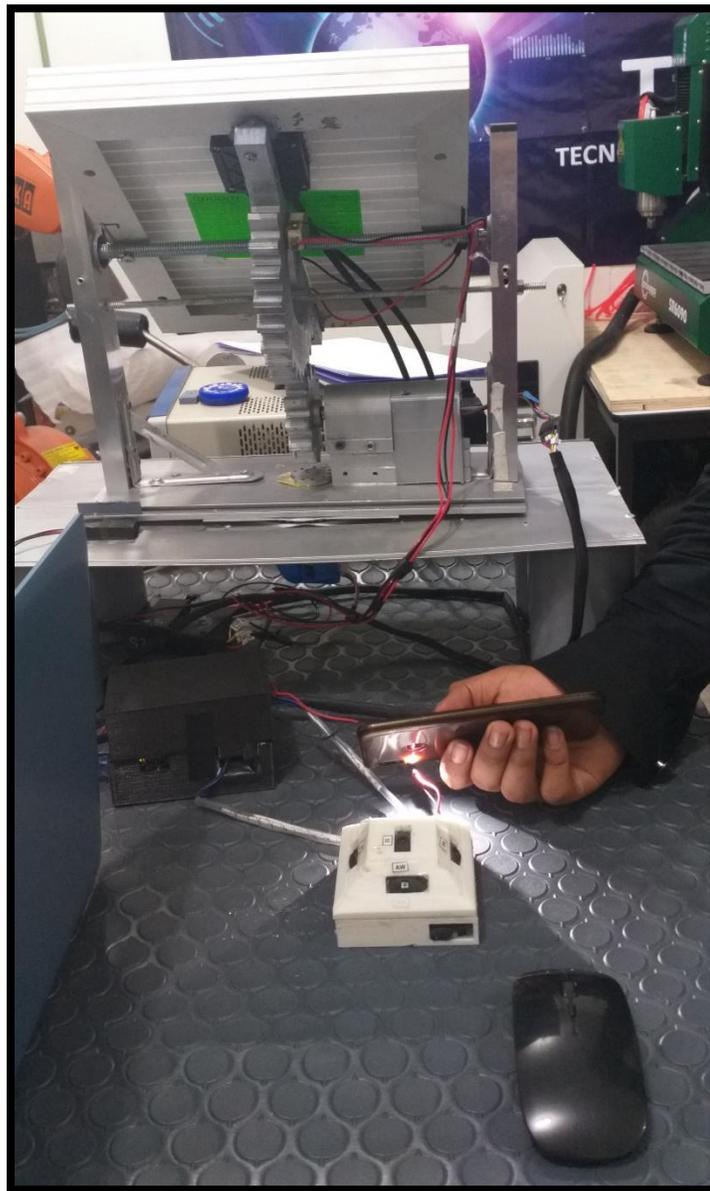


Figura 72 Seguimiento horizontal

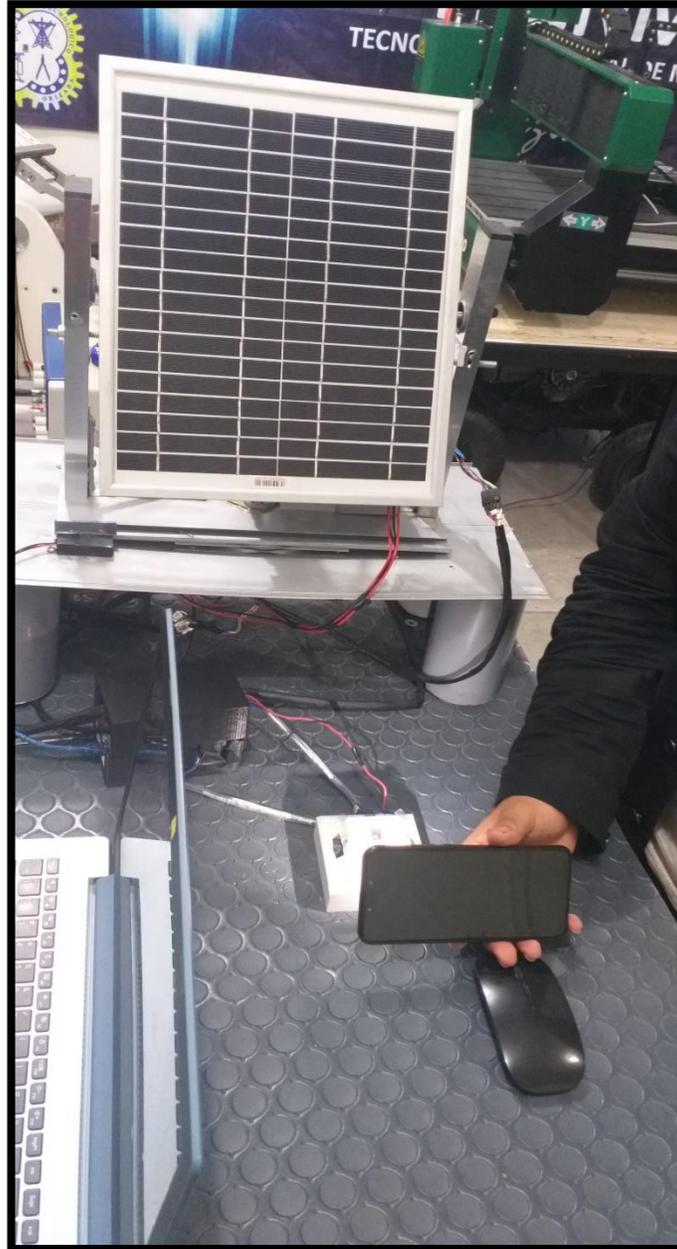


Figura 73 Trayectoria horizontal

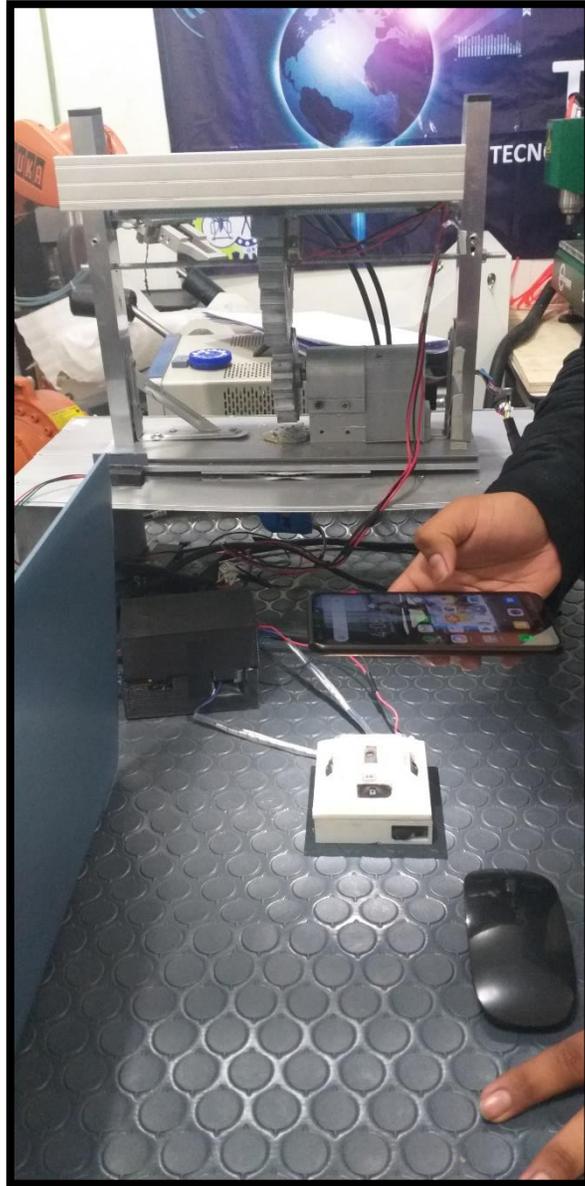


Figura 74 Trayectoria horizontal centro

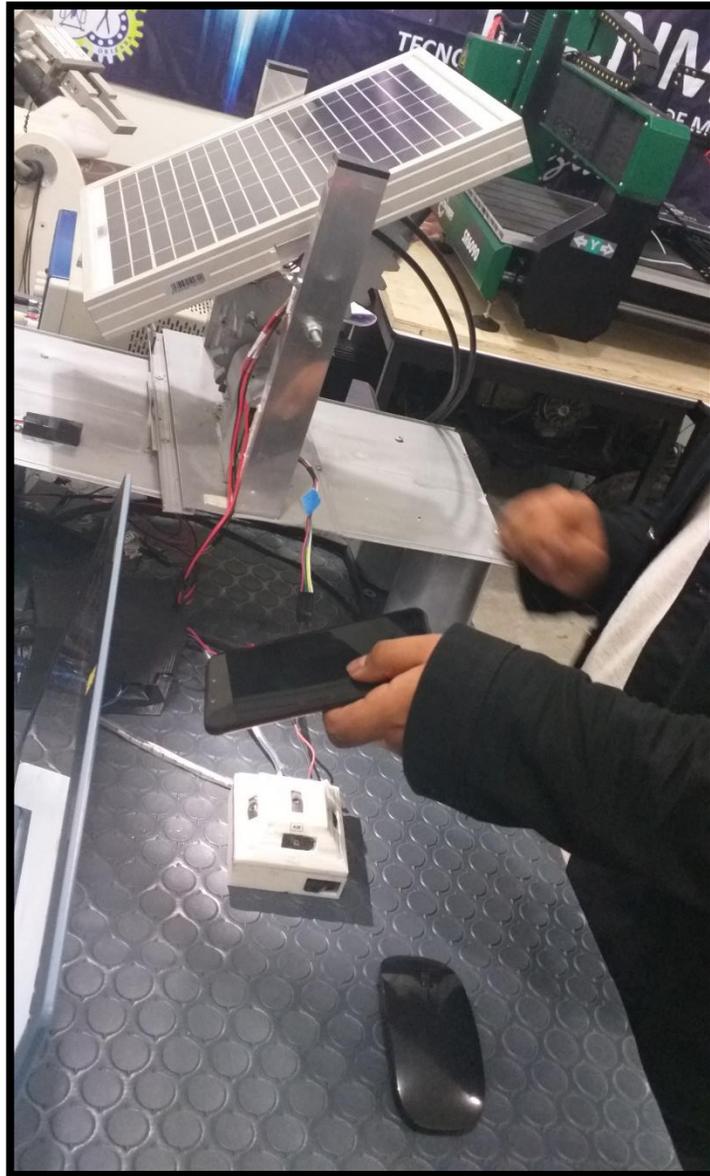


Figura 765 Trayectoria en diagonal

En las siguientes figuras se observan las pruebas realizadas para trayectorias en diagonal. Figura 776 Trayectoria en diagonal,

Figura 77 Trayectoria en diagonal.

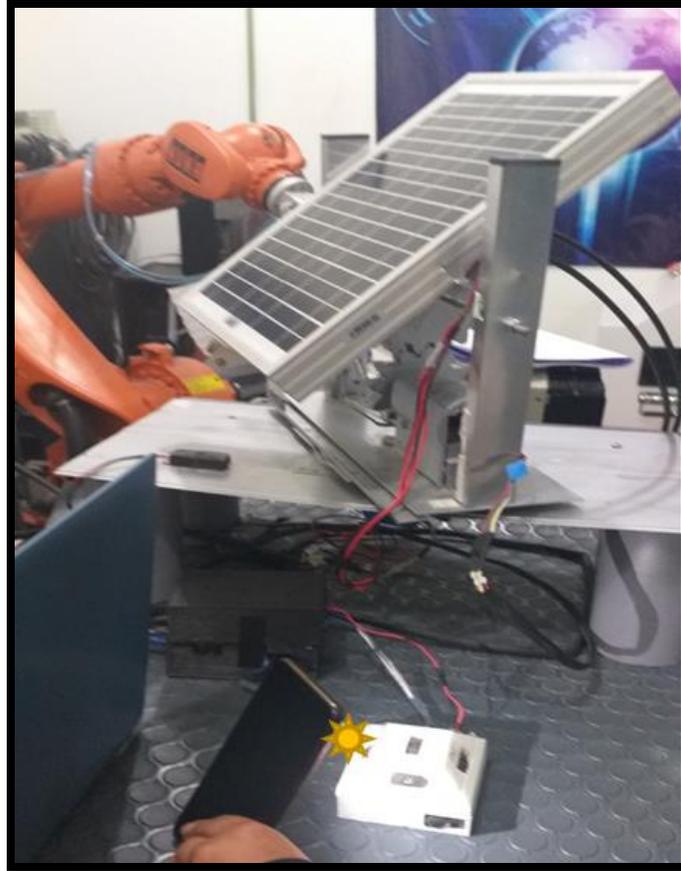


Figura 776 Trayectoria en diagonal

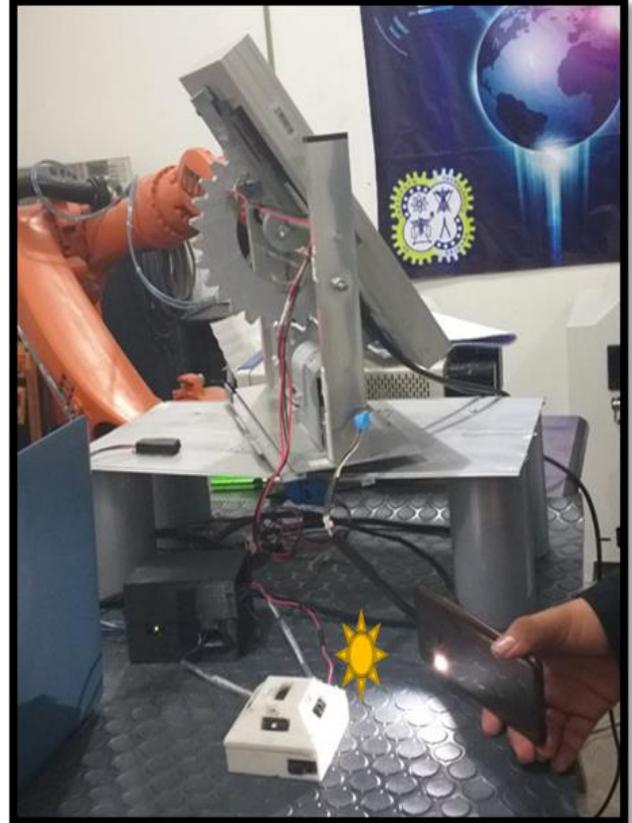


Figura 77 Trayectoria en diagonal

CONCLUSIONES

Se concluye de acuerdo a los resultados obtenidos que el trabajo titulado “Diseño y fabricación de un sistema mecatrónico de dos grados de libertad, en un panel fotovoltaico para captar la mayor parte de radiación solar”, cumple satisfactoriamente con el objetivo para el cual fue diseñado. Es decir, el sistema mecatrónico cumple con su función de dar movimiento al panel solar en base a la indicación que le proporciona la red neuronal, la cual obtiene su información de la señal que recibe de los módulos de sensores

En las pruebas realizadas se observa como el sistema, a través de la red configurada, realiza el envío de la señal para que los motores se muevan de acuerdo a la entrada que están recibiendo, en este caso, el valor más alto de radiación solar detectado en el módulo de sensores.

TRABAJO FUTURO

- Es factible continuar el proyecto ya que se puede seguir aportando diferentes opciones de mejoras tanto mecánicas con amplia posibilidad en cuanto a la estructura, cambios en el sistema de transmisión, mejoramiento de piezas, propiciando mayor robustez ya sea para aplicaciones industriales o también sea el caso mejoras en el algoritmo de control.
- Realizar un estudio mecánico más profundo a fin de diseñar e implementar este tipo de seguidor para soportar más paneles solares.
- El programa tiene la posibilidad de seguir agregando diferentes opciones de acuerdo a las necesidades de la aplicación, tal como agregar nuevas secuencias automáticas o mejoras en la detección de errores.
- Desarrollar una interfaz implementada a través de un dispositivo Android o iOS, para controlar y monitorear de manera remota.
- Optimizar el control de inteligencia artificial a través del uso de microprocesadores como la tarjeta núcleo.
- Desarrollar un panel que incluya el sistema mecatrónico.

REFERENCIAS

- [1] A. ESCOBAR MEJIA Ingeniero Electricista, M. Sc Profesor Asistente, M. HOLGUÍN LONDOÑO Ing Electricista, and J. R. CARLOS OSORIO Estudiante Ing Electricista, “\376\377\0002\0004\0005\000-\0002\0005\0000,” *Sci. Tech. Año XVI*, vol. 44.
- [2] T. Fin de Máster and D. J. Pedro Casanova Pelaez, “Universidad de Jaén Desarrollo de software para Seguidor Solar Alumna: Zarin López Millanes,” 2015.
- [3] S. I. Ao and International Association of Engineers., *World Congress on Engineering : WCE 2010 : 30 June - 2 July, 2010, Imperial College London, London, U.K.* Newswood Ltd., 2010.
- [4] H. Fathabadi, “Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators,” *Renew. Energy*, vol. 95, pp. 485–494, Sep. 2016.
- [5] Z. El Jaouhari, Y. Zaz, S. Moughyt, O. El Kadmiri, and Z. El Kadmiri, “Dual-Axis Solar Tracker Design Based on a Digital Hemispherical Imager,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 141, no. 1, p. 011001, Aug. 2018.
- [6] F. Mancilla-David, F. Riganti-Fulginei, A. Laudani, and A. Salvini, “A neural network-based low-cost solar irradiance sensor,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 3, pp. 583–591, 2014.
- [7] L. Lian, D. R. Nayanasiri, D. L. Maskell, and D. M. Vilathgamuwa, “A hybrid maximum power point tracking for partially shaded photovoltaic systems in the tropics,” *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 53–65, 2015.
- [8] D. De Electrónica, “UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA ‘REVISIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS MPPT PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS’ PABLO IGNACIO TELECHEA ALARCÓN.”
- [9] R. Arreola Gómez, A. Quevedo Nolasco, M. Castro Popoca, Á. Bravo Vinaja, and D. Reyes Muñoz, “Diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico,” *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, vol. 6, no. 8, p. 1715, Nov. 2017.
- [10] M. B. España, “Diseño y construcción de un seguidor solar de 2 ejes Autor : Marcos Bernal España,” 2016.
- [11] M. Kermadi and E. M. Berkouk, “Artificial intelligence-based maximum power point tracking controllers for Photovoltaic systems: Comparative study,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 369–386, 01-Mar-2017.
- [12] L. Gil-Antonio, B. Saldivar, O. Portillo-Rodríguez, J. C. Ávila-Vilchis, P. R. Martínez-Rodríguez, and R. Martínez-Méndez, “Flatness-based control for the maximum power point tracking in a photovoltaic system,” *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019.
- [13] P. C. P. Chao, W. D. Chen, and C. K. Chang, “Maximum power tracking of a generic photovoltaic system via a fuzzy controller and a two-stage DC-DC converter,” in *Microsystem Technologies*, 2012, vol. 18, no. 9–10, pp. 1267–1281.

- [14] A. El Khateb, N. A. Rahim, J. Selvaraj, and M. N. Uddin, "Fuzzy-logic-controller-based SEPIC converter for maximum power point tracking," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 4, pp. 2349–2358, 2014.
- [15] R. Boukenoui, H. Salhi, R. Bradai, and A. Mellit, "A new intelligent MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under fast transient variations of shading patterns," *Sol. Energy*, vol. 124, pp. 124–142, Feb. 2016.
- [16] A. A. Kulaksiz and R. Akkaya, "A genetic algorithm optimized ANN-based MPPT algorithm for a stand-alone PV system with induction motor drive," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2366–2375, Sep. 2012.
- [17] E. N. Materia, D. E. P. Pct, D. E. S. Es, and I. De Automática, "PCT," 2008.
- [18] E. N. Materia, D. E. P. Pct, and P. I. C. I, "WO 2009/030792 AI," 2009.
- [19] M. A. V. Zapata *et al.*, *Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de Combustible como fuentes de energía*. 2009.
- [20] K. Ogata *et al.*, *Ingeniería de control moderna www.elsolucionario.net*. 2010.
- [21] W. Tomasi, I. Gloria, M. Hernández, I. Virgilio, and G. Pozo, *Sistemas de comunicaciones opticas*. 2003.
- [22] "arduino modulacion por ancho de pulso pwm." [Online]. Available: <http://www.arduino.ut fsm.cl/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/>.
- [23] C. Veloso, "PUENTE H CON DRIVER L298," 2016. [Online]. Available: <https://www.electrontools.com/Home/WP/2016/05/06/puente-h-con-driver-l298/>.
- [24] J. A. E. G. Álvarez, "ASI FUNCIONA EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA O CONTINUA," 2015. [Online]. Available: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_motor_cd/af_motor_cd_6.htm.
- [25] R.c.hibbeler, "mecánica de materiaels," 2016.
- [26] ARDUINO, "ARDUINO." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- [27] I. The MathWorks, "MATLAB." .
- [28] A. Ballesteros, "Redes Neuronales." [Online]. Available: <http://www.redes-neuronales.com.es/tutorial-redes-neuronales/clasificacion-de-las-redes-neuronales-artificiales.htm>.