

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LUZ CON DOS
GRADOS DE LIBERTAD PARA REPOSICIONAR UN CONJUNTO DE PANELES
FOTOVOLTAICOS**

**DAVID SAMUEL GARCÍA ALVIADES
CARLOS MICHELL VIADERO SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LUZ CON DOS
GRADOS DE LIBERTAD PARA REPOSICIONAR UN CONJUNTO DE
PANELES FOTOVOLTAICOS**

**DAVID SAMUEL GARCÍA ALVIADES
CARLOS MICHELL VIADERO SUÁREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**RICARDO ALFONSO JAIMES ROLON
Ingeniero Mecánico**

Co-director

**LUIS MIGUEL ZABALA GUALTERO
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA	20
4. MARCO TEORICO	21
4.1 CONSUMO ENERGETICO.....	21
4.2 ENERGIA SOLAR.....	23
4.3 RADIACION SOLAR EN COLOMBIA	28
4.4 GENERALIDADES DE LA ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	29
4.4.1 El Efecto Fotoeléctrico	29
4.4.2 Tipos de Células Fotovoltaicas	30
4.6 GEOMETRIA Y MOVIMIENTO SOLAR.....	34
4.7 SOPORTES Y SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR	37
4.7.1 Soportes Fijos	39
4.7.2 Soportes de uno y dos grados de libertad	39
5. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	42
5.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.....	42
5.1.1 Alternativa N° 1	42
5.1.2 Alternativa N° 2.....	43
5.1.3 Alternativa N° 3.....	44
5.2 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	46
5.2.1 Parámetros geométricos.....	47

6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECANICO, ELECTRICO, ELECTRONICO Y DE CONTROL	48
6.1 CONJUNTO MECANICO	49
6.1.1 Diseño CAD	49
6.1.1.1 Componentes del robot.....	49
6.1.1.2 Selección de servomotor.....	51
6.1.1.3 Análisis de esfuerzos.	53
6.1.2 Construcción y Ensamblaje.....	55
6.2 UNIDAD ELECTRICA Y ELECTRONICA	59
6.2.1 Paneles Fotovoltaicos	61
6.2.2 Arduino Mega.....	62
6.2.3 Actuadores: servomotores	64
6.2.4 Fuente de alimentación y autonomía	66
6.2.5 Conjunto de medición de potencia.....	69
6.2.6 Circuito fotorresistencias.....	82
6.2.7 Placa PCB.....	85
6.3 MODULO DE CONTROL.....	89
6.3.1 Declaración de variables.....	90
6.3.2 Inicialización del programa.....	90
6.3.2 Movimiento de los servos.....	91
6.3.3 Ubicación final.....	93
6.3.4 Interfaz Labview	94
7. PUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	98
7.1 CALIBRACIÓN.....	98
7.2 DESCRIPCION DEL MONTAJE	101
7.3 PRUEBAS.....	103
7.3.1 Prueba 1 (Robot y Panel 2 con seguimiento solar)	104
7.3.2 Prueba 2 (Robot y Panel 2 estáticos 90° altura solar)	105
7.3.3 Prueba 2 (Robot con seguimiento solar, Panel 2 90° altura solar).....	106
7.3.4 Comportamiento de la Batería	107

8. CONCLUSIONES	109
9. RECOMENDACIONES.....	110
BIBLIOGRAFIA.....	111
ANEXOS.....	112

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Radiación solar en Colombia [cal/cm ² /día].....	18
Figura 2. Componentes de la radiación solar en la superficie.	24
Figura 3. Concepto de la radiación directa y difusa.	25
Figura 4. Irradiación solar recibida sobre terreno plano en una región ecuatorial.	27
Figura 5. Efecto fotoeléctrico de un panel debido a la radiación solar.	29
Figura 6. Variación de las características de la curva I-V según la temperatura.	31
Figura 7. Variación de las características de la curva I-V según la irradiancia.	32
Figura 8. Trayectoria y posición aparente del sol desde un observador.	34
Figura 9. Ángulos Solares.....	35
Figura 10. Elevación y hora solar.....	36
Figura 11. Ubicación de un panel bajo la geometría solar.	37
Figura 12. Conjunto soporte fijo de paneles fotovoltaicos.....	39
Figura 13. Soporte de un seguidor con un grado de libertad.	40
Figura 14 Soporte de un seguidor con dos grado de libertad.	41
Figura 15. Diseño N°1.....	43
Figura 16. Diseño N°2.....	44
Figura 17. Diseño N°3.....	45
Figura 18. Componentes Básicos.	46
Figura 19. Geometría del Robot.....	47
Figura 20. Diseño General.....	48
Figura 21. Despiece de componentes.	50
Figura 22. Configuración del servomotor.	52
Figura 23. Torque vs Tiempo Servomotor.	53
Figura 24. Análisis de Deformación (Escala 14:1).	54
Figura 25. Análisis de Tenciones.	55
Figura 26. Base Servomotor.	56
Figura 27. Piezas en acrílico.....	57
Figura 28. Ensamblaje base y soporte panel.....	58
Figura 29. Construcción Base Estructura.	58
Figura 30. Distancia entre paneles	59
Figura 31. Diagrama de conexiones general.	60
Figura 32. Panel FV. 6V – 500mA	61
Figura 33. Distribución de la tarjeta Arduino MEGA.....	62
Figura 34. Cable conexión Arduino.....	63
Figura 35. Pines de conexión macho y hembra.....	64
Figura 36. Servomotor Hitec HS-311.	64

Figura 37. Diagrama de conexión para los modos de operación.	66
Figura 38. Batería de alimentación.	67
Figura 39. Especificaciones de relé	68
Figura 40. Resistencia cerámica 15 Ω , 5 [W].	70
Figura 41. Circuito esquemático básico para medir potencia.	71
Figura 42. Sensor de corriente ACS712 - 5 [A].	71
Figura 43. Ejemplo de Diagrama de conexión para poner en funcionamiento el sensor de corriente.	73
Figura 44. Código lectura de corriente con filtro.	74
Figura 45. Resultados monitor serial lectura corriente con filtro.	75
Figura 46. Código para calibrar sensibilidad del sensor de corriente.	76
Figura 47. Resultado monitor serial, valor de voltaje para una corriente de 0 [A].	76
Figura 48. Resultado monitor serial, valor de voltaje para una corriente de 1 [A].	77
Figura 49 Concepto divisor de voltaje	78
Figura 50. Esquema divisor de tensión panel-Arduino.	79
Figura 51. Esquema general del circuito de sensado de corriente y voltaje.	80
Figura 52. Montaje físico de circuito de sensado de corriente y voltaje.	81
Figura 53. Fotorresistor LDR.	82
Figura 54. Grafica de funcionamiento fotorresistencia en función de la luminosidad.	82
Figura 55. Conexión de un fotorresistor LDR.	83
Figura 56. Diagrama esquemático conexiones de los fotorresistores.	84
Figura 57. Diagrama Físico de distribución de la placa PCB	86
Figura 58. Diagrama esquemático de la placa PCB y Arduino.	87
Figura 59. Construcción de la placa PCB	88
Figura 60. Ensamblaje Final	88
Figura 61. Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento solar.	89
Figura 62. Declaración de Variables.	90
Figura 63. El "Void setup()" del código.	91
Figura 64 Movimiento del servo base	92
Figura 65. Movimiento del servo panel	92
Figura 66 Código Posición final	93
Figura 67. Interfaz gráfica en LabVIEW para extraer datos.	94
Figura 68. Monitor serial del código Arduino original.	95
Figura 69. Monitor serial del código Arduino modificado para pruebas LabVIEW.	95
Figura 70. Programación grafica LabVIEW para extraer datos.	96
Figura 71. Puesta en marcha de toma de datos	98
Figura 72. Código final de lectura de las señales de corriente y voltaje con filtro.	99
Figura 73. Lectura de voltaje y corriente por medio del multímetro.	100
Figura 74. Resultado monitor serial de las señales de voltaje y corriente	100
Figura 75. Ubicación geografica de la realizacion de las pruebas.	101

Figura 76. Orientación en los Ejes Cardinales	102
Figura 77. Ejecución del conjunto robot-seguidor durante las pruebas	103
Figura 78. Grafica potencia panel 1 y 2 con control de seguimiento.....	104
Figura 79. Grafica potencia panel 1 y 2 horizontales sin control de seguimiento	105
Figura 80. Grafica potencia panel 1 con seguimiento y panel 2 horizontal sin control de seguimiento.....	106
Figura 81. Grafica voltaje de la Bateria.....	108

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Cuadro comparativo de la energía solar.	23
Tabla 2. Parámetros de las proporciones de la radiación solar.	25
Tabla 3. Conversión día del mes, en el día del año.	26
Tabla 4. Disponibilidad promedio de energía solar por regiones Colombianas.	28
Tabla 5. Características de los tipos de células fotovoltaicas.	30
Tabla 6. Componentes generales que se requieren en un sistema fotovoltaico.	33
Tabla 7. Descripción de los ángulos solares.	35
Tabla 8. Propiedades de los materiales.	49
Tabla 9. Apartados de la unidad eléctrica y electrónica.	59
Tabla 10. Características internas del sensor de corriente ACS712.	72
Tabla 11. Funcionamiento de la disposición de conexión del fotorresistor según la figura 55.	84
Tabla 12. Componentes de la placa PCB.	86
Tabla 14. Descripción de bloques LabVIEW.	97
Tabla 15. Configuración del montaje de las pruebas a realizar.	103
Tabla 16. Cantidad de energía entregada: Robot y Panel 2 con seguimiento.	105
Tabla 17. Cantidad de energía entregada: Robot y Panel 2 Estáticos.	106
Tabla 18. Cantidad de energía entregada: Robot con seguimiento y Panel 2 Estático.	107

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Planos de diseño del conjunto.....	113
Anexo B. Data Sheets Servomotor HS311	121
Anexo C. Data Sheets LDR	122
Anexo D. Manual de usuario.....	123
Anexo E. Presupuesto del proyecto.....	131
Anexo F. Código de programación	132

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LUZ CON DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA REPOSICIONAR UN CONJUNTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS^{*}

AUTORES: DAVID SAMUEL GARCÍA ALVIADES
CARLOS MICHELL VIADERO SUÁREZ^{**}

PALABRAS CLAVE: ARDUINO, PANEL FOTOVOLTAICO, SEGUIDOR DE LUZ.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad existen paneles fotovoltaicos que proporcionan energía eléctrica por medio de la radiación emitida por el sol, pero su eficiencia no es suficiente. Este proyecto tiene como objetivo aumentar esta producción de energía mediante un mecanismo seguidor de luz ligero y automatizado que represente la mejor luminosidad para un lugar determinado en Bucaramanga. Con el fin de poder reposicionar un conjunto de paneles aprovechando la mayor radiación del sol proporcionado por el ángulo de incidencia ortogonal hacia el panel.

Para esto, se realizó un robot seguidor de luz el cual consta de tres partes importantes, el sistema mecánico, sistema eléctrico y el de control. En el sistema mecánico se construyó una base para el panel de 3W con dos grados de libertad Azimut y altura solar, que serán actuados por dos servomotores. En el sistema eléctrico se quemó un PCB, el cual es un divisor de tensión para poder controlar los servomotores de manera correcta, y en el mismo, se conectara un Arduino MEGA con una batería para la recolección y retro-alimentación del sistema, Además tendrá cuatro fotorresistencias que verificarán la mayor luminosidad. En el control, se desarrollará un algoritmo mediante lenguaje Arduino, el cuál realizará un escaneo en los 180° para dos planos cada 30 minutos, con el puerto serial tomará los datos de la mejor ubicación para el panel y los guardará para su posterior o inmediato uso de reposicionamiento de un segundo panel que será el simulador del conjunto paneles.

Como resultado se obtiene el robot seguidor de luz capaz de posicionarse de manera autónoma, encontrando los ángulos azimut y altura solar necesarios para poder reposicionar el campo de paneles en el punto de máxima irradiación y de esta manera aprovechar de mejor manera la energía solar.

^{*} Trabajo de grado.

^{**} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolon. Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A ROBOT LIGHT FOLLOWER WITH TWO DEGREES OF FREEDOM TO REPLACE A SET OF PHOTOVOLTAIC PANELS*

AUTHORS: DAVID SAMUEL GARCÍA ALVIADES
CARLOS MICHELL VIADERO SUÁREZ**

KEY WORDS:

Arduino, photovoltaic panel, light tracker

DESCRIPTION

Nowadays, there exist photovoltaic panels that provide electric power by means of the radiation emitted by the sun, but his efficiency is not enough. This project aims to increase the production of energy by means of a lightweight and automated follower light mechanism that represents the best brightness for a specific place in Bucaramanga. To be able to position a set of panels taking advantage of the greater radiation of the sun provided by the angle of incidence orthogonal to the panel.

For this, we performed a robot follower of light, which consists of three major parts, the mechanical system, electrical system and the control system. In the mechanical system, we constructed a basis for the panel 3W with two degrees of freedom Azimuth and solar height, which will be actuated by two servomotors. In the electrical system was burned a PCB, which is a voltage divider to be able to control the servomotors in the correct way; also, an Arduino MEGA will be connected to a battery for the collection and retro-feeding of the system. In addition, it will have four photoresistors that will check the brightness. In the control system, it will develop an algorithm using Arduino language, which will perform a scan in 180° for two drawings every 30 minutes, the serial port will take the data from the best location for the panel and store for later or immediate use of re positioning of a second panel which will be the simulator of the set of panels.

As a result, you get the robot follower of light, able to position itself in an autonomous way, finding the azimuth and solar height angles necessary to reposition the field of panels at the point of maximum irradiance and in this way take advantage of the highest solar energy

* Degree Project.

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Mechanica Engineering. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolon. Mechanica Engineering.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía renovable es un campo de investigación muy amplio, donde se busca transformar energía primaria en electricidad necesaria para el ser humano, pero debido a la contaminación exponencial a la que nos encontramos actualmente es necesario tomar conciencia y ayudar a mitigar este impacto ambiental, dicho caso nos hace buscar formas alternativas para la generación de energía. Por lo cual la energía solar es una de estas energías limpias con más aplicaciones prácticas a un futuro, principalmente dentro del marco urbano para reducir la emisión de gases contaminantes y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Los materiales, el diseño y la instalación son los costos de un sistema solar fotovoltaico, ya que no requiere ningún combustible para su funcionamiento y los costos de mantenimiento son muy bajos, a diferencia de los sistemas convencionales de generación de electricidad.

Este proyecto tiene como fin realizar el concepto de un robot seguidor de luz con dos grados de libertad para que emita una señal de reposición a un conjunto de paneles que en un determinado tiempo se reubicarán dependiendo de la posición del sol en ese instante. De esta manera si se implementaría en la vida real, poder aprovechar siempre al máximo la radiación solar y almacenar toda esta energía para utilizarla en nuestra comunidad para el funcionamiento de electrodomésticos y/o máquinas industriales, o abastecer directamente a una red general de distribución de energía. Igualmente, lograr disminuir la huella de carbono en el mundo, ya que hoy en día es necesaria la utilización de energías renovables y limpias para cuidar el medio ambiente. A parte de este objetivo central, el proyecto busca aportar en el estudio de la línea térmica y de control de ingeniería mecánica puesto que ayuda a comprender y/o demostrar fenómenos físicos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El continuo desarrollo industrial y el aumento en la demanda de consumo de energía ha traído como consecuencia un deterioro acelerado del medio ambiente debido a las formas de generación de energía actuales, por ejemplo; las emisiones de CO₂ y otros gases de los procesos de combustión de fuentes fósiles, que además de destruir la capa de ozono afectan la integridad de los seres vivos¹. Al hacer una comparación entre las formas convencionales de generación y las energías renovables, se puede decir que mediante los métodos actuales se obtiene grandes cantidades de energía, pero son igualmente contaminantes, mientras que, con las energías renovables en especial la fotovoltaica la generación es baja, pero sin contaminación aparente. Por eso la energía eléctrica es un campo de investigación muy amplio, donde se busca almacenar y utilizar dicha energía de forma limpia a su mayor eficiencia posible. Esto conlleva que los gobiernos y entidades institucionales estén invirtiendo en el uso de energía renovable.

En Colombia existen regiones con buenos niveles de radiación solar², en la Figura 1, se muestra un ejemplo del mapa de radiación solar del país; en la que se observa que las regiones con los niveles más altos son: La costa atlántica y parte del oriente. El municipio de Bucaramanga, ubicado al nororiente del país sobre la Cordillera Oriental, en donde la radiación solar no es tan grande como la Guajira, pero es uno de los municipios que presentan buenas cantidades de radiación solar y no es explotada. Por ello si se aprovecha el alto índice de radiación y las amplias zonas libres de infraestructura en esta región, es posible desarrollar un robot

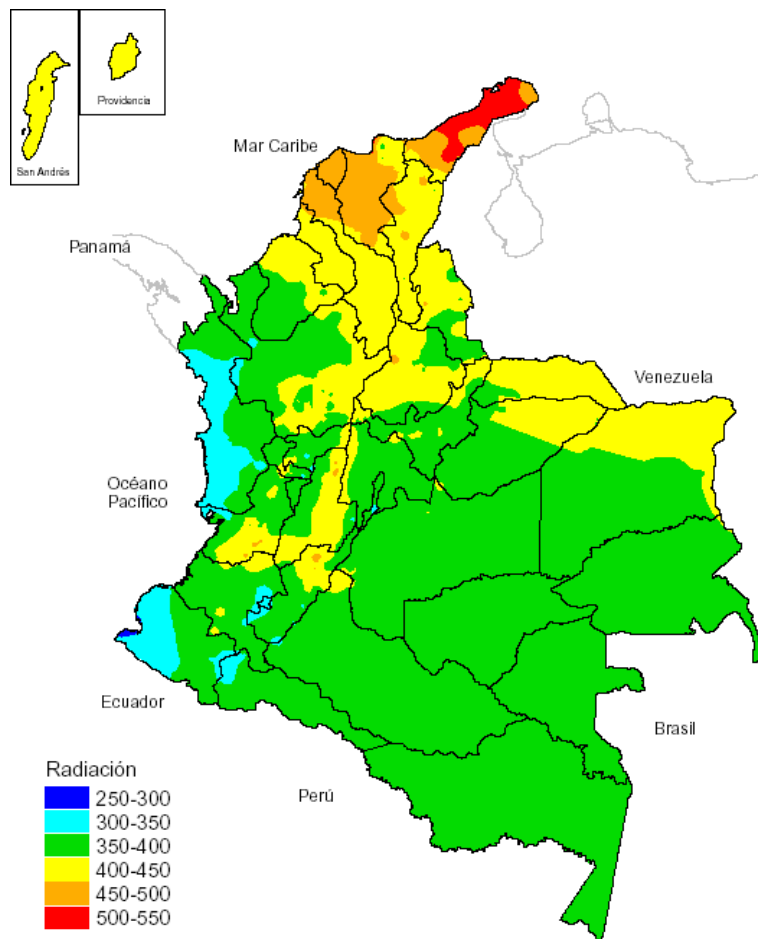
¹ Organización mundial de la salud. "Calidad de aire exterior" En: Centro de prensas. Buenos aires. 2014. Nota descriptiva N°313.

² Angélica García. Colombia País Maravilloso. Manual El Medio Ambiente en Colombia Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República. "Colombia a su Alcance" Publicación digital en la página web de la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República. Búsqueda realizada el 24 de Abril de 2015 Disponible en: < <http://www.todacolombia.com/geografia-colombia/radiacion-solar.html> >

seguidor de luz solar para la generación y almacenamiento de la energía fotovoltaica.

En la actualidad existen paneles fotovoltaicos que a la captura de energía eléctrica por medio de la radiación proporcionada por el sol no es suficiente debido a que esta varía con el tiempo puesto que el planeta tierra mantiene rotando en su eje las 24 horas y alrededor del sol los 365 días del año, por lo que la ubicación del panel no va ser del 100% efectiva. Por eso es necesario construir un prototipo capaz de posicionarse, en forma automática, en el punto de máxima radiación solar durante el día.

Figura 1. Radiación solar en Colombia [cal/cm²/día]



Fuente: Angélica García - Colombia País Maravilloso. Manual El Medio Ambiente en Colombia Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir en la investigación de energía renovable de la Universidad Industrial de Santander mediante la implementación de un robot seguidor de luz ligero, liviano y automatizado. Que describa la trayectoria de mayor radiación solar proporcionada por el ángulo de incidencia ortogonal hacia el panel.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Diseñar y construir un robot tipo articulado con un volumen de trabajo semiesférico de 10 cm de radio con dos grados de libertad, azimutal y altura solar de 0° a 180°. Compuesto por:
 - Un panel fotovoltaico policristalino de 15x15 cm y 3W pico
 - Dos servomotores como actuadores (Hitec HS 311) de 4.8 [v]
 - Una tarjeta de desarrollo Arduino MEGA
 - Cuatro fotorresistencias LDR como sensores.
- ❖ Desarrollar el algoritmo de seguimiento necesario para el posicionamiento del panel, mediante un barrido en todo su volumen de trabajo, localizando así el punto óptimo de máxima incidencia de rayos solares.
- ❖ Conseguir que el sistema sea completamente autónomo mediante una batería de 9[V] y 250[mA] que será cargada permanentemente por panel.
- ❖ Lograr que un segundo panel articulado modele el seguimiento de todo un conjunto de paneles, donde la trayectoria de estos será proporcionada y controlada por el robot seguidor.
- ❖ Implementar una interfaz hombre-máquina en LabVIEW donde se muestren los valores actuales de voltaje del panel, su posición y el tiempo de mapeo.
- ❖ Generar un manual de usuario y mantenimiento para el correcto funcionamiento del robot seguidor.

3. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA

La universidad como institución tiene un ideal de formación tanto académica como multidisciplinaria, lo cual supone el desarrollo de seres íntegros. La integralidad trae consigo conciencia ambiental, brindada a la comunidad estudiantil con el conocimiento de las energías renovables. Este conocimiento debe ser aprovechado para realizar proyectos de investigación que ofrezcan respuestas a los problemas de la renovación de la energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica es un campo de investigación muy amplio, donde se busca almacenar y utilizar dicha energía de forma limpia. Debido a la contaminación exponencial en la que nos encontramos actualmente, la energía limpia es una necesidad para el ser humano, pues estamos en la búsqueda de formas alternativas menos contaminantes.

El presente proyecto busca realizar aportes y obtener resultados direccionados a la resolución de estas necesidades, que permitan abordar de manera profunda esta temática en el contexto del área estratégica de energías alternativas. En la actualidad existen paneles fotovoltaicos que a la captura de energía eléctrica por medio de la radiación solar no es suficiente. Es necesario que la zona donde se ubiquen estos posean las características de un cielo despejado y dado el comportamiento de la rotación de la tierra con respecto al sol, el aprovechamiento de la energía solar no será la óptima si los paneles se mantienen en un estado estático durante todo el día. Este proyecto busca solucionar esta problemática de una forma económica y eficiente, para esto se espera construir un robot que siga la intensidad solar durante el periodo de luz en el día todo el año y que cada determinado tiempo (esto depende de las características territoriales donde se vaya a aplicar el sistema) emita una señal de reubicación a un sistema de control para que este reposicione un conjunto de paneles solares.

4. MARCO TEORICO

4.1 CONSUMO ENERGETICO

La disponibilidad de energía en el mundo se ha convertido en un problema crucial, dado que la gran mayoría de los países, tanto los en vías de desarrollo como los industrializados, se ven afectados por las crecientes demandas requeridas para satisfacer sus metas económicas y sociales.

A partir de los últimos años, se ha reconocido como inevitable que la oferta de energía debe sufrir una transición desde su actual dependencia de los hidrocarburos hacia aplicaciones energéticas más diversificadas, lo que implica el aprovechamiento de la variedad de fuentes de energía renovables que se disponen.

La mayoría del uso de los recursos energéticos utilizados por el hombre con el objeto de satisfacer algunas de sus necesidades, son principalmente en forma de calor y trabajo. En lo que se refiere a calor, es necesario para un gran número de aplicaciones, como la climatización de los locales, la preparación de alimentos, o la producción y transformación de algunos compuestos químicos. La utilización doméstica del calor comenzó con el dominio del fuego en las épocas prehistóricas y se consolidó a partir de la invención de las máquinas térmicas desde el siglo XVII. Ambos hitos constituyen sin duda unos de los logros tecnológicos más grandes en la historia de la humanidad.³

Calor y trabajo son dos necesidades básicas en cualquier grupo humano, independientemente de su nivel social, económico o tecnológico.

En la segunda mitad del siglo XVIII, el escocés James Watt perfeccionó la máquina de vapor y con ello se facilitó la producción industrial de cantidades relativamente grandes de trabajo a partir de la combustión, primero de leña y después de carbón mineral. Hacia mediados del siglo XIX se inventaron los primeros motores de combustión interna, que requieren un combustible muy

³ FERNANDEZ SALGADO, Jose Maria. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. Madrid: Ediciones Mundi-prensa, 2010. p. 1.

específico para funcionar. Con el tiempo, debido a razones técnicas y económicas, los motores de combustión interna, principalmente de gasolina y diesel, se hicieron cada vez más seguros, confiables, económicos y, por tanto abundantes. Fue así como nuestra sociedad se fue haciendo extraordinariamente dependiente de los combustibles fósiles.⁴

Los combustibles fósiles comprenden principalmente el petróleo y sus derivados, el gas natural y el carbón mineral. Al principio de la explotación se consideraban ilimitados y su impacto ambiental era despreciable.

Sin embargo, el extraordinario crecimiento de la población mundial, junto con el aumento en el consumo per cápita de estos recursos, ha propiciado que solo queden reservas de petróleo disponibles para su explotación económica durante la primera mitad del siglo XXI.

Por otro lado, el consumo masivo de hidrocarburos está produciendo ya alteraciones de la atmosfera a nivel mundial, conocido como el efecto invernadero, el cual produce un incremento en las temperaturas promedio mundiales. Tanto por razones económicas (próxima escasez de hidrocarburos) como ecológicas, es imperativo el desarrollo de nuevas alternativas energéticas, que sean menos agresivas contra el ambiente.

Como solución a estos problemas medioambientales y tecnológicos, existen muchas alternativas energéticas, algunas de ellas no han sido desarrolladas por limitaciones técnicas y económicas, y otras se han utilizado solo parcialmente.⁵

⁴ FERNANDEZ SALGADO. Op. Cit., p. 2.

⁵ FERNANDEZ SALGADO. Op. Cit., p. 4.

4.2 ENERGIA SOLAR

La energía solar como recurso energético terrestre, está constituida simplemente por la porción de la luz que emite el sol y que es interceptada por la tierra.

- Energía solar Directa: Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz, como por ejemplo, para la iluminación de recintos.
- Energía solar Térmica: consiste en el aprovechamiento de la radiación para la climatización, calentar fluidos que se pueden destinar para aguas calientes sanitarias, dar apoyo a la calefacción para atemperar piscinas etc.
- Energía solar Fotovoltaica: es la que permite transformar en electricidad la radiación solar por medio de células fotovoltaicas. Esta electricidad se puede utilizar de manera directa, se puede almacenar en acumuladores para un uso posterior, e incluso se puede introducir en la red de distribución eléctrica.

Tabla 1. Cuadro comparativo de la energía solar.

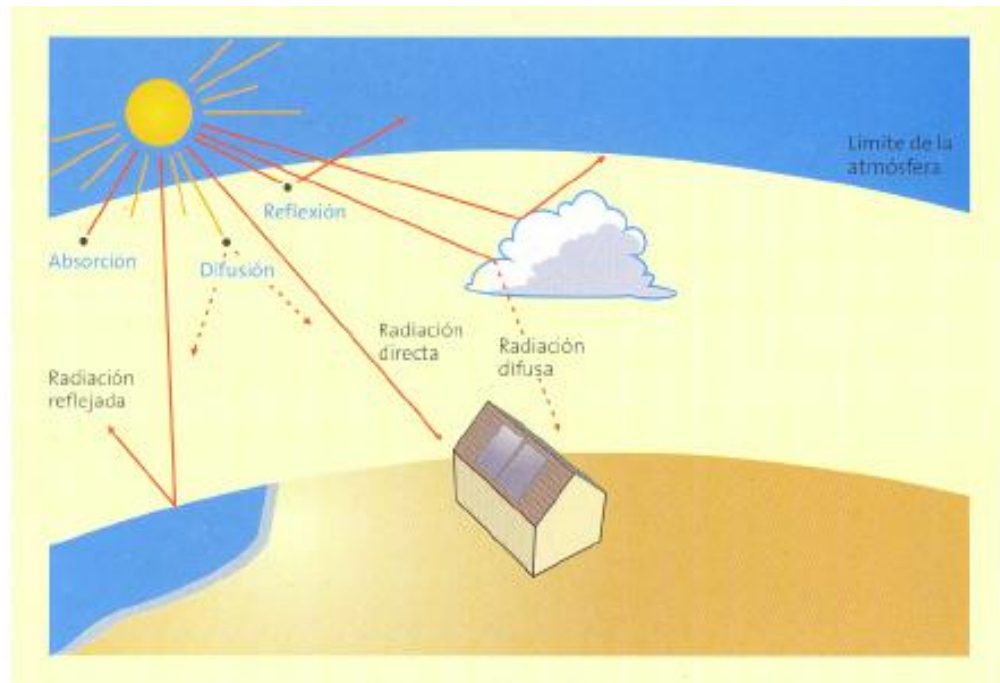
Energía Solar	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">• Escaso impacto ambiental• No produce residuos perjudiciales para el medio ambiente• Distribuida por todo el mundo• No tiene mayores costes una vez instalada, que el mantenimiento el cual es sencillo
Desventajas	<ul style="list-style-type: none">• Se precisan sistemas de acumulación (baterías) que contienen agentes químicos peligrosos.• Puede afectar a los ecosistemas por la extensión ocupada por los paneles en caso de grandes instalaciones• Impacto visual negativo en el entorno

Fuente: Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. Fernández salgado José María.

La radiación en el sol es $63.450.720 \text{ W/m}^2$. Si suponemos que el sol emite en todas direcciones y construimos una esfera que llegue hasta la atmosfera terrestre, es decir, que tenga un radio de la distancia de 149,6 millones de Km podremos determinar cuál es la radiación en este punto.

Este valor de radiación solar recibida fuera de la atmosfera sobre una superficie perpendicular a los rayos es conocido como **constante solar** (1.353 W/m^2), y varía $\pm 3\%$ durante el año por ser la órbita terrestre elíptica.⁶

Figura 2. Componentes de la radiación solar en la superficie.



Fuente: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1276pub.pdf>.

A partir de los fenómenos de reflexión, difusión y absorción, podemos deducir que la radiación que incide en la atmosfera no coincide con al disponible al nivel del mar, con lo que la constante solar anterior ya no es válida en la superficie de la tierra. En condiciones atmosféricas óptimas: día soleado de verano, cielo totalmente despejado, en una superficie de 1 m^2 perpendicular al sol, la luz solar plena registra un valor de 1000 W/m^2 .⁷

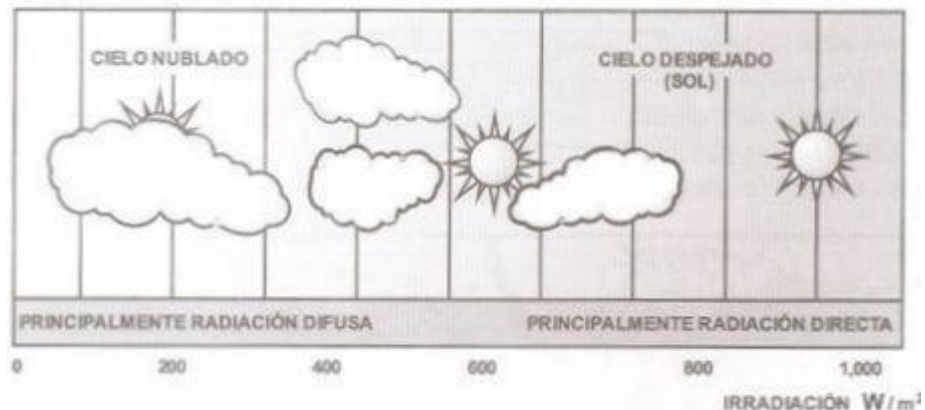
⁶ MENDEZ MUÑIZ, Javier María; CUERVO GARCIA, Rafael. Energía solar fotovoltaica. Madrid: Fundación Confemetal, 2007. P.29.

⁷ SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía solar fotovoltaica. México; Limusa, 2008. p. 17.

Según como llegue la luz solar a la superficie de la tierra, podemos clasificar la radiación en tres tipos diferentes:

- Directa: Es la recibida desde el sol sin que se desvíe en su paso por la atmosfera, en la misma dirección que la de la línea recta desde el disco solar.
- Difusa: Es la que sufre cambios en su dirección principalmente debidos a la reflexión y difusión en la atmosfera.
- Albedo: Es la radiación directa y difusa que se recibe reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie cercana.

Figura 3. Concepto de la radiación directa y difusa.



Fuente: Instalaciones y sistemas fotovoltaicos. Enríquez Harper.

Tabla 2. Parámetros de las proporciones de la radiación solar.

Proporciones de Radiación
<p>Las proporciones de radiación directa, difusa y albedo dependen de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Condiciones meteorológicas: En un día nublado la radiación es prácticamente difusa, mientras que en uno soleado es directa - Inclinación de la superficie respecto al plano horizontal: Una superficie horizontal recibe la máxima radiación difusa y la mínima reflejada - Presencia de superficies reflectantes: Las superficies claras son las más reflectantes por lo que la radiación reflejada aumenta en invierno por el efecto de la nieve

Fuente: Energía solar fotovoltaica. Méndez Muñoz Javier maría.

La tierra tiene dos tipos de movimientos. El de rotación y el de traslación alrededor del sol, siguiendo una trayectoria elíptica, que da lugar a las estaciones del año. Las condiciones óptimas de operación implican la presencia de luz solar plena y un panel orientado lo mejor posible hacia el sol, con el fin de aprovechar al máximo la luz directa. Para aprovechar al máximo esa radiación solar, la orientación de los paneles se hace hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur, es decir, siempre se instalan mirando al Ecuador.

La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es:

$$G_{on} = G_{sc} * \left(1 + 0.033 * \cos \frac{360 * n}{365} \right)$$

Donde:

- G_{on} es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación.
- G_{sc} es la constante solar fuera de la atmosfera que es $1.353 W / m^2$
- n es el número de día del año.

Tabla 3. Conversión día del mes, en el día del año.

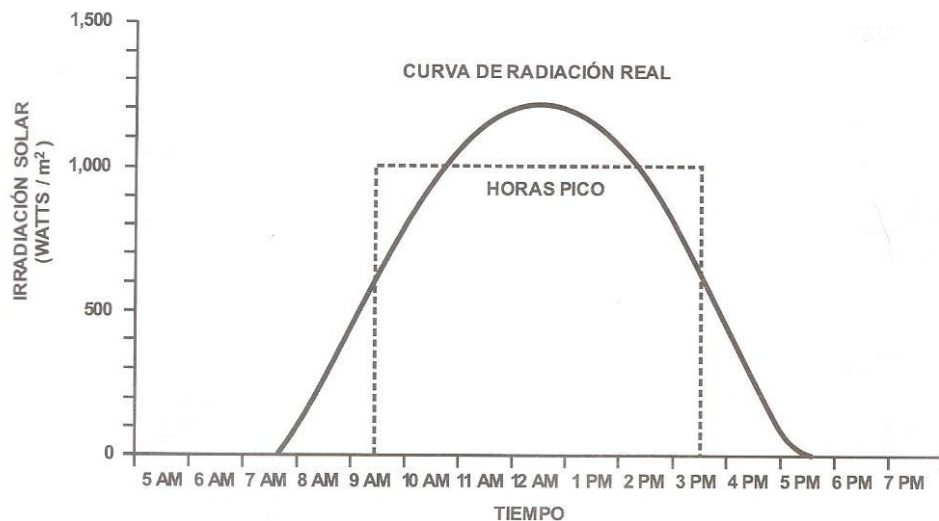
Mes	“n” para el i-ésimo Del mes	Mes	“n” para el i-ésimo Del mes
Enero	i	Julio	181 + i
Febrero	31 + i	Agosto	212 + i
Marzo	59 + i	Septiembre	243 + i
Abril	90 + i	Octubre	273 + i
Mayo	120 + i	Noviembre	304 + i
Junio	151 + i	diciembre	334 + i

Fuente: Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoelectrónica. Fernández salgado José María.

La insolación, parámetro clave en el diseño de sistemas solares, también es distinta según la estación del año: el sol no se encuentra a la misma altura sobre el horizonte en invierno que en verano, lo que significa que la inclinación de los paneles no debería ser fija si se quiere que en todo momento estén orientados perpendicularmente al sol. Idealmente, en verano los paneles deberían ser colocados en posición ligeramente más horizontal.

Las horas pico solar es un parámetro fundamental para el dimensionado de los sistemas fotovoltaicos. Corresponde al número de horas en las que cada metro cuadrado de superficie captadora obtiene de modo constante 1000 W de energía. La energía producida por los sistemas fotovoltaicos es el resultado de multiplicar su potencia nominal por el número de horas pico ($1000 \text{ W} / \text{m}^2$). El número de horas pico de un día concreto se obtendrá dividiendo toda la energía producida en ese día entre $1000 \text{ W} / \text{m}^2$.⁸

Figura 4. Irradiación solar recibida sobre terreno plano en una región ecuatorial.



Fuente: Instalaciones y sistemas fotovoltaicos. Enríquez Harper.

⁸ SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Op. Cit., p. 25.

4.3 RADIACION SOLAR EN COLOMBIA

La radiación solar es de suma importancia para Colombia, específicamente para la costa atlántica y la guajira debido a que el territorio nacional tiene un promedio de 4.5 [KWh/m²] lo cual habilita a este país como zona adecuada y favorable para el uso de la energía solar. Esto debido a su posición geofísica ecuatorial.⁹

Lo anterior confirma que Colombia es un territorio apropiado para la producción de electricidad mediante el aprovechamiento de esta energía por medio de la aplicación de paneles fotovoltaicos.

El Atlas de Radiación Solar brinda información que cuantifica la energía que incide sobre la superficie del país. Para el caso de las zonas apartadas de las redes nacionales de energía, esta información es necesaria para el dimensionamiento de sistemas o aplicaciones tecnológicas que a partir de esta, permiten el abastecimiento de energía eléctrica con el fin de satisfacer diversos requerimientos como iluminación, comunicaciones, bombeo de agua, señalización o sistemas solares térmicos para el suministro de calor en calentamiento de agua o aire, entre otras aplicaciones.

Tabla 4. Disponibilidad promedio de energía solar por regiones Colombianas.

REGION	KWh/m ² /año
Guajira	2.190
Costa Atlántica	1.825
Orinoquia	1.643
Amazonas	1.551
Andina	1.643

Fuente: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21129/.../2a207e33-fe43-4aa3-930d-70ba60b10d57>

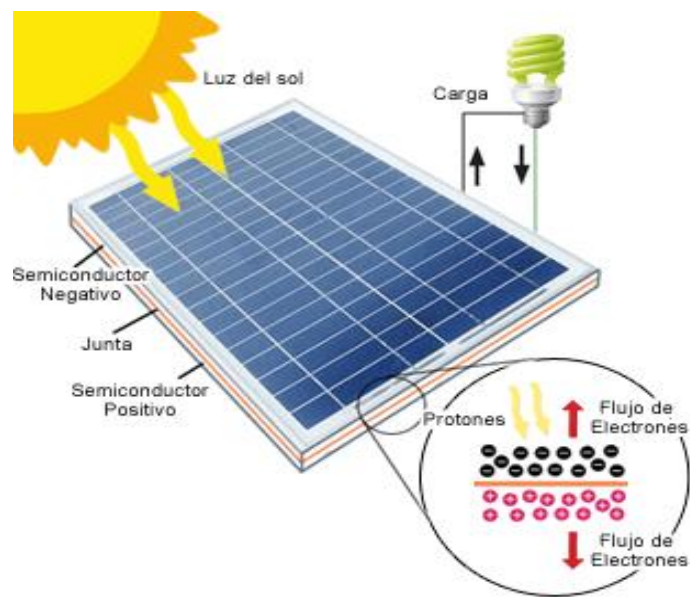
⁹ UPME, ATLAS DE RADIACION SOLAR DE COLOMBIA *copyright*. 2005, p. 175.

4.4 GENERALIDADES DE LA ENERGIA FOTOVOLTAICA

4.4.1 El Efecto Fotoeléctrico Es la aparición de una corriente eléctrica en ciertos materiales cuando estos se ven iluminados por radiación electromagnética, sin que sea necesario que intervenga ningún efecto mecánico o físico. Consigue su proceso con algunos materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Cuando los electrones libres son capturados, se produce una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

Hay que crear en el interior del semiconductor un campo eléctrico. Para crear este campo eléctrico se unen dos regiones de silicio (material más utilizado en la fabricación de células solares, que tienen cuatro electrones de valencia) tratadas químicamente (**unión p – n**).¹⁰

Figura 5. Efecto fotoeléctrico de un panel debido a la radiación solar.



Fuente: https://www.damiasolar.com/productos/placas_solares/placa-solar-rdm-130w-policristalina_da0060_15

¹⁰ MENDEZ MUNIZ, Javier María. Op. Cit., p.61

4.4.2 Tipos de Células Fotovoltaicas El silicio es el elemento más abundante después del oxígeno y se encuentra en casi todas las rocas, sin embargo, hasta llegar a su forma cristalina sin imperfecciones o, al menos, con pocas, debe someterse a costosos procesos.

Tabla 5. Características de los tipos de células fotovoltaicas.

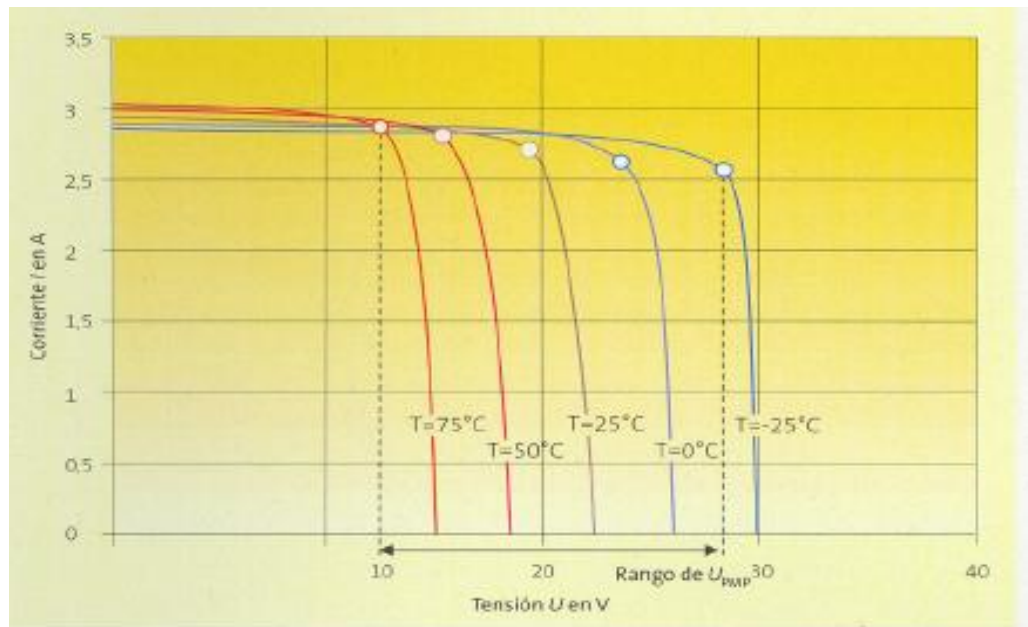
Células de Silicio	
Monocristalino	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta una estructura completamente ordenada. • Su comportamiento uniforme lo hace buen conductor. • Es de difícil fabricación. • Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro. • Se reconoce por su monocromía azulada oscura y metálica. • Su rendimiento oscila entre 15 – 20 %
Policristalino	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta una estructura ordenada por regiones separadas. • Los enlaces irregulares de las fronteras cristalinas disminuyen el rendimiento de la célula. • Se obtiene de igual forma que la de silicio monocristalino pero con menos fases de cristalización. • Su superficie está estructurada en cristales con distintos tonos de azules y grises metálicos. • Tienen una menor tolerancia al calor que los monocristalinos. • Su rendimiento oscila entre 12 – 14 %
Amorfo	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta un alto grado de desorden. • Contiene un gran número de defectos estructurales y de enlaces. • Su proceso de fabricación es más simple que los anteriores y menos costoso. • Se deposita en forma de lámina delgada sobre vidrio o plástico. • Son eficientes bajo iluminación artificial. • Tiene un color marrón homogéneo. • Su rendimiento es menor del 10%

Fuente: Energía solar fotovoltaica. Méndez Muñoz Javier maría; Cuervo García Rafael

4.4.3 Curvas Características de funcionamiento de una celda FV.

- Manteniendo la radiación constante y variando la temperatura: Se observa que la tensión se va haciendo cada vez más pequeña a medida que va aumentando la temperatura, mientras que la corriente permanece prácticamente constante.¹¹

Figura 6. Variación de las características de la curva I-V según la temperatura.



Fuente: Fuente: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1276pub.pdf>.

El aumento de temperatura en las células fotovoltaicas supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. Esto implica que tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje a circuito abierto se ven afectados por la temperatura de trabajo, aunque el tipo de variación así como su magnitud porcentual son distintos para estos dos parámetros.

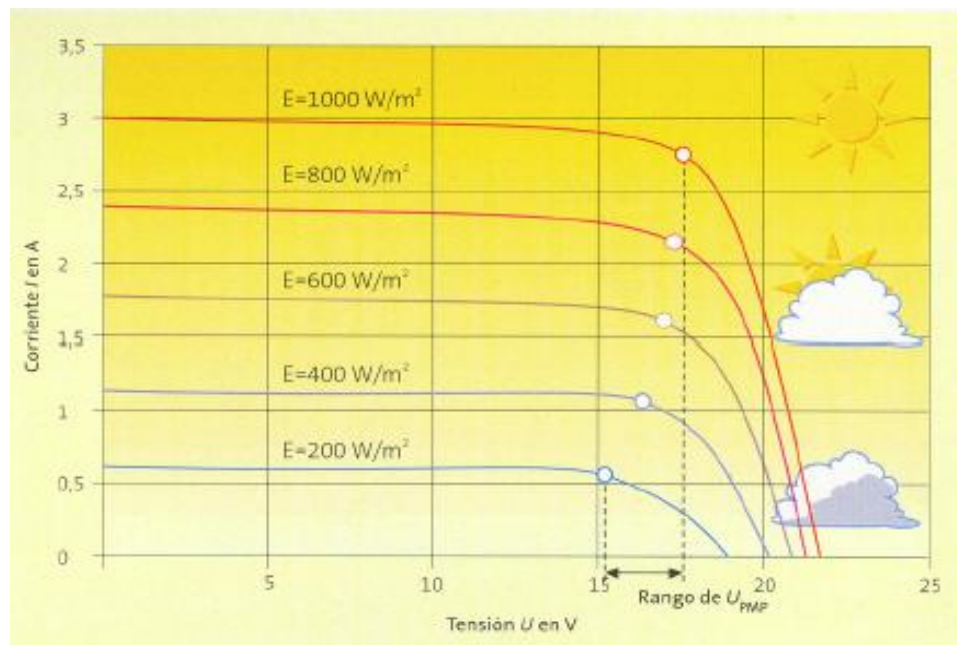
¹¹ MENDEZ MUNIZ, Javier María. Op. Cit., p. 92.

El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo. Por ello es importante colocar los paneles en un lugar en el que estén bien aireados.¹²

En la práctica, debido a la disipación de calor dentro de las células del panel, salvo en climas muy fríos, la temperatura de trabajo va a exceder siempre los 25 °C. Cuando ello ocurre, la potencia de salida nunca alcanza el valor pico especificado por el fabricante. El diseño de un sistema fotovoltaico debe tener en cuenta un coeficiente de degradación del panel, a fin de asegurar que los requerimientos eléctricos del sistema pueden ser satisfechos durante los días más caluroso del verano.

- Manteniendo constante la temperatura y variando la radiación: Se observa que la corriente se va haciendo más pequeña a medida que disminuye la radiación, mientras que la tensión casi no sufre variaciones.

Figura 7. Variación de las características de la curva I-V según la irradiancia.



Fuente: Fuente: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1276pub.pdf>

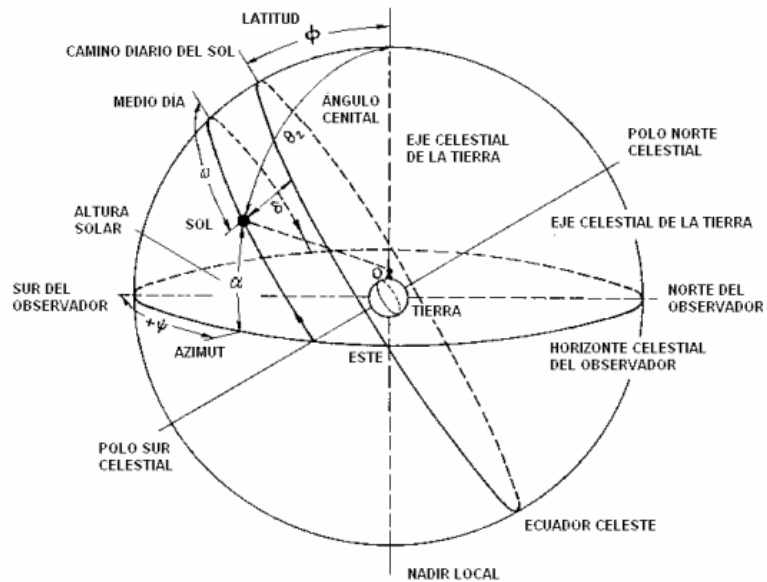
¹² FERNANDEZ SALGADO. Op. Cit., p. 292.

Tabla 6. Componentes generales que se requieren en un sistema fotovoltaico.

Componente	Descripción
Generador fotovoltaico	Encargado de captar y convertir la radiación solar en corriente eléctrica mediante módulos fotovoltaicos.
Baterías o acumulador	Almacenan la energía eléctrica producida para poder usarla en periodos en los que la demanda exceda la capacidad de producción del generador fotovoltaico.
Regulador de carga	Protege y garantizar el correcto mantenimiento de la carga de la batería controlándola y evitando que se produzca sobrecargas o descargas excesivas.
Inversor o acondicionador	Transforma la corriente continua producida por el generador en corriente alterna, necesaria para alimentar algunas cargas como electrodomésticos o para introducir la energía producida en la red de distribución eléctrica.
Elementos de protección del circuito	Como interruptores de desconexión, diodos de bloqueo, etc., dispuestos entre diferentes elementos del sistema, para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o situaciones de sobrecarga.

4.6 GEOMETRIA Y MOVIMIENTO SOLAR

Figura 8. Trayectoria y posición aparente del sol desde un observador.

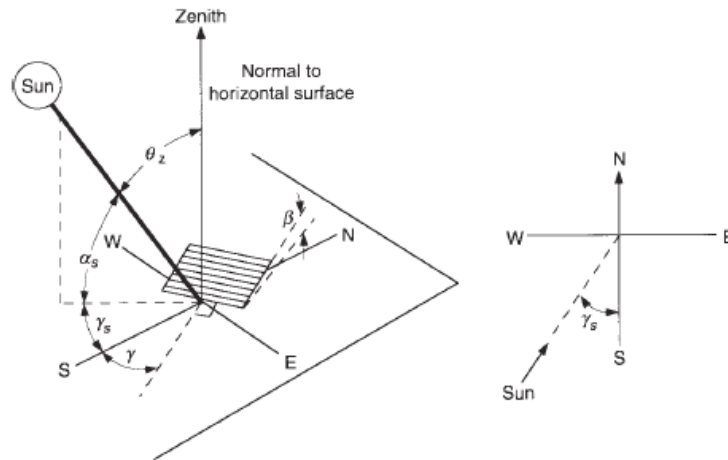


Fuente: <http://tdx.cat/bitstream/handle/10803/6839/10Nvm10de17.pdf?sequence=11>

El conocimiento de la geometría solar nos permite aprovechar los efectos beneficiosos de esta energía proveniente del sol o bien protegernos de esta en los climas y momentos que lo requieran. Es de destacar que estos beneficios no se agotan en los aspectos funcionales de su aporte de luz y calor. Por el contrario, la historia de la cultura nos muestra innumerables ejemplos del uso del sol como valor expresivo y aun ceremonial.

También sabemos que el recorrido del sol en nuestro cielo varía a lo largo del año, modificándose en el lugar en que nace y se pone. La duración de su permanencia sobre el horizonte y la altura de culminación que alcanza, siendo estos dos últimos, mayores en verano que en invierno dado que los movimientos de la tierra y el sol son relativos entre sí.

Figura 9. Ángulos Solares.



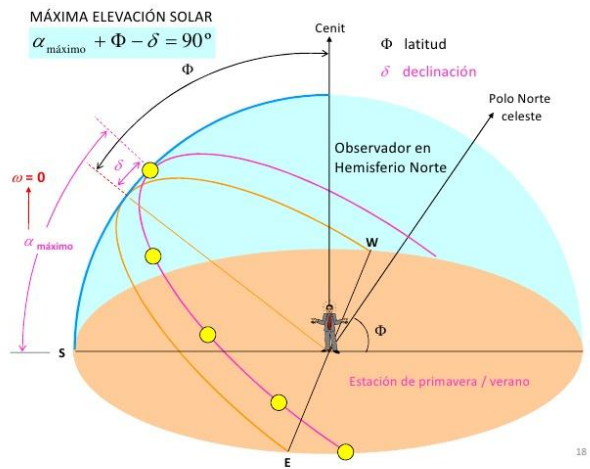
Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes. Duffie Jhon A, Beckman William.

Tabla 7. Descripción de los ángulos solares.

Variable	Símbolo	Descripción
Azimut de la superficie	γ	Desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local. Perfilado hacia el sur. Negativo hacia el este y positivo al oeste.
Angulo horario	ω	Desplazamiento angular con el sur medido de este a oeste del sol. 15° cada hora (negativo en la mañana, positivo en la tarde) $\omega = 0$ al medio día
Angulo incidencia	θ	Angulo entre el haz de radiación y la normal de la superficie
Zenit	θ_z	Angulo entre la vertical (terrestre) y el haz de la radiación solar.
Altura solar	α_s	Angulo entre la superficie terrestre y el haz de radiación solar (complementario del ángulo zenital)
Azimut solar	γ_s	Angulo entre la proyección horizontal del haz solar, con el meridiano del lugar (dirección norte – sur) origen en el sur.

Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes. Duffie Jhon A, Beckman William.

Figura 10. Elevación y hora solar.



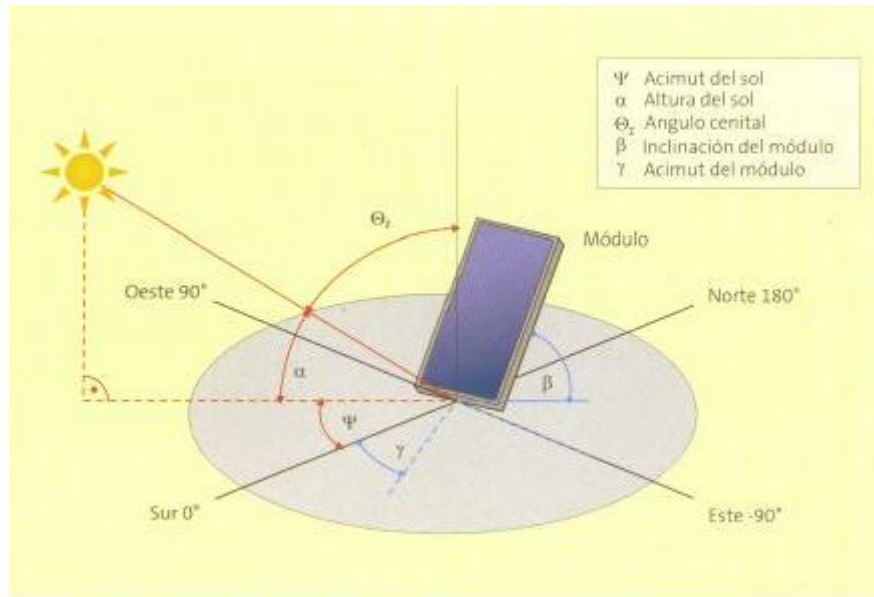
Fuente: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1276pub.pdf>

Angulo de declinación (δ). La declinación define la posición angular del sol al medio día solar, es decir, en el momento en que el sol está más alto en el firmamento con respecto al plano ecuatorial. Norte positivo. $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$
 La declinación es un índice del alejamiento que experimenta el sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador. Este parámetro depende del día y del año, y puede calcularse con la expresión:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) ; \text{ Donde } n \text{ es el numero del día del año}$$

La posición del Sol en cada instante respecto a una posición o punto de observación en la superficie terrestre viene definida por 2 coordenadas: altura solar y azimut solar.

Figura 11. Ubicación de un panel bajo la geometría solar.



Fuente: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1276pub.pdf>

Habiendo definido el concepto de estos ángulos, las ecuaciones que determinan su valor son:

$$\text{Altura solar } (\alpha_s) = 90^\circ - \theta_z$$

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \text{sen}(\phi) * \text{sen}(\delta)$$

Donde:

ϕ = es la latitud del lugar, positivo en el hemisferio norte. $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

$$\text{Azimut solar } (\gamma_s) = \text{signo de } \omega (\pm) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos\theta_z * \text{sen}\phi - \text{sen}\delta}{\text{sen}\theta_z * \cos\phi} \right) \right|$$

4.7 SOPORTES Y SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR

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

El diseño de la estructura se realizara para la orientación y el ángulo de inclinación especificado para el generador fotovoltaico y teniendo en cuenta la facilidad de montaje y desmontaje, como también la posible necesidad de sustituciones de elementos.¹³

Los módulos se encuentran ubicados de modo óptimo de cara a maximizar la generación de energía eléctrica a lo largo de todo el año, en lo que refiere a orientación, inclinación y ausencia de sombras, en el caso de estructuras fijas.

Los módulos se soportan sobre un elemento móvil de manera que en cada momento se sitúan en la posición óptima para que la irradiación recibida sea máxima, en el caso de estructuras móviles.

El bastidor que sujeta el panel, la estructura soporte del mismo, y el sistema de sujeción son tan importantes como el propio panel, pues un fallo de estos elementos conlleva a la inmediata paralización de la instalación.¹⁴

Para elegir el más adecuado debe tenerse en cuenta el costo máximo para el sistema y el incremento porcentual de energía que se obtendría usando algunos de los otros tipos.

Existen tres tipos:

- **Estructuras Fijas:** Son los más robustos y flexibles del mercado. Permiten adaptarse a cualquier tipo de terreno con desniveles superiores al 5%.
- **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 a dos Ejes:** Los seguidores a dos ejes permiten incrementar aproximadamente la eficiencia hasta un 35% la producción de energía eléctrica de los paneles solares fotovoltaicos.

¹³ FERNANDEZ SALGADO. Op. Cit., p. 298.

¹⁴ SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Op. Cit., p. 104.

4.7.1 Soportes Fijos

Figura 12. Conjunto soporte fijo de paneles fotovoltaicos.



Fuente: <http://www.archiexpo.es/prod/pespa-alumin/product-62511-1264497.html>

Puede optarse por ubicar los paneles en una estructura fija, con orientación e inclinación óptima. Son usados en lugares donde la latitud permite elegir un ángulo de inclinación fijo (latitud más 15°) cuyo valor incrementa las horas de generación durante invierno, cuando el consumo nocturno aumenta, y disminuye la eficiencia de la insolación durante verano, cuando los días son más largos.

Como lo mencionamos en el apartado sobre la radiación solar y su máximo aprovechamiento, la orientación de los paneles se hace hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur, es decir, siempre se instalaran mirando al Ecuador.

4.7.2 Soportes de uno y dos grados de libertad Básicamente existen cinco tipos de seguimiento: en dos ejes, un eje Norte-Sur horizontal, un eje Norte – Sur inclinado, un eje Este – oeste horizontal y un eje acimutal. La elección de un determinado sistema de seguimiento se realizaría según las necesidades en función de los costes, precisión, etc.¹⁵

¹⁵ FERNANDEZ SALGADO. Op. Cit., p. 399.

- a) Podemos disponer de un sistema que, con la inclinación óptima gire en un eje para seguir el movimiento del sol desde el amanecer hasta el ocaso, en este caso tendremos un sistema polar en un eje.
- b) Podemos disponer de un sistema que, con la orientación óptima (dirección sur), haga variar la inclinación del panel para que los rayos solares incida cada día de modo perpendicular a la superficie. En ese caso tendremos un sistema de seguimiento acimutal en un eje.
- c) Podremos disponer de un sistema que busque en cada momento la inclinación y orientación sea la que maximice la irradiación, haciendo que la superficie de los paneles se encuentre siempre perpendicular a los rayos solares. En ese caso, se trata de un sistema de seguimiento de dos ejes.¹⁶

Figura 13. Soporte de un seguidor con un grado de libertad.



Fuente: <http://www.revistavivienda.com.ar/actualidad/noticias/planta-de-energia-solar-en-catamarca>

A diferencia de los modelos de soportes fijos, generalmente, estos utilizan motores eléctricos, que están comandados por una unidad de control que actúa respondiendo a la información recogida por el correspondiente sensor. Para llevar

¹⁶ FERNANDEZ SALGADO. Op. Cit., p. 299.

a cabo el movimiento toman un mínimo de energía, ya sea del banco de baterías, o de los paneles, según el modelo usado.¹⁷

Con un sistema de seguimiento de dos ejes se puede conseguir del orden de un 40% más de producción eléctrica que un sistema convencional estático. Dependiendo de las condiciones particulares de la ubicación.¹⁸

Figura 14 Soporte de un seguidor con dos grado de libertad.



Fuente: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1276pub.pdf>

La incorporación de un seguidor, independientemente del tipo que se use, solo se justifica si existe la posibilidad de incrementar sustancialmente (10% a 25%) el valor de energía a generar, que usando soportes más económicos y convencionales.

Si un sistema necesita incrementar el valor de la energía a generar adicionando paneles fotovoltaicos, deberá tenerse en cuenta que este costo puede aplicarse a la adquisición de un seguidor automático.¹⁹

¹⁷ SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Op. Cit., p. 111.

¹⁸ FERNANDEZ SALGADO. Op. Cit., p. 299.

¹⁹ SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Op. Cit., p. 111.

5. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

5.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

5.1.1 Alternativa N° 1. Esta alternativa consiste en un mecanismo seguidor de luz ligero y automatizado que consta de un soporte vertical el cual tendrá un movimiento azimutal y el soporte del panel para la altura solar actuados por servomotores que serán controlados mediante un Arduino MEGA y fotorresistencias como sensores de luminosidad para posicionar el panel en su máxima radiación solar.

El sistema de control mediante un algoritmo de seguimiento (Tracking Solar) proporcionara las coordenadas necesarias para obtener la mayor eficiencia del panel durante el día y si el ordenador lo desea emita una señal de posicionamiento a un sistema de intervención para que este reposicione un conjunto de paneles solares para obtener una mejor incidencia de radiación solar.

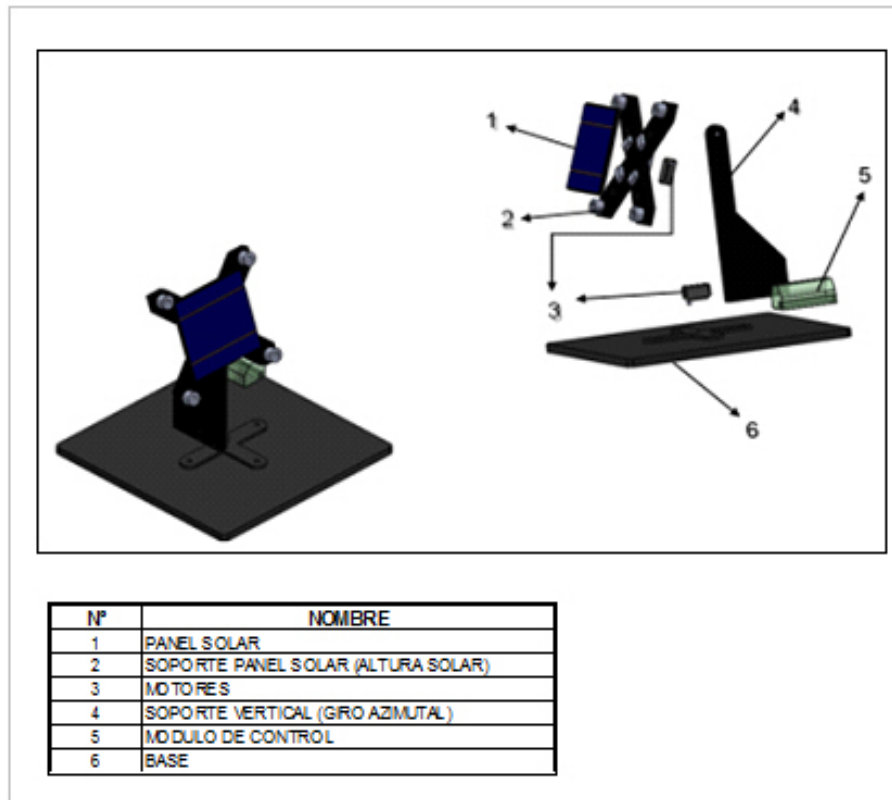
Ventajas:

- Materiales económicos y comerciales.
- Fácil de utilizar, ya que su funcionamiento será completamente automatizado.
- Buena eficiencia energética por la buena precisión de los servomotores y su respectivo control.
- Sistema ligero, seguro y fácil de mantener.
- Ahorro de energía al posicionar otros paneles.

Desventajas:

- La vida útil del robot es corta, se requiere un sistema de movimiento más complejo para utilizarlo de manera Industrial.
- Perdida de energía eléctrica si el terreno es muy inestable.
- No está diseñado para días con precipitaciones altas.

Figura 15. Diseño N°1.



5.1.2 Alternativa N° 2. Observamos en este diseño que los engranajes son los encargados de los movimientos de inclinación y de azimut, lo cual permite siempre posicionar el panel solar de manera óptima y por medio de un sistema de control electrónico, detectara una diferencia fotovoltaica en la cual es traducida a movimientos de los motores que regulan la posición del seguidor solar.

Cuando la intensidad solar captada por ambos sensores sea prácticamente igual, los motores se detendrán y el seguidor solar quedará posicionado de tal forma que el sol incidirá perpendicularmente sobre ellos.

Ventajas:

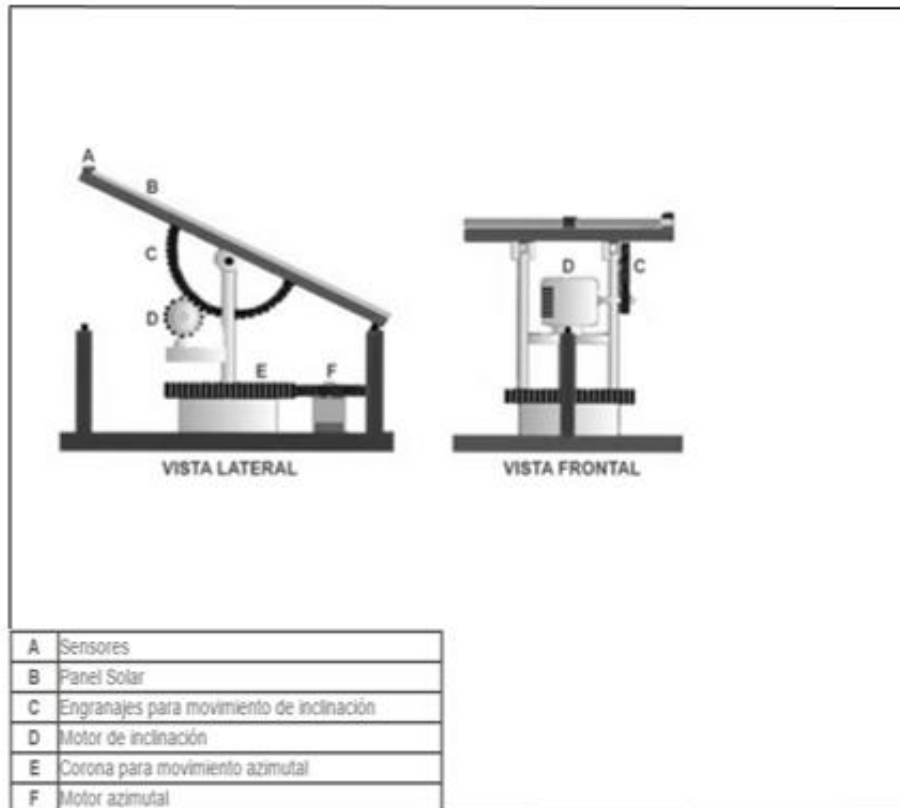
- Buena precisión de posicionamiento por el sistema de engranajes.
- Mejor eficiencia mecánica para el movimiento de paneles pesados.

Desventajas:

- Elevados costos de fabricación.

- Muy pesado y poca flexibilidad.
- Necesita lubricación constante lo cual implica mantenimiento frecuente.
- Mayor grado de complejidad.

Figura 16. Diseño N°2.



Fuente:http://www.energizar.org.ar/energizar_desarrollo_tecnologico_seguidor_solar_como_funciona.html

5.1.3 Alternativa N° 3. Seguidor solar que comprende un pedestal sobre el que se fija un soporte estructural de un panel solar y que contiene:

Una base anclada al suelo, un elemento mecánico giratorio de eje vertical fijado al pedestal, un cilindro accionador de giro azimutal del soporte estructural que comprende un primer extremo sujeto al suelo por medio de un anclaje y un segundo extremo fijado al elemento mecánico giratorio de tal manera que cuando el cilindro accionador ejecute su movimiento el elemento mecánico giratorio

transmita el movimiento de rotación del segundo extremo del cilindro accionado al pedestal.

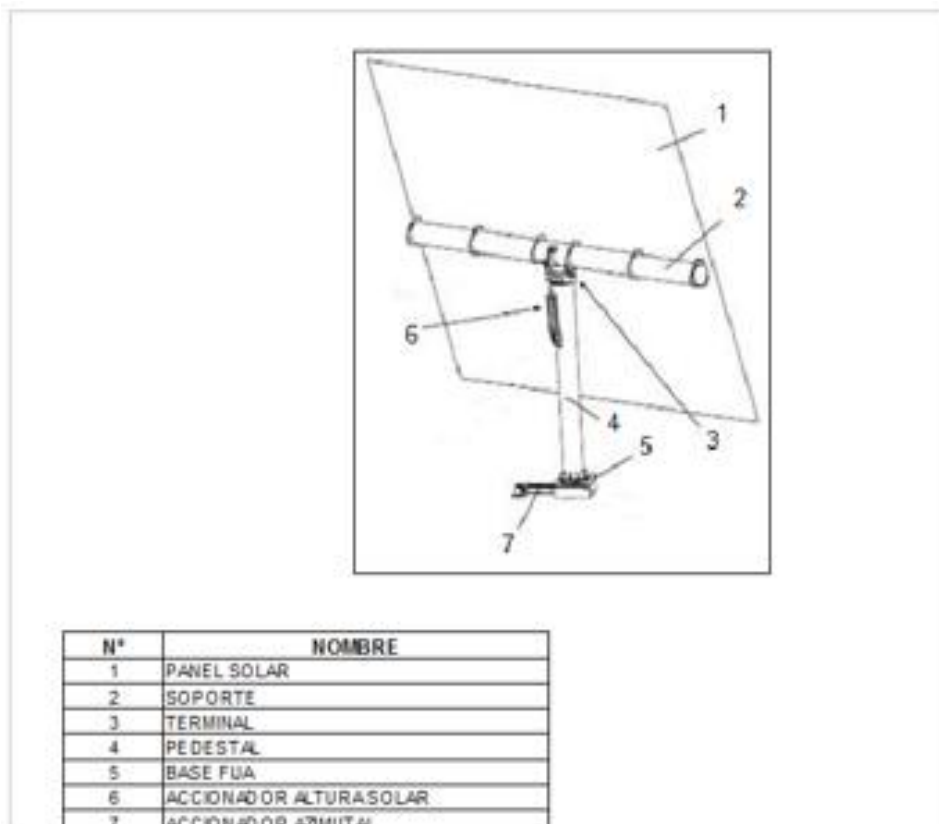
Ventajas:

- Su montaje en pedestal requiere poco espacio y proporciona una forma fácil de movimiento sin obstáculos.
- vida útil larga

Desventajas:

- Los dos cilindros accionadores requieren de instalaciones especiales.
- Difícil mantenimiento.
- El montaje genera elevados costos.

Figura 17. Diseño N°3.



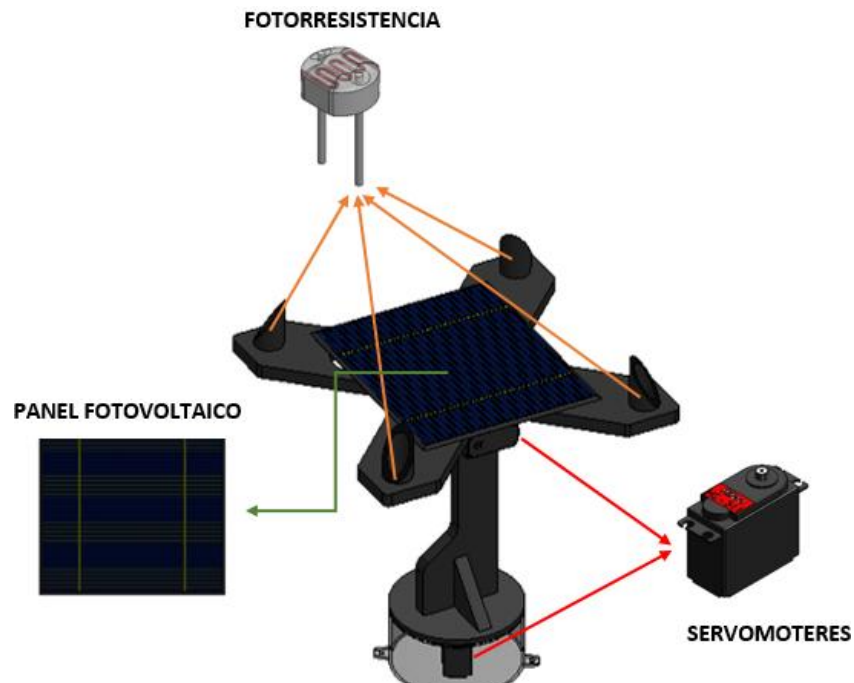
Fuente: Patente de invención. CORNAGO RAMIREZ, Emiliano; CERON GARCIA, Francisco. Numero de solicitud P201130263

5.2 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Para tomar una decisión final se hizo un estudio en el cual se evaluó las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas y se llegó a la conclusión de que la alternativa N°1 es la mejor opción la cual abarca nuestras necesidades para el desarrollo de este proyecto, además de ser la más económica.

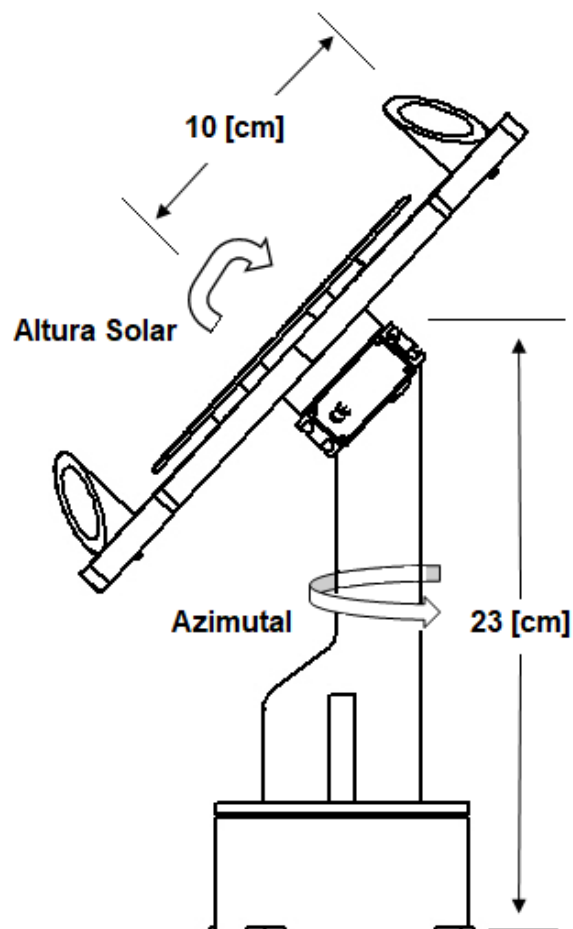
El robot seguidor de luz con dos grados de libertad constara de dos servomotores y un panel fotovoltaico que aprovechara la energía solar para autoabastecerse. A través de un Arduino Mega como controlador, se ubicara mediante un escaneo en donde encontrara la mayor incidencia del sol por medio de fotorresistencias y enviara los datos de su ubicación final para posicionar un segundo panel; de esta forma haremos un seguimiento al sol, y tendremos la mayor captura de energía solar en lo posible. El escaneo se realizará cada treinta minutos para ahorrar energía consumida por el movimiento de los servomotores

Figura 18. Componentes Básicos.



5.2.1 Parámetros geométricos. Para optimizar el espacio de trabajo del robot en su tarea a realizar se delibero que era necesario y suficiente tener dos grados de libertad ya que nuestro interés se basa fundamentalmente en el giro alrededor de un eje vertical (azimutal) y su rotación en un eje horizontal (altura solar) ambos de 0° a 180° . Con un pedestal de altura 23 cm y un radio de rotación de 10 cm respectivamente.

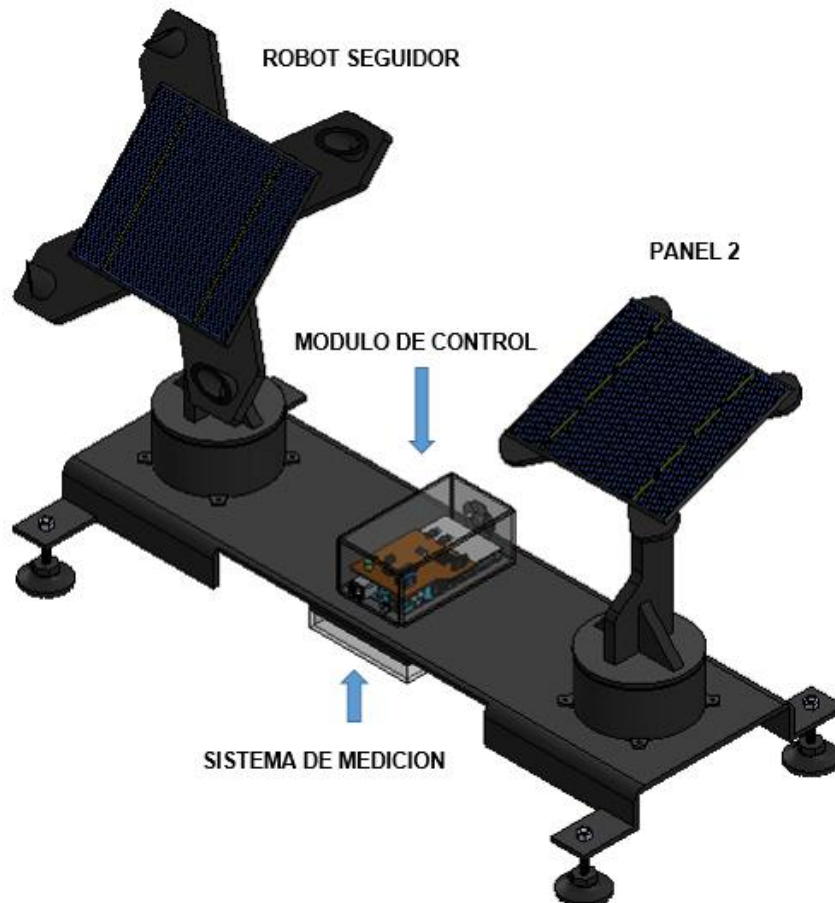
Figura 19. Geometría del Robot.



6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECANICO, ELECTRICO, ELECTRONICO Y DE CONTROL

En base a las especificaciones ya mencionadas en la descripción de la alternativa, el robot seguidor obtendrá la posición óptima de incidencia solar mediante el algoritmo de seguimiento por fotorresistencias para poder posicionar correctamente el panel 2. Posteriormente con el sistema de medición obtener el voltaje y la corriente de operación de cada panel para hacer una respectiva comparación de la potencia y energía de captación con y sin el modo de seguimiento solar.

Figura 20. Diseño General.



El diseño y construcción del sistema en general estará compuesto por:

- El conjunto mecánico que es cada uno de los elementos físicos del sistema, es decir, cada una de las partes tangibles que en un conjunto le permiten la estabilidad y en su momento el movimiento apropiado de sus componentes.
- La unidad eléctrica y electrónica que constituye los servomotores, paneles, batería, fotorresistencias, el circuito del sistema de medición y del módulo de control.
- El módulo de control conllevara el algoritmo de seguimiento solar y la comunicación Arduino-LabVIEW.

Dado que las características principales del robot tienen que ser de alta estabilidad, buena movilidad y gran ligereza escogimos materiales de baja densidad como lo es el acrílico y plástico, ya que son maleables y soportan los cambios climáticos. Los cuales tienen las siguientes características:

Tabla 8. Propiedades de los materiales

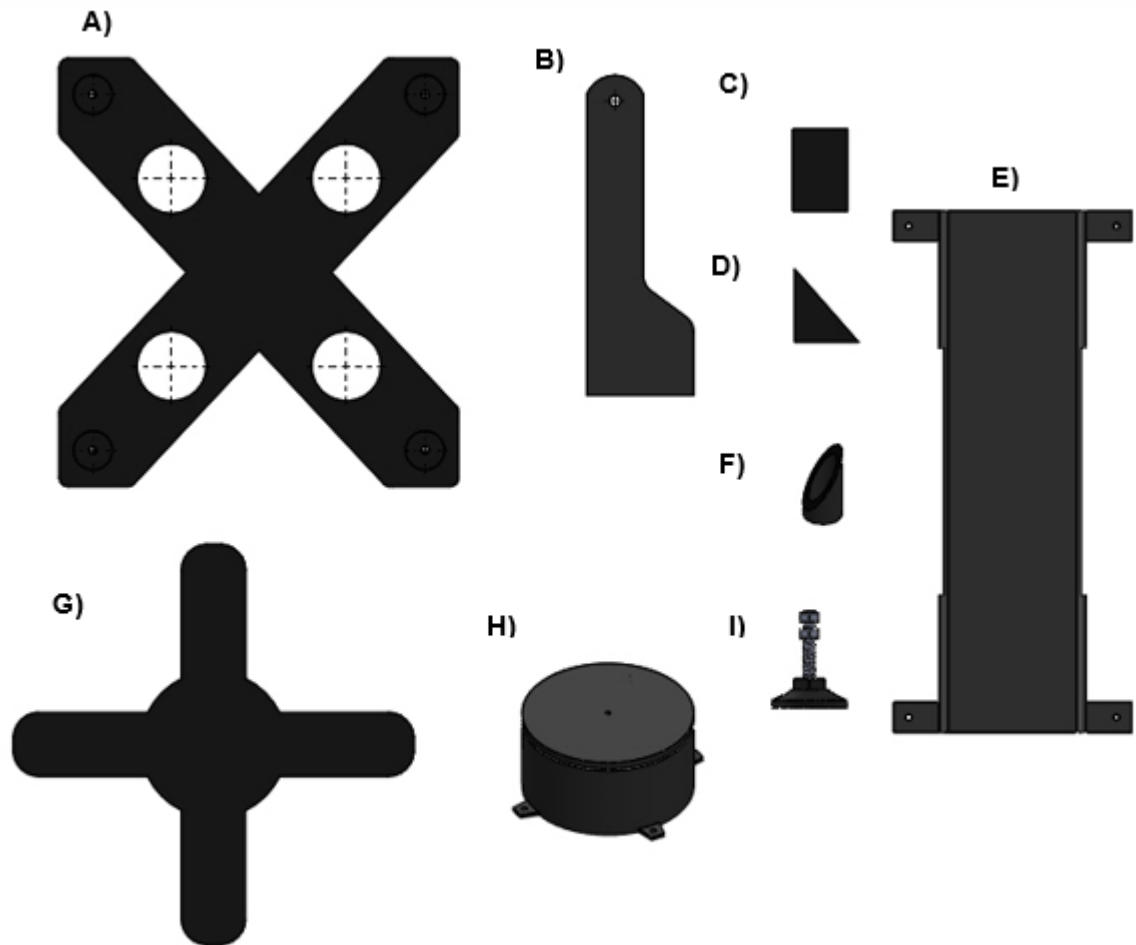
MATERIAL	DENSIDAD [g/cm ³]	MÓDULO ELÁSTICO EN TRACCIÓN [GPa]	CARGA DE ROTURA A LA TRACCIÓN [MPa]	DUREZA ROCKWELL
POLIPROPILENO	0,95	1,1 a 1,6	31 a 42	M50- M100
ACRILICO	1,18	2,2 a 3	48 a 76	M80 - M100

6.1 CONJUNTO MECANICO

6.1.1 Diseño CAD

6.1.1.1 Componentes del robot En lo que se refiere a la estructura mecánica del sistema, se emplea el software SolidWorks 2016, principalmente para la elaboración del diseño y el análisis de fuerzas críticas. Para ello se realiza el diseño de cada una de las partes de forma independiente con los requerimientos mencionados y la geometría del robot además de las dimensiones del panel fotovoltaico y del peso de los materiales que deben soportar los servomotores.

Figura 21. Despiece de componentes.



A) Soporte panel robot, B) Soporte vertical, C) Apoyo servo D) Pie de amigo, E) Base estructura, F) Buje, G) Soporte panel 2, H) Base servo, I) Pata niveladora

Descripción de los componentes:

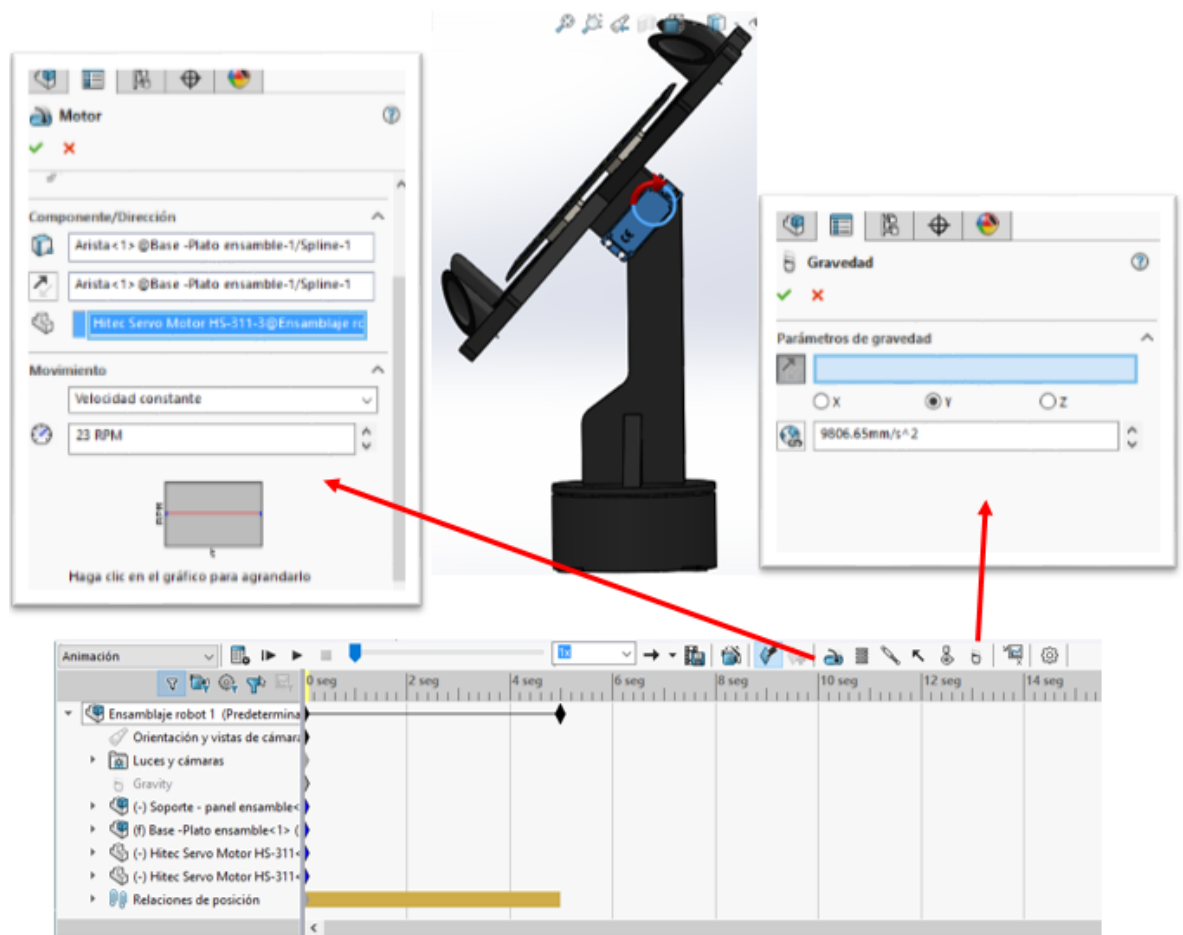
A) Soporte panel robot: Esta estructura de acrílico en forma de estrella será la encargada de sostener el panel mediante unas espumas como elemento de unión. Este soporte contiene cuatro perforaciones de 21 mm y 4 mm de diámetro en donde ira ubicado un buje en cada perforación respectivamente (Figura 21 F) y las cuatro fotorresistencias.

- B) Soporte vertical: Tiene como funcionalidad principal darle altura al panel solar para su libre movimiento y aguantar el peso del mismo con su respectivo soporte. Esta pieza debe tener una buena estabilidad por eso su forma en L que le permite una mayor área de ajuste, además de tener dos pie de amigos ensamblados como ayuda de soporte y acople a la base servo. Material acrílico.
- C) Apoyo servo: La siguiente pieza de acrílico en forma cuadrada será el elemento de sujeción entre el servo superior y el soporte panel.
- D) Pie de amigo: Este pequeño elemento ira en la parte inferior del soporte vertical también en acrílico, con el fin darle una mejor estabilidad al sistema y transmitir esfuerzos a la base servo.
- E) Base estructura: Base echa en lámina de acero A36 calibre 3/16" de 57 x16 cm con perforaciones de 2mm de diámetro en sus esquinas para la sujeción de las dos bases servo.
- F) Buje: Cilindro en plástico de 4mm de espesor por 4 cm de alto recortado a 45° que le permite enfocar la luz de incidencia a las fotorresistencias y tener una mayor precisión.
- G) Soporte Panel: Este a diferencia del soporte panel robot no cuenta con ninguna perforación puesto que no necesita fotorresistencias para la ubicación del panel ya que el robot seguidor se las ofrecerá.
- H) Base servo: Soporte giratorio hecho de plástico que sostiene en su parte interna un servomotor permitiéndole un libre movimiento eliminando toda carga axial directa al servomotor.
- I) Pata Niveladora: apoyos que permiten que el sistema esté completamente nivelado y poder tener una buena referencia en la toma datos.

6.1.1.2 Selección de servomotor. Una vez realizado el ensamble de las partes en SolidWorks, se procedió a la simulación para calcular el torque requerido del movimiento de los servomotores. Ya que el recorrido de altura solar del panel es el más crítico, por tanto los datos obtenidos serán a partir de este.

Para ello se emplea la herramienta SolidWorks Motion la cual calcula el torque necesario para realizar el movimiento deseado, con base en los parámetros de: la velocidad (rpm), el tiempo de simulación (seg) y el lugar donde se aplicara la fuerza para que el motor realice el movimiento del panel fotovoltaico. A fin de obtener resultados de simulación adecuados se configuro el software de la siguiente manera.

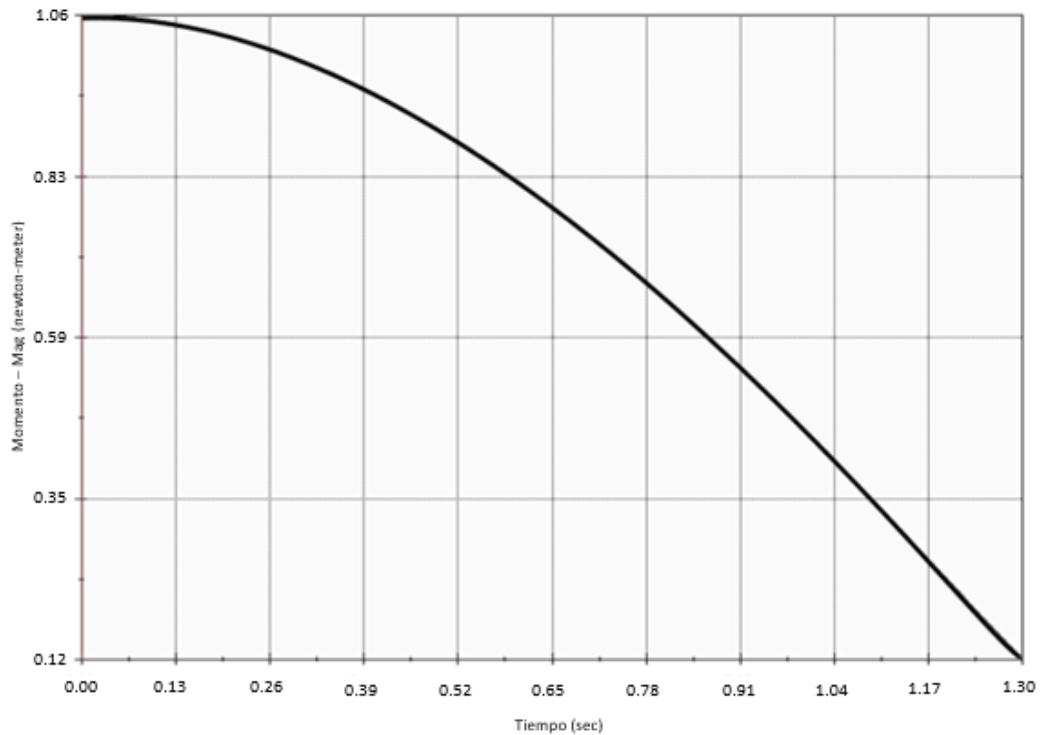
Figura 22. Configuración del servomotor.



Como observamos en las características del servomotor colocamos una velocidad angular de operación aproximada de $1.3\text{seg}/180^\circ$ lo cual equivale 23 RPM que introduciremos en las condiciones de operación.

Después de configurar los parámetros necesarios se procede a simular el movimiento y los datos que se obtienen son los presentados en la siguiente grafica en donde se puede apreciar el torque necesario en unidades de N-m.

Figura 23. Torque vs Tiempo Servomotor.

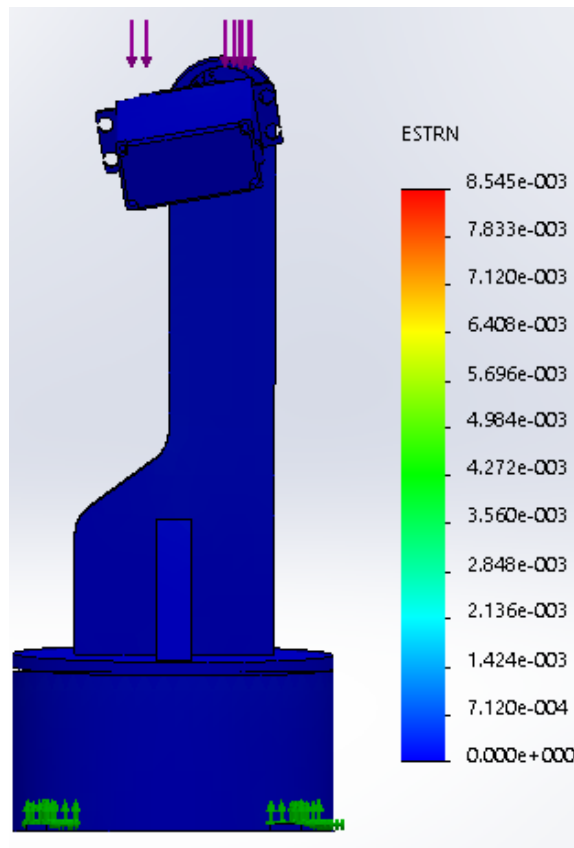


Con base a los resultados se selecciono el servomotor necesario para producir el movimiento deseado el cual es el Hitec 311 que tiene torque de 3.02 kg-cm muy por encima del obtenido el cual es 1.06 kg-cm.

6.1.1.3 Análisis de esfuerzos. Para estudiar las partes críticas del robot seguidor tomamos como punto referencia cuando el panel está totalmente perpendicular con respecto al soporte vertical ya que es el instante clave donde se presentan la mayor fuerza calculada. Esta fuerza es obtenida mediante la suma del peso respectivo de cada componente, utilizando como herramienta de trabajo SolidWork especificamos el tipo de material y así obtener su peso aproximado.

Ya habiendo calculado el peso total el cual nos dio 4.39 newton, posteriormente se procede introducir los parámetros en SolidWork Simulation definiendo las partes fijas del robot seguidor que en nuestro caso son las cuatro puntas de la base servo, luego crear una malla de elementos finitos para dar una solución correcta al programa y poderlo ejecutar.

Figura 24. Análisis de Deformación (Escala 14:1).

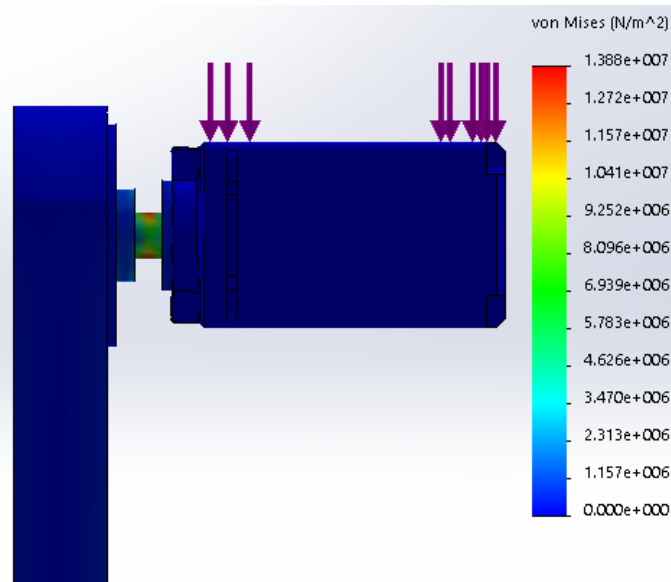


En la anterior figura observamos la deformación unitaria equivalente (ESTRN) que es una relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, la cual nos permite determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos de tensión o compresión axial.

La Figura 24 nos muestra una estimación exagerada de desplazamiento, que tiene como valor máximo del modelo entero 1.9 mm, puesto que está a escala 14:1 para

mejor visualización del componente con más deformación que es el servomotor, el cual presenta la mayor carga de esfuerzos en su eje rotor como se observa en la siguiente figura.

Figura 25. Análisis de Tenciones.



El eje del servomotor es el más crítico de todo el modelo entero pero como se observa en la Figura en la escala de tensiones Von Mises, gran parte del eje se encuentra en color verde lo cual nos indica que soporta la carga del panel perfectamente.

6.1.2 Construcción y Ensamblaje Una vez definido el diseño del sistema completo se procede a detallar su construcción, teniendo como meta primordial la correcta estabilidad del sistema para una buena ubicación de los servomotores. A continuación pasaremos a explicar todos los pasos realizados para la construcción del robot.

Como primer paso se compró en *Dynamo Electronics* la base servo la cual está diseñada para mantener el movimiento de rotación para sistemas robóticos tales como brazos articulados. A esta base se le puede adecuar directamente el

servomotor estándar Hitec 311 previamente seleccionado haciendo un ensamble fácil, y logrando un movimiento suave. Puede soportar una carga de hasta 5kg.

Figura 26. Base Servomotor.



Fuente: www.dynamoelectronics.com

Características:

- Hueco central de 1.8cm diámetro con cuatro soportes internos para el servomotor
- Base diámetro exterior: 9.4cm
- Altura 4.6cm incluida la base rotatoria
- Puntos de fijación en la base para el servo
- Esferas para permitir el desplazamiento rotativo óptimo del disco de la base
- 4 puntos de fijación al piso
- Carga máxima 5 kg

La estructura del robot fue hecha en acrílico el cual mediante los diseños ya mostrados en SolidWorks se procedió a prepararse en formato vectorial en CorelDRAWN en donde el dibujo debe tener la medida real de la pieza a cortar. La escala del dibujo será por lo tanto 1:1. Se debe eliminar todo lo que esté de más en el archivo (lo que no sea para enviar a cortar) y distribuir todo de la mejor manera para ahorrar material y tiempo de corte laser dejando una separación mínima de 1 mm entre piezas.

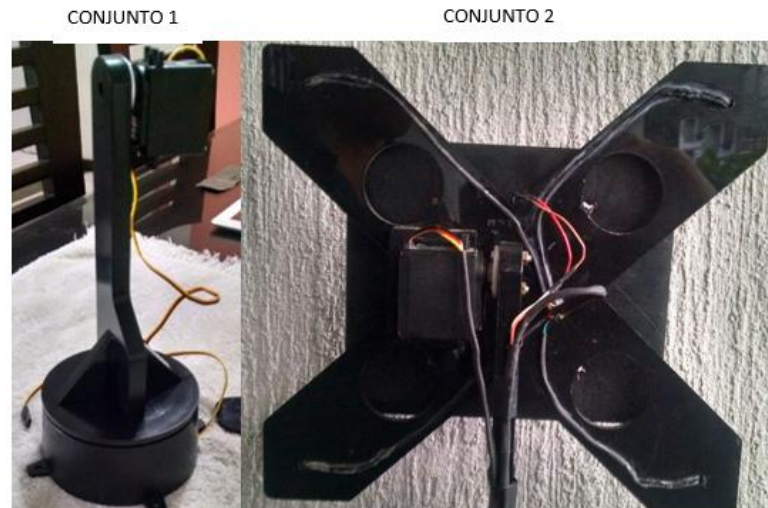
Figura 27. Piezas en acrílico.



Una vez cortadas todas las piezas se procede al ensamblaje de cada componente dividiéndolo en dos subconjuntos, el primero que implica pegar con cloruro de metileno los pie de amigos (Figura 21 D) como soporte al eje vertical (Figura 21 B), posteriormente será atornillado el servomotor superior al mismo eje. Se sujeta a la base servo giratoria que contiene un servomotor en la parte posterior correctamente ajustado según como se observó en la Figura 26, para conformar el primer conjunto.

El segundo subconjunto para el robot seguidor estará conformado por cuatro bujes que serán pegados en las esquinas donde van posicionadas las Fotorresistencias. Tener en cuenta que para el segundo panel no es necesario que lleve fotorresistencias por lo cual no contiene bujes. Luego se pegara el apoyo para servo (Figura 21 C) por la parte posterior a la base del panel para distanciarla del soporte vertical evitando que se toquen entre sí, y por último serán ensamblados los dos subconjuntos.

Figura 28. Ensamblaje base y soporte panel.



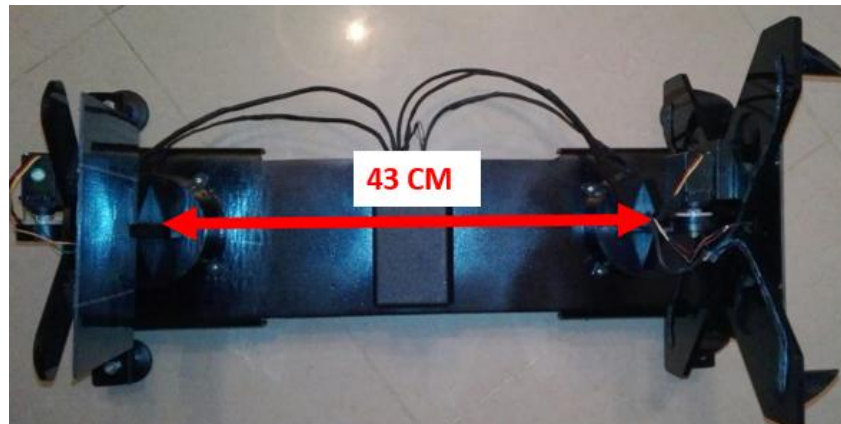
Luego de tener los dos conjuntos ensamblados tanto del robot seguidor y del panel 2 construimos la base para todo el sistema la cual cumple con la función de sostener de manera permanente y organizada cada uno de los componentes mecánicos y eléctricos. Debe estar completamente nivelada para una mayor precisión en las pruebas. Como se explicó en la fase de diseño esta base estará conformada por cuatro patas niveladoras, que serán acopladas después de estar previamente cortada y soldada. Además contiene perforaciones para sujeción y acceso de cableado.

Figura 29. Construcción Base Estructura.



Ya teniendo todas las piezas cortadas, taladradas y ensambladas, se unen ubicando primero el robot seguidor y el panel 2 en cada esquina de la base distanciados a 43 cm entre centros de tal manera que no se afecte con sombras entre ellos.

Figura 30. Distancia entre paneles



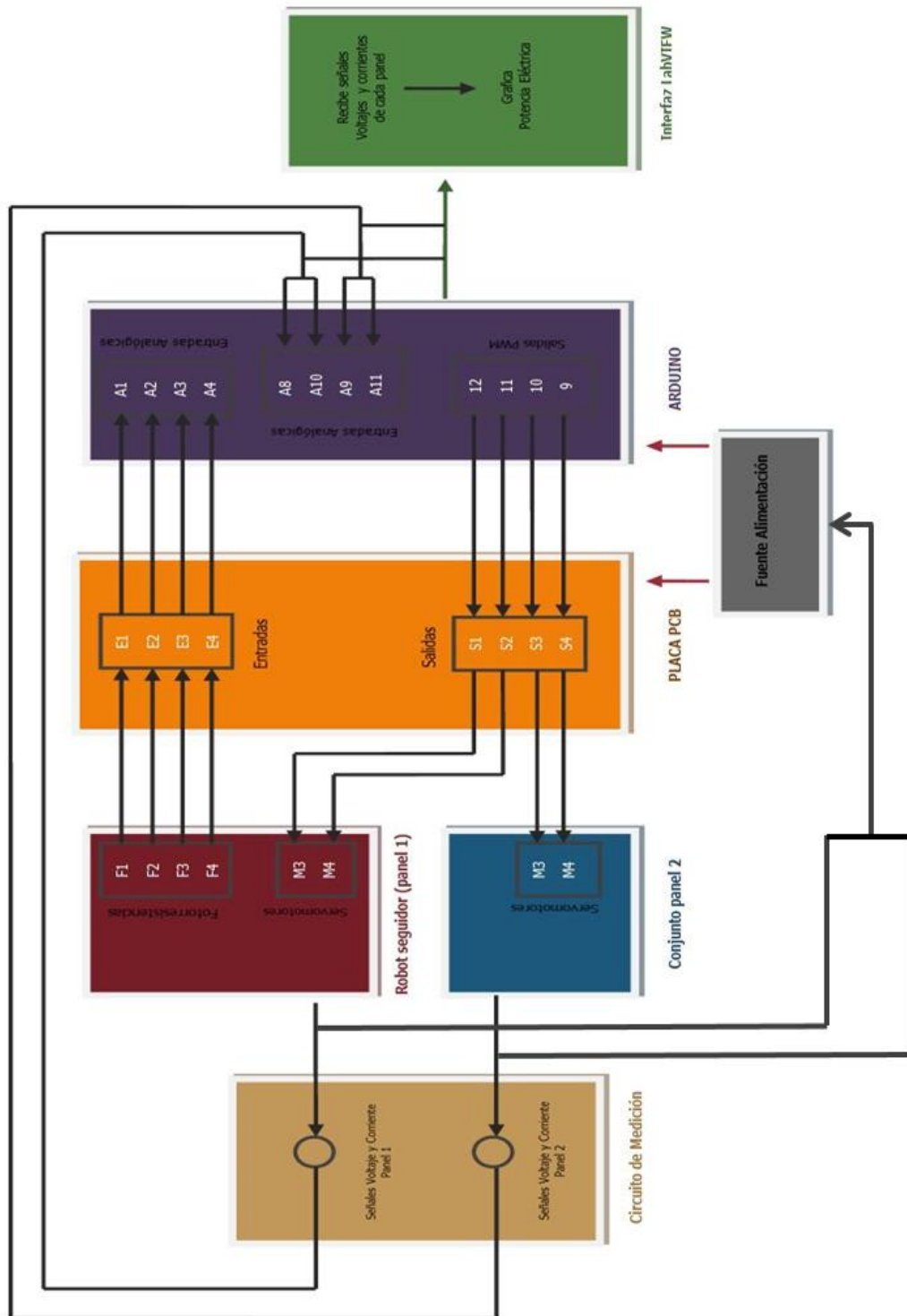
6.2 UNIDAD ELECTRICA Y ELECTRONICA

En este apartado se lleva a cabo el planteamiento de los requerimientos y componentes necesarios para el diseño y su respectiva construcción del conjunto tanto eléctrico y electrónico del sistema de seguimiento que consta de: dos servomotores como actuadores en sus dos grados de libertad y el circuito para realizar el debido sensado de las variables pertinentes, provenientes de la captación de la energía eléctrica producida por los paneles fotovoltaicos para la adquisición de datos de las pruebas a ejecutar; realizar el debido análisis de resultados y conclusiones, teniendo en cuenta que todo está enlazado con el microcontrolador a utilizar que en este caso es una tarjeta Arduino MEGA.

Tabla 9. Apartados de la unidad eléctrica y electrónica.

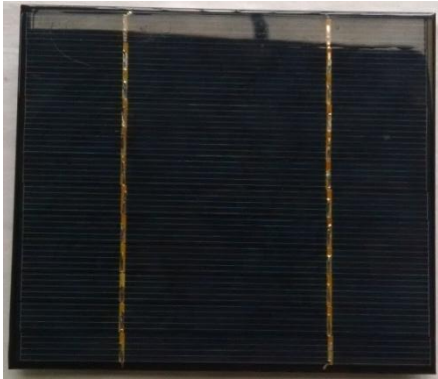
Componentes	
Paneles fotovoltaicos	Fuente alimentación y autonomía
Arduino	Circuito de sensado y fotoresistencias
Actuadores: servomotores	Placa PCB

Figura 31. Diagrama de conexiones general.



6.2.1 Paneles Fotovoltaicos

Figura 32. Panel FV. 6V – 500mA



ESPECIFICACIONES:

- Policristalino
- Dimensiones: 16x14 [cm]
- Voltaje operativo: 6 [V]
- Corriente: 500 [mA]
- Potencia máxima: 3 [W]

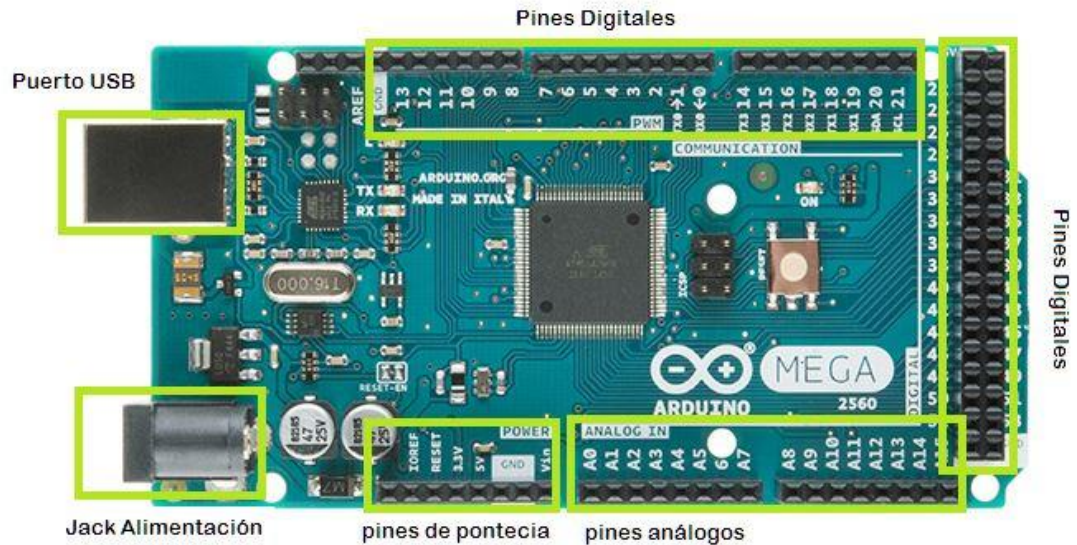
El panel fotovoltaico cuenta con un recubrimiento de epoxi transparente en la parte trasera, proporcionando una superficie eficiente y resistente al agua para la exposición al aire libre.

Este componente será el encargado de proporcionar la energía suficiente para mantener en operación continua la batería, que será la encargada de poner en funcionamiento todo el sistema de accionamiento (4 servomotores HS311), bajo la operación como sistema autónomo, mientras que esta es recargada debido al aprovechamiento de la energía captada por los dos paneles, mediante un arreglo o circuito en serie entre ellos.

Estos a su vez serán los encargados de proporcionar los datos de voltaje y corriente a sensor por cada uno de ellos bajo la operación de lectura, por medio de pruebas, bajo condiciones distintas, donde analizaremos la cantidad de energía aprovechada si se utiliza el sistema de seguimiento frente a un sistema horizontalmente estático.

6.2.2 Arduino Mega

Figura 33. Distribución de la tarjeta Arduino MEGA.



Fuente: <https://www.dynamoelectronics.com/boards-arduino/57-arduino-mega-2560-r3.html>

El Arduino Mega es probablemente el microcontrolador más capaz de la familia Arduino. Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas análogas, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un botón de reset y una entrada para la alimentación de la placa.

La comunicación entre la computadora y Arduino se produce a través del Puerto Serie. Posee un convertidor usb-serie, por lo que sólo se necesita conectar el dispositivo a la computadora utilizando un cable USB como el que utilizan las impresoras.

Figura 34. Cable conexión Arduino.



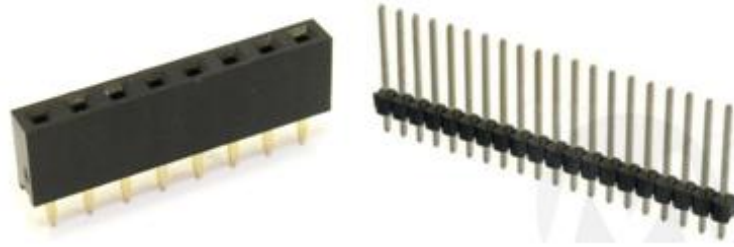
Fuente: <http://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/>

Cuando se trabaja con una fuente externa de poder se debe utilizar un convertidor AC/DC y regular dicho voltaje en el rango operativo de la placa. De igual manera se puede alimentar el micro mediante el uso de una fuente externa.

El uso de este dispositivo como controlador nos facilita el desarrollo de proyecto, ya que el entorno de la programación es relativamente simple y directo. Además de ser compatible con diferentes plataformas como LabVIEW que veremos más adelante. De tal manera que es una alternativa factible específicamente para el desarrollo de proyectos de prototipado, que en nuestro caso es lo que deseamos ejecutar.

A la placa Arduino se conectaran cada uno de los componentes que integraran el robot (circuitos, sensores, servos) que conformaran parte de la placa PCB, el cual debido a que algunos cables de los apartados se tienen que conectar al mismo pin de la placa, utilizaremos conectores para cabezales de pin, que irán soldados y acoplados para un mejor ajuste.

Figura 35. Pines de conexión macho y hembra.



Fuente: <http://modtronix.com/hdr1x8-f254-57.html>

6.2.3 Actuadores: servomotores

Figura 36. Servomotor Hitec HS-311.

Specifications

Modulation:	Analog
Torque:	4.8V: 42.00 oz-in (3.02 kg-cm) 6.0V: 49.00 oz-in (3.53 kg-cm)
Speed:	4.8V: 0.19 sec/60° 6.0V: 0.15 sec/60°
Weight:	1.51 oz (42.8 g)
Dimensions:	Length: 1.57 in (39.9 mm) Width: 0.78 in (19.8 mm) Height: 1.43 in (36.3 mm)
Motor Type:	3-pole
Gear Type:	Plastic
Rotation/Support:	Bushing
Rotational Range:	180°
Pulse Cycle:	20 ms
Pulse Width:	900-2100 μ s
Connector Type:	Universal



Fuente: <https://servodatabase.com/servo/hitec/hs-311>

Un servo es un dispositivo pequeño que incorpora un motor de CC de dos cables, un tren de engranajes, un potenciómetro, un circuito integrado y un eje de salida. De los tres cables que sobresalen de la carcasa del motor, uno es para

energía, uno para tierra y uno es una línea de entrada de control. El eje del servo puede colocarse en posiciones angulares específicas enviando una señal codificada. Mientras exista la señal codificada en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del eje. Si la señal codificada cambia, entonces la posición angular del eje cambia.

Los servos vienen en diferentes tamaños pero usan esquemas de control similares y son extremadamente útiles en robótica. Los motores son pequeños y extremadamente potentes para su tamaño. También extrae energía proporcional a la carga mecánica. Un servo ligeramente cargado, por lo tanto, no consume mucha energía.

El consumo de corriente se determinara a continuación:

- $Voltaje = 4.8 V$
- $Velocidad = 1.3 \text{ sg} / 180^\circ$ (valor medido)
- $Torque = 1.1 \text{ kg} * \text{cm}$ (valor calculado, para mover el panel)

$$Torque = 1.1 \text{ kg} * \text{cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * 9.81 \rightarrow Torque = 0.108 \text{ N} * \text{m}$$

$$Velocidad \text{ angular} = \frac{180^\circ}{1.3 \text{ sg}} * \frac{\pi}{180^\circ} \rightarrow Velocidad \text{ angular} = 2.416 \text{ rad/sg}$$

$$Potencia = Torque * vel \text{ angular} = 0.108 * 2.416 \rightarrow Potencia = 0.261 \text{ W}$$

$$Potencia = vol * Intensidad \rightarrow Intensidad = \frac{0.261 \text{ W}}{4.8 \text{ V}} = 0.0543 \text{ Amp}$$

$$Consumo = 0.0543 * 4 (\text{servos}) = 0.217 \text{ Amp} = 220 \text{ mA}$$

En realidad solo son dos los servos que estarán bajo el esfuerzo de accionar cada panel respectivamente; los dos restantes accionaran las dos bases giratorias que constan de rodamientos de apoyo, donde estos tienen un trabajo requerido menor, y a su vez teniendo en cuenta que mientras el robot seguidor realiza el debido escaneo, el sistema de accionamiento del segundo panel, permanece estático a la

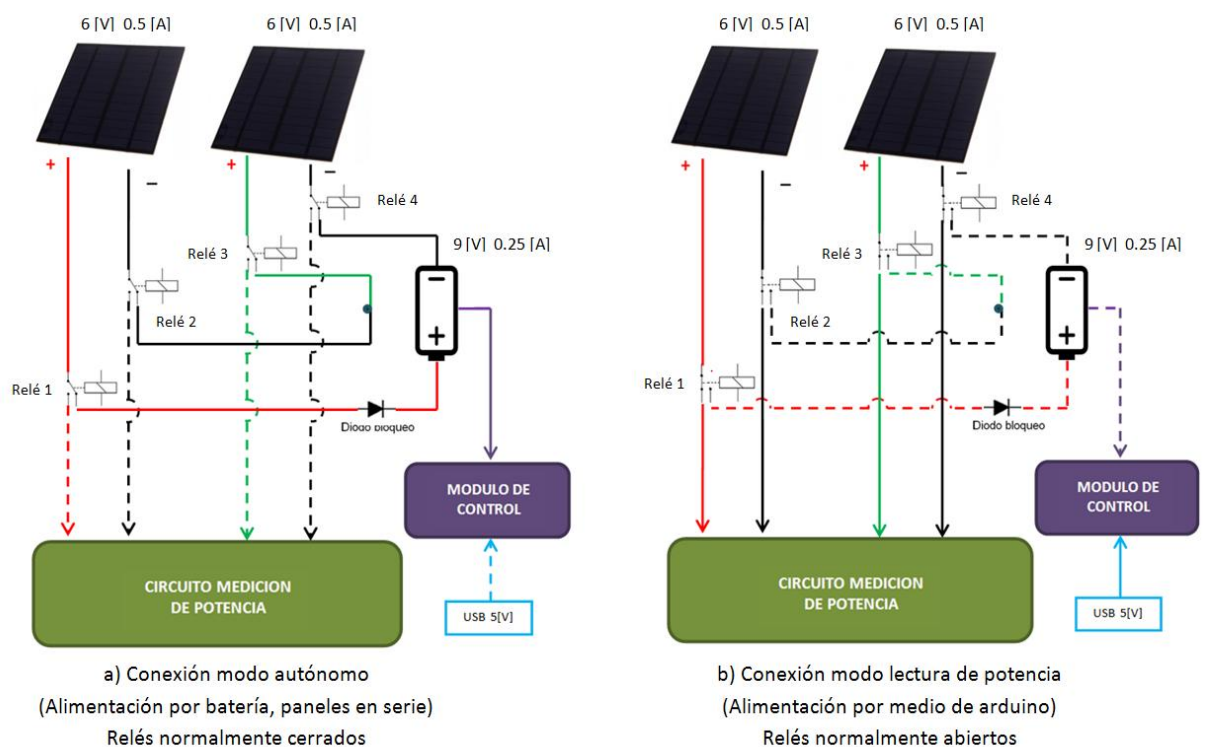
espera de la señal proporcionada por el seguidor. Bajo estas condiciones el consumo total de los 4 servos será mucho menor que el calculado anteriormente. Debido a que estos funcionan con un voltaje de 4 a 6 voltios, ya que son servos para uso específico para microcontroladores como Arduino, se implementara una fuente de máximo 9 voltios para la operación de los 4 servos que trabajaran de manera continua, donde serán alimentados por medio de una baquelita y de esta manera proteger la integridad del Arduino de posibles sobrecargas.

6.2.4 Fuente de alimentación y autonomía

Para poner en funcionamiento el conjunto robot seguidor y el sistema, disponemos de dos modos de operación:

1. Modo lectura
2. Modo autónomo

Figura 37. Diagrama de conexión para los modos de operación.



En el modo lectura (Figura 37. a) se tendrán a disposición las salidas de voltaje de cada panel de manera independiente, de tal manera que los relés me permitan el flujo directo hacia el circuito de medición de potencia y se integren a este. Dando como producto, las variables a mostrar por medio de la interfaz LabVIEW, que me indican el estado actual de funcionamiento del conjunto. Esta configuración se realiza para la toma de datos durante las pruebas para el debido análisis del desempeño del sistema de seguimiento.

Para este caso la entrada de alimentación será proporcionada directamente por el arduino 5[V], y la batería externa estará desconectada para evitar que se descargue.

En el modo autónomo (Figura 37. b), cortamos el flujo directo hacia el circuito de medición por medio de una orden proporcionada por el usuario en la interfaz LabVIEW, y se conmutan las salidas de voltaje de cada panel en serie. Esto con el objetivo de aumentar el voltaje mediante la suma entre ellos, que será alrededor de 10 a 12 V dependiendo si se encuentra bajo buenas condiciones de radiación y así mantener cargada la batería. La entrada USB del arduino se desconecta.

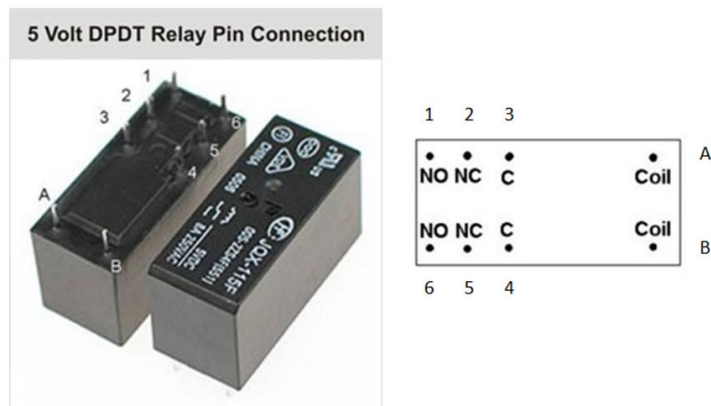
Figura 38. Batería de alimentación.



Fuente: <https://beston.com.co/bateria-recargable-9v/>

Para el funcionamiento del conjunto se utilizó una batería recargable de níquel-metal hidruro de 9 voltios , suficiente para sustentar la tarjeta PCB que se encarga de accionar y alimentar cada componente. Bajo las condiciones de trabajo del sistema de seguimiento, en el que cada media hora se ejecuta la función de escaneo para cambiar de posición (el cual dura alrededor de 45 segundos), se presenta el pico de consumo donde la batería tendrá la tarea de sustentar el funcionamiento. El tiempo entre escaneo (modificable) nos sirve como recarga y estabilización de la batería, debido a que los servomotores se encuentran estáticos en su posición y su consumo es menor. Se usa también un diodo de bloqueo, que se coloca a la entrada de voltaje de la batería, impidiendo que las células sombreadas actúen como receptores evitando que se disipe el consumo de la fuente y esta se descargue a través de los paneles fotovoltaicos, ya que estos diodos solo dejan pasar la corriente en un solo sentido y se oponen a la circulación en sentido contrario.

Figura 39. Especificaciones de relé



Fuente: <https://dmohankumar.wordpress.com/2011/08/06/battery-guard/>

Este modulo relé será implementado para la conmutación de los dos modos de operación: el sistema de medición y la alimentación de la batería, mediante una orden efectuada en el algoritmo que energiza la bobina del rele y de esta manera conectar los paneles en serie o de manera independiente.

6.2.5 Conjunto de medición de potencia Debido a que se quiere realizar el estudio de aprovechamiento de energía, implementando el sistema de seguimiento, como estudio que sustente la realización del mismo, se debe realizar la comparativa de la cantidad de radiación solar captada por los dos paneles. Para esto se tiene en cuenta que el robot estará bajo el control de búsqueda de la mayor intensidad de luz y el segundo panel funcionara sin la orden de ubicación de rastreo proporcionada por el robot, de tal manera que simulara un estado estático.

También de forma preliminar se realizaran pruebas piloto como la implementación de los dos paneles bajo el sistema de seguimiento y otra donde ambos (robot y panel controlado) estarán sin ningún control de escaneo y seguimiento.

Para esto se hace necesario implementar de forma adicional, un circuito que me proporcione la medición de la potencia, calculada por medio del sensado del voltaje y la corriente que pasa a través de una carga o resistencia.

El cálculo de la resistencia a usar se sustenta bajo las características operativas de los paneles:

Paneles policristalinos : 6 [v]; 500[mA]

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6}{0.5} = 12 \Omega \quad Pot = V * I = 6 * 0.5 = 3W$$

Acogidos bajo las recomendaciones del director del proyecto, en el que se espera que el panel no alcanzara a entregar dicha corriente teórica de 500mA, sino un valor máximo menor a este, nos decantamos por usar una resistencia comercial y capaz de disipar esa cantidad de energía escogiéndola con un valor mayor. De esta manera se implementara una de las siguientes características:

Resistencia 15 [Ω] 5 [W]

Figura 40. Resistencia cerámica 15 [Ω] , 5 [W].



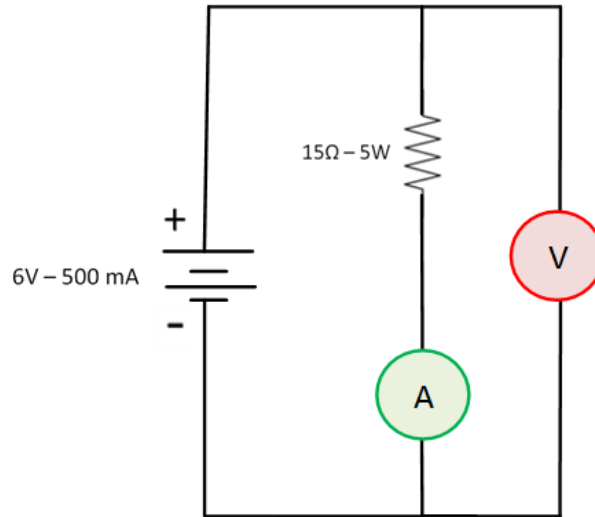
Fuente: <https://es.aliexpress.com/item/10PCS-LOT-Ceramic-Cement-Resistor-5W-15-ohm-15R-Resistance-5-Error-DIY-Kit/32823732171.html>

La Resistencia de potencia es uno de los componentes más simples y más importante de los sistemas eléctricos. Los circuitos eléctricos usan muchos dispositivos diferentes para ayudar a regular y canalizar el flujo de electricidad. Las resistencias controlan la cantidad de electricidad que fluye a través de los circuitos.

Esta resistencia bobinada de cerámica posee un alambre enrollado de metal alrededor del centro de la resistencia no-inductiva. Contiene en su interior materiales que son resistentes al calor, a la humedad y a la corrosión con el fin de proteger y reparar la resistencia. Disipa de forma muy fácil el calor, posee una alta estabilidad y excelente propiedades aislantes.

El esquema básico a implementar que me permite el cálculo de la potencia eléctrica consumida en el circuito, reemplazándome el funcionamiento de un vatímetro como instrumento de medición, según la definición de potencia, un vatímetro debe ser un instrumento que realice el producto de dos señales eléctricas (tensión y corriente).

Figura 41. Circuito esquemático básico para medir potencia.

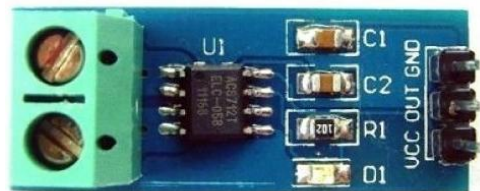


La medición de potencia y energía es muy importante ya que a partir de estas se pueden establecer un rango de funcionamiento estable de un proyecto o en cualquier aplicación que involucre estas magnitudes, de tal manera que me dimensiona la capacidad de entrega o de consumo de un dispositivo.

Como amperímetro se utilizara un sensor de corriente compatible con el microcontrolador para realizar las lecturas y Como voltímetro, el arduino cumplirá esa función, ya que tiene la capacidad de leer tensión.

6.2.5.1 Medición de corriente

Figura 42. Sensor de corriente ACS712 - 5 [A].



Fuente: <http://saber.patagoniatec.com/sensor-de-corriente-ac712-5-20-30a-ptec-arduino-pic/>

El sensor de corriente ACS712 es una solución económica para medir corriente, internamente trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo. EL sensor nos entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente.

Traen una bornera para conectar la línea que queremos medir y 3 pines, dos para conectar la alimentación y un pin para la salida analógica. El rango de corriente que podemos medir y sensibilidad varían dependiendo del modelo del integrado, existen tres modelos los cuales detallamos a continuación:

Tabla 10. Características internas del sensor de corriente ACS712.

Modelo	Rango	Sensibilidad
ACS712ELCTR-05B-T	-5 a 5 A	185 mV/A

El sensor nos entrega un valor de 2.5 voltios para una corriente de 0A y a partir de allí incrementa proporcionalmente de acuerdo a la sensibilidad, teniendo una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente. Dicha relación es una línea recta en una gráfica Voltaje vs Corriente donde la pendiente es la sensibilidad y la intersección en el eje Y es 2.5 voltios. La ecuación de la recta sería la siguiente

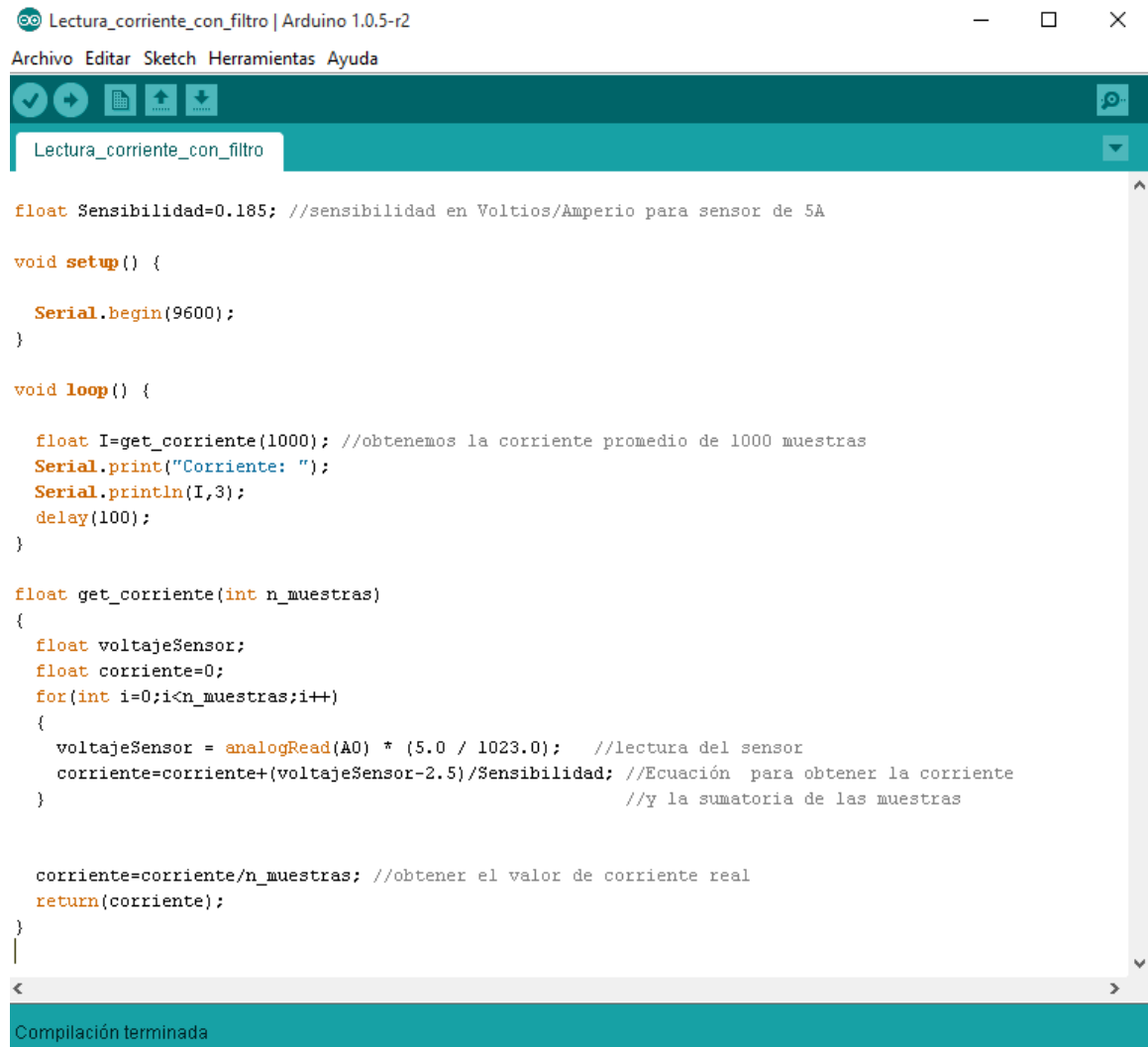
$$V = m * I + 2.5$$

Donde la pendiente es m y equivale a la Sensibilidad

Despejando tendremos la ecuación para hallar la corriente a partir de la lectura del sensor, que es la que introduciremos dentro del código.

$$I = \frac{V - 2.5}{Sensibilidad}$$

Figura 44. Código lectura de corriente con filtro.



```
float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 5A

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  float I=get_corriente(1000); //obtenemos la corriente promedio de 1000 muestras
  Serial.print("Corriente: ");
  Serial.println(I,3);
  delay(100);
}

float get_corriente(int n_muestras)
{
  float voltajeSensor;
  float corriente=0;
  for(int i=0;i<n_muestras;i++)
  {
    voltajeSensor = analogRead(A0) * (5.0 / 1023.0); //lectura del sensor
    corriente=corriente+(voltajeSensor-2.5)/Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
  } //y la sumatoria de las muestras

  corriente=corriente/n_muestras; //obtener el valor de corriente real
  return(corriente);
}
```

Compilación terminada

Mientras mayor sea la cantidad de muestras obtendremos un mejor resultado pero también mayor será el tiempo que se demora el Arduino para realizar la medición

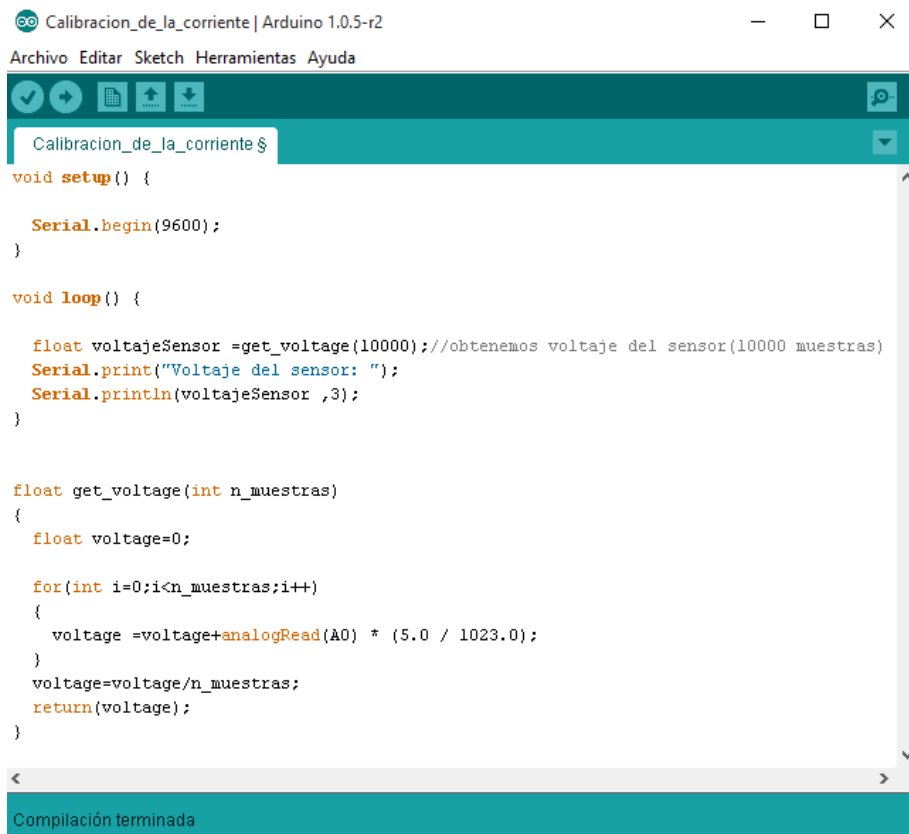
Figura 45. Resultados monitor serial lectura corriente con filtro.



Notar que de igual manera, existe un ruido en los resultados. No confundir el ruido con el error del offset que en este caso es de aproximadamente +150 [mA] para una corriente real de 0 [A]. Este último error si es representativo, podemos restar al resultado en la ecuación de la corriente. Significa que la ecuación que estamos usando para calcular la corriente no es la adecuada. Para corregir esto es necesario calibrar nuestro sensor y hallar el nuevo valor de sensibilidad. Las constantes de la formula inicial, 2.5 que es el voltaje del sensor cuando la corriente es 0 y la sensibilidad, que equivale a la pendiente de la recta Voltaje Vs Corriente, hay que recalcularlas para encontrar los valores reales.

Al ser una recta, basta con obtener dos puntos y con estos podemos calcular constantes. Para esto necesitamos un multímetro. El sensor y la carga deben de conectarse en serie. Después de conectar el amperímetro y el sensor, debemos de tomar lecturas de voltaje del sensor, esto se hace con el siguiente código.

Figura 46. Código para calibrar sensibilidad del sensor de corriente.



```
Calibracion_de_la_corriente | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda

Calibracion_de_la_corriente $

void setup() {

  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  float voltajeSensor =get_voltage(10000);//obtenemos voltaje del sensor(10000 muestras)
  Serial.print("Voltaje del sensor: ");
  Serial.println(voltajeSensor ,3);
}

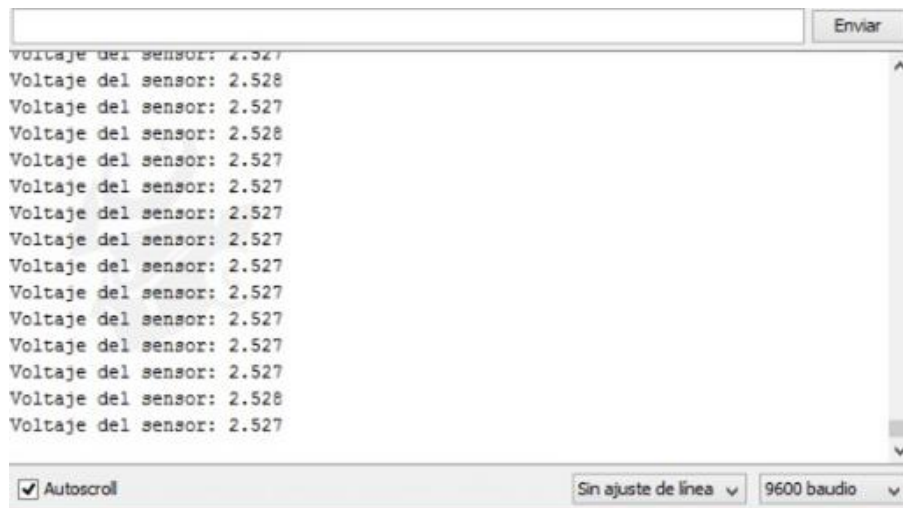
float get_voltage(int n_muestras)
{
  float voltage=0;

  for(int i=0;i<n_muestras;i++)
  {
    voltage =voltage+analogRead(A0) * (5.0 / 1023.0);
  }
  voltage=voltage/n_muestras;
  return(voltage);
}

Compilación terminada
```

El primer punto que debemos medir es para una corriente de 0 amperios

Figura 47. Resultado monitor serial, valor de voltaje para una corriente de 0 [A].

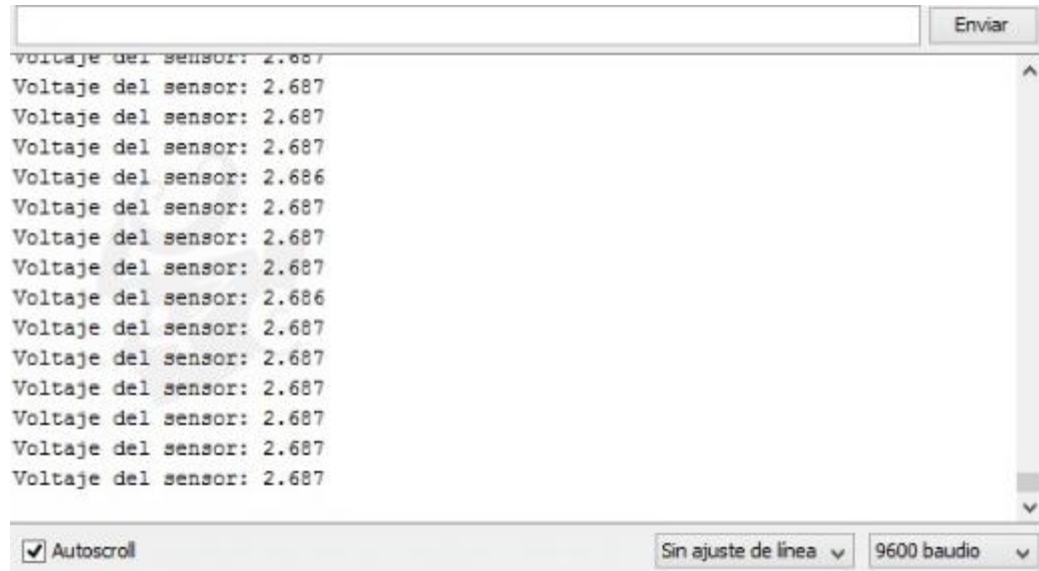


```
Enviar
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.528
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.528
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.527
Voltaje del sensor: 2.528
Voltaje del sensor: 2.527

Autoscroll Sin ajuste de línea 9600 baudio
```

En este caso 2.527, que corresponde al primer punto, para una corriente de cero (2.527,0). Para hallar la segunda constante necesitamos una segunda medida. Se recomienda que no sea cercano al valor de la primera medida. Se usara una fuente o cargador.

Figura 48. Resultado monitor serial, valor de voltaje para una corriente de 1 [A].



Como se observa el sensor tiene un voltaje de 2.687, donde en el amperímetro medimos 1.082A, este sería nuestro segundo punto (2.687,1.082).

Teniendo estos dos valores la ecuación para calcular la corriente es:

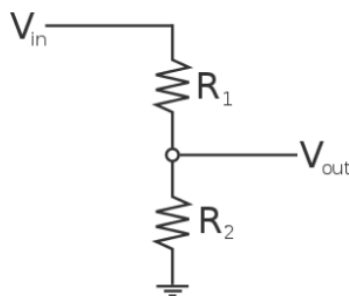
$$\text{Sensibilidad} = m = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{2.687 - 2.527}{1.082 - 0} = 0.145$$

Luego con este valor de sensibilidad (m) = 0.145, es el que reemplazaremos en la ecuación original que implementaremos en el código para sensar la corriente de nuestro arreglo.

6.2.5.2 Medición de Voltaje Como instrumento de medición de voltaje, utilizaremos el Arduino, ya que contiene entradas que modifican el valor analógico leído que puede ser procesada por el microcontrolador, a un valor digital, mediante un convertidor (ADC). Las entradas analógicas de un Arduino pueden medir hasta 5V (cuando se utiliza la tensión de referencia analógica incorporada). Incluso cuando sólo se conecta a un circuito de 5V, debe utilizar las resistencias para ayudar a proteger el Arduino de cortocircuitos o sobrecargas de tensión inesperadas.

Debido a que nuestro panel tiene como característica una entrega de 6V, es necesario implementar un circuito que me reduzca este valor, para proteger las entradas analógicas. Se trata de un sencillo circuito divisor de tensión que consta de dos resistencias (R1 y R2) en serie que se encargan de dividir el voltaje de ingreso, para adaptarlo y poder realizar la lectura por medio de las entradas analógicas del Arduino (5V).

Figura 49 Concepto divisor de voltaje



La fórmula para calcular los valores en un divisor de tensión es:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in}$$

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Divisor_de_tensi%C3%B3n

Puesto que arduino admite un Vmax de 5V en sus entradas analógicas. Si el divisor está funcionando correctamente, entonces el Vout será de un máximo de 5V, luego para calcular la tensión máxima de entrada al circuito tendremos:

$$V_{max} = 5 * \frac{R1 + R2}{R2}$$

Dado a que nuestro panel entrega 6V, como valores de resistencias comunes usaremos R2 = 2 [kΩ] y R1 = 1 [kΩ]. Para este caso:

$$V_{max} = 5 * \frac{1 + 2}{2} = 7.5 [V]$$

De modo que este arreglo de valores de resistencias es suficiente para proteger el sobre tenciones hacia los pines analógicos del arduino, proveniente del panel fotovoltaico, ya que admite hasta un valor de entrada de hasta 7.5 voltios y nuestro panel entrega 6 voltios (teóricamente). De esta manera tiene un factor de seguridad de 1.25, asegurando que no dañaremos la entrada del microcontrolador. Luego el valor de la señal de entrada al arduino, será dos tercios del valor real sensado:

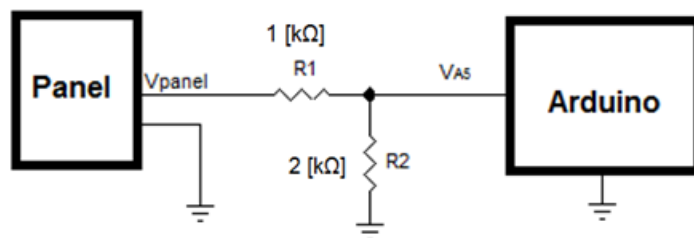
$$V_{out} = [R2 / (R1 + R2)] * V_{in} \rightarrow V_{out} = 2/3 (V_{in}).$$

Habrá que agregar el factor del divisor de tensión dentro del código final para mostrar los valores reales de los voltajes de cada panel que estaría sensando del arreglo de medición durante las pruebas a realizar.

El factor seria:

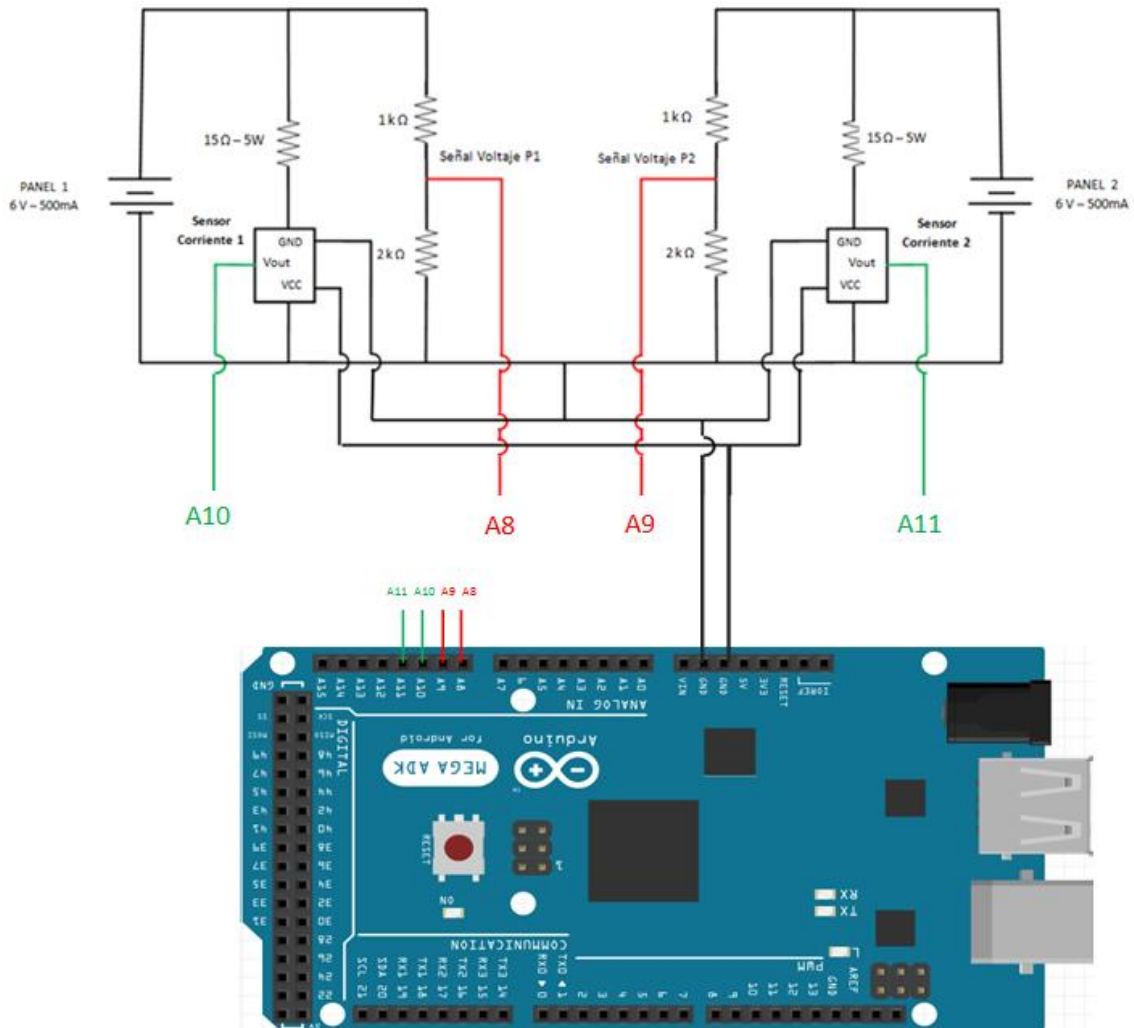
$$Voltaje\ real\ (V_{in}) = Voltaje\ sensado * \frac{3}{2}$$

Figura 50. Esquema divisor de tensión panel-Arduino.



6.2.5.3 Circuito General de medición para el cálculo de la potencia Teniendo ya las bases programáticas para hacer las respectivas medidas de voltaje y corriente, se procede a realizar el diagrama del circuito general en conjunto de los dos paneles, para obtener los valores respectivos durante las pruebas a realizar.

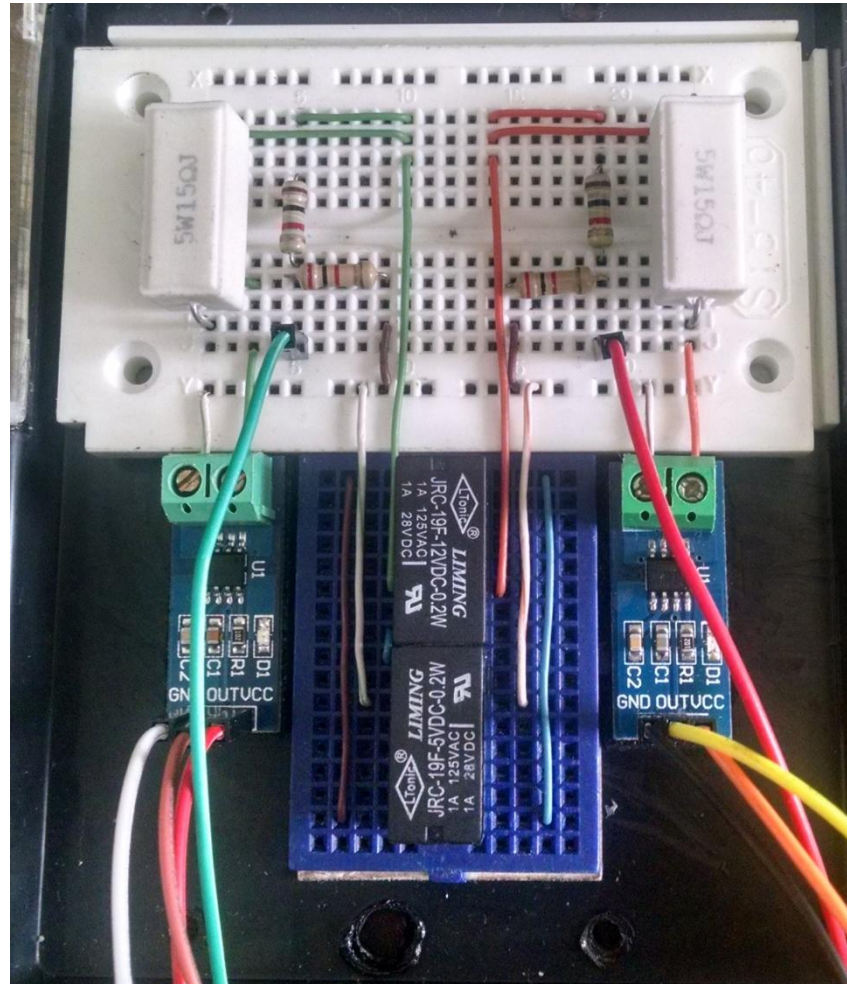
Figura 51. Esquema general del circuito de sensado de corriente y voltaje.



Este será el esquema del circuito a implementar para la toma de las señales de voltaje y corriente tanto del panel 1 (robot seguidor), como del segundo panel a controlar, por medio de las herramientas descritas anteriormente que son:

El sensor de corriente previamente calibrados y un divisor de tensión para la señal de voltaje que me protegerá las entradas analógicas del microcontrolador.

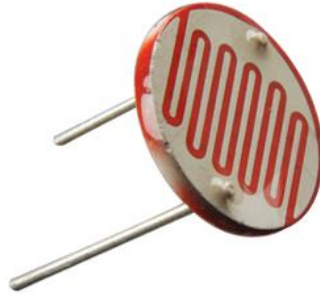
Figura 52. Montaje físico de circuito de sensado de corriente y voltaje.



Para llevar a cabo el montaje del circuito, se utilizó una protoboard del tamaño necesario para este, ayudándonos con el espacio y ubicación para acoplarlo de la mejor manera a la base de la estructura del conjunto robot seguidor.

6.2.6 Circuito fotorresistencias

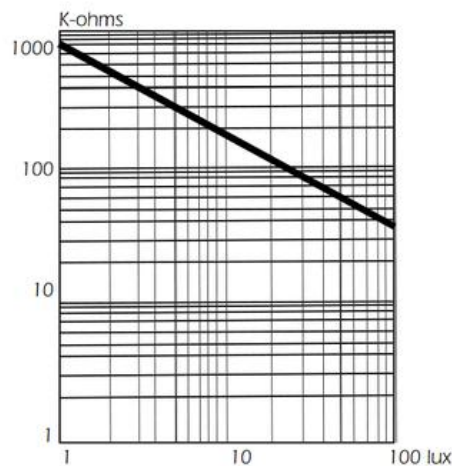
Figura 53. Fotorresistor LDR.



Fuente: <https://www.promotec.net/fotorresistencias-s4a/>

Las fotorresistencias -también conocidos como LDR (*light depending sensor*)- son resistencias variables cuyos valores varían dependiendo de la cantidad de luz que estén recibiendo. Mientras más luz perciba la fotorresistencia, menor será la resistencia del dispositivo. Y mientras más oscuro se encuentre el ambiente, la resistencia del dispositivo será mayor. Tal como lo muestra la grafica siguiente:

Figura 54. Grafica de funcionamiento fotorresistencia en función de la luminosidad.



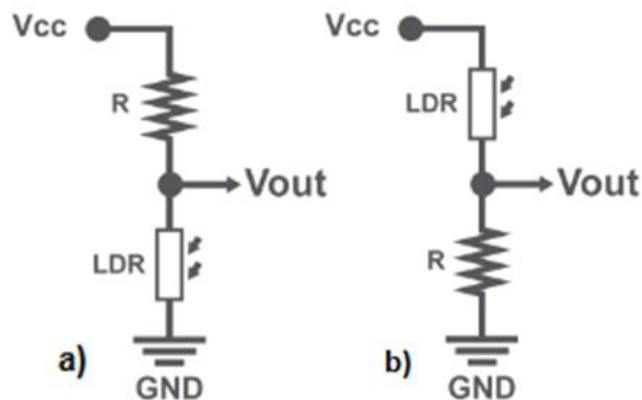
Fuente: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/diferencias-entre-una-fotorresistencia-y-un-sensor-de-luz>

En la fotorresistencia, la resistencia varía de acuerdo con la luz que haya en el ambiente, lo cual implica que se medirá es el voltaje de salida.

Dicho esto, para poder llegar a medir los cambios de la fotorresistencia y por consecuencia la variación de voltaje de salida dependiendo de la intensidad lumínica captada por este componente electrónico de tal manera que en su conjunto, nos ayudara a encontrar el lugar con mayor incidencia de radiación solar, se implementara por medio de un circuito que ya conocemos como lo es el divisor de tensión, montado en serie con una resistencia normal. Esta conexión es habitual especialmente para los microcontroladores.

Hay dos maneras para realizar la conexión del divisor de tensión a ejecutar:

Figura 55. Conexión de un fotoresistor LDR.



Fuente: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/diferencias-entre-una-fotorresistencia-y-un-sensor-de-luz>

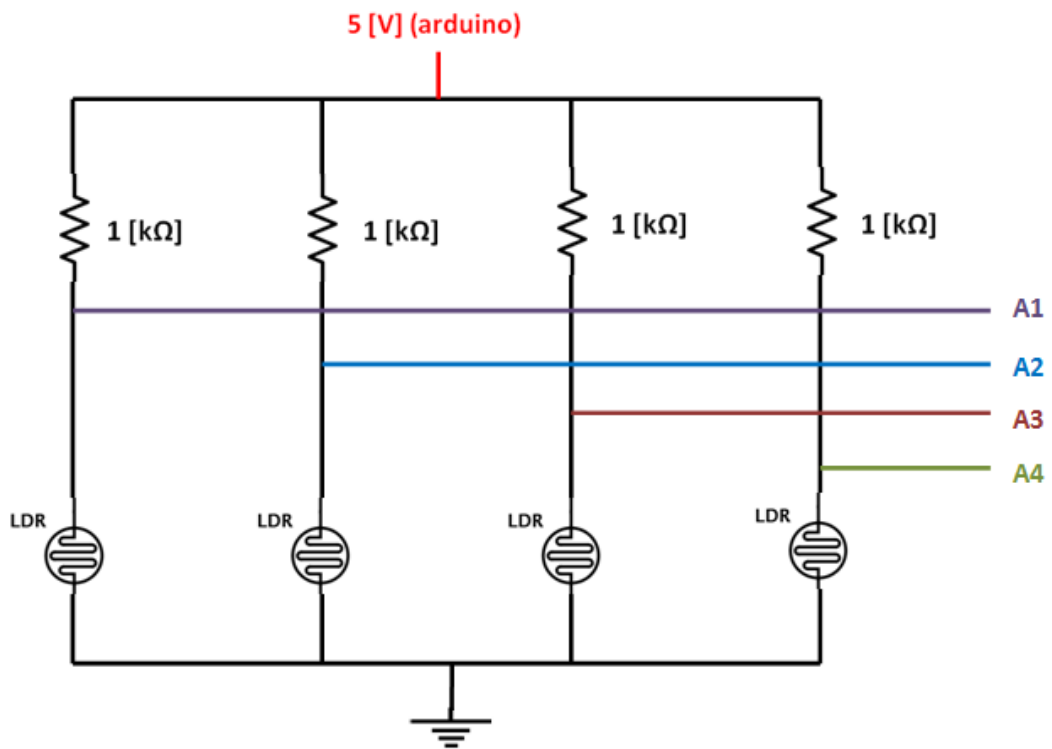
Nos daremos cuenta que el voltaje de salida o a medir, dependerá del valor de la resistencia fija y la del fotoresistor.

Como R es una resistencia de valor fijo, el voltaje variará cuando cambie el valor de la fotorresistencia, y de esa manera podremos medir los cambios en la luz que recibe.

Tabla 11. Funcionamiento de la disposición de conexión del fotorresistor según la figura 55.

Disposición	Funcionamiento
a)	Si aumenta la intensidad de luz : disminuye la salida de voltaje
b)	Si aumenta la intensidad de luz : aumenta la salida de voltaje

Figura 56. Diagrama esquemático conexiones de los fotorresistores.



Con las cuatro señales de voltaje de salida del circuito implementado, se determinara la luminosidad con la suma de las respectivas, para encontrar la ubicación de punto óptimo. Como la conexión de estas para nuestro caso es a tierra, la posición en la que recibe mayor intensidad lumínica será el cálculo de la suma que de menor.

6.2.7 Placa PCB Esta unidad nos ayuda primeramente a soportar los mismos componentes a utilizar y las interconexiones eléctricas entre ellos, de tal manera que los conductores están permanentemente unidos al dieléctrico base del circuito, lo cual proporciona una mayor facilidad para el montaje con el microcontrolador.

Nos proporciona un ahorro de espacio empleando conexiones impresas que ocupan menor área comparado con el uso de conexionado convencional. Evita de forma ventajosa la producción de corto circuitos entre hilos, producto de la complejidad o cantidad de componentes a usar si se realizara bajo la implementación de una protoboard, de manera que la baquelita nos muestra rutas nítidas (pistas) de los conductores que permiten un fácil seguimiento visual, mayor organización y control del espacio.

Esta será el soporte de conexión específicamente para los servomotores y las señales entregadas por las fotoresistencias. También tendrá espacio para las señales de voltaje entregada directamente por cada uno de los dos paneles fotovoltaicos, pero bajo las condiciones de querer medir la energía y capturar los datos de las pruebas para realizar el debido análisis de la eficiencia del sistema de seguimiento, estas salidas de los paneles irán a un circuito aparte que cumplirán con la función de vatímetro, donde sensaran por medio de sensores específicos y arreglos de resistencias como se mostro en el apartado anterior.

El diseño de la placa PCB para el funcionamiento de lo planteado con sus componentes requeríos se muestra a continuación.

Figura 57. Diagrama Físico de distribución de la placa PCB

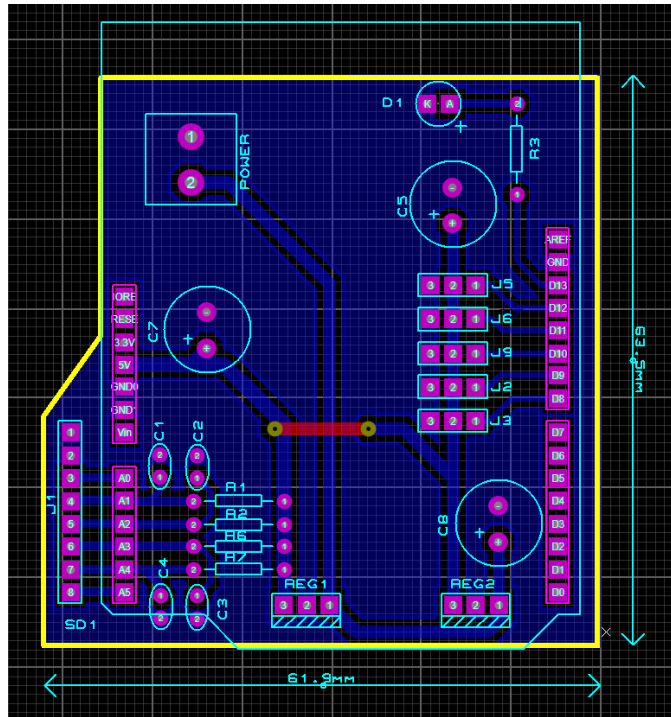
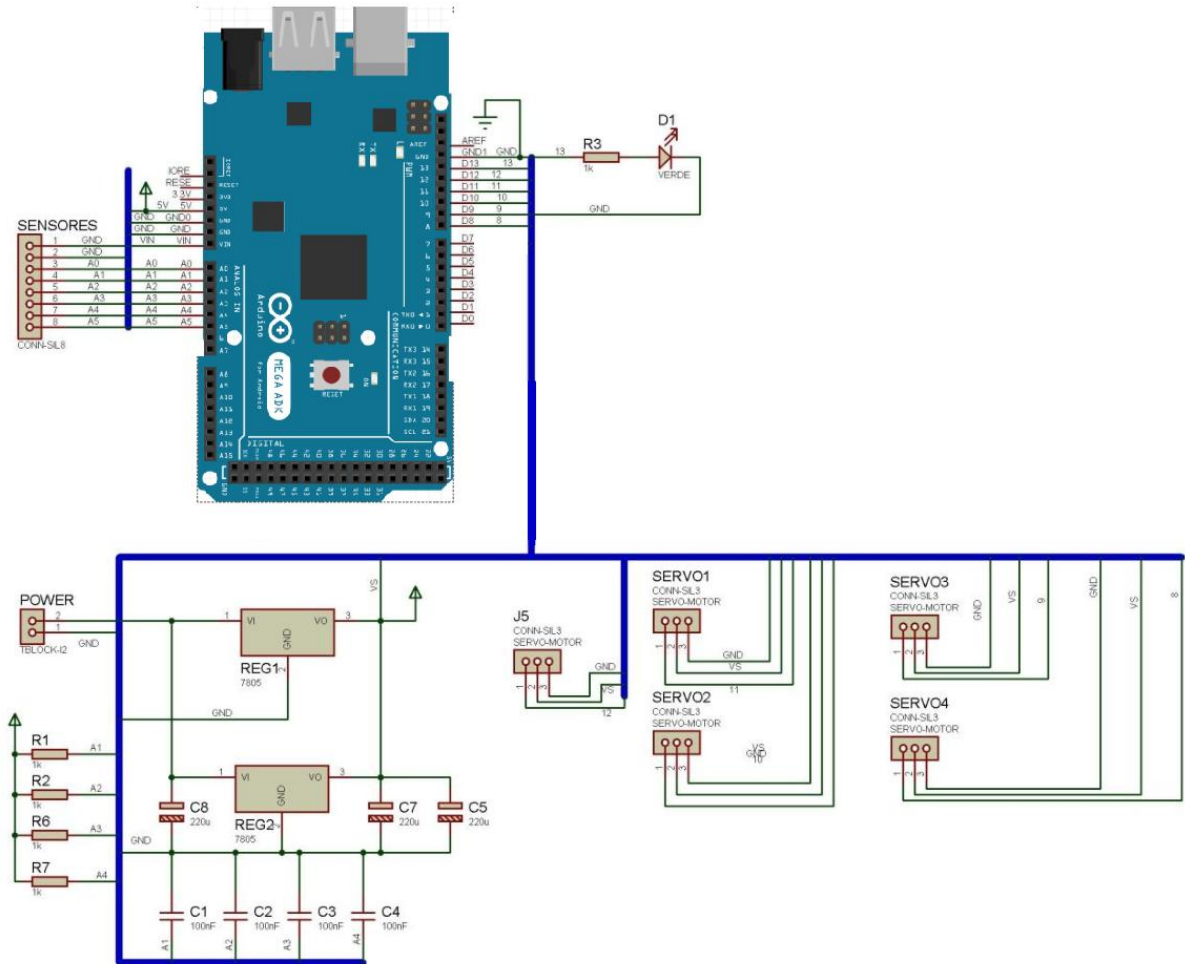


Tabla 12. Componentes de la placa PCB

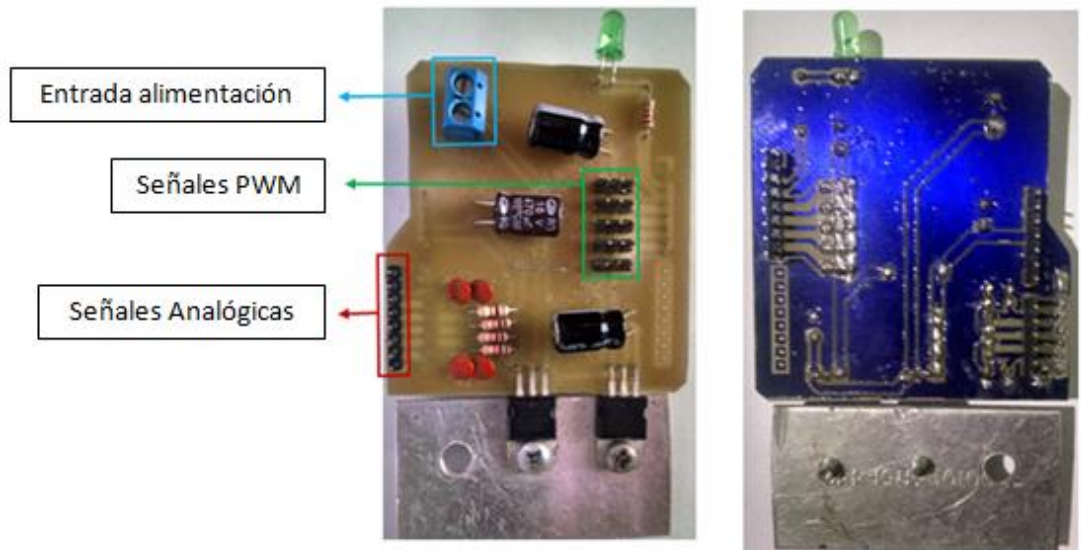
CANTIDAD	DESCRIPCION COMPONENTE
1	Entrada de voltaje (fuente externa, máximo 12V, recomendado 9V)
1	Entrada de voltaje desde el arduino
3	Entrada a tierra (1 desde el arduino)
6	Entrada de señales analógicas (4 fotorresistencias y 2 paneles)
6	Salidas analógicas hacia el arduino
4	Entradas PWM (servos)
4	Salidas PWM
1	Entrada para conectar y alimentar ventilador
3	Condensadores de 470 uf
4	Condensadores de 100 uf
4	Resistencias de 1 KΩ
2	Transistores LM7805
1	Diodo led
1	Platina disipadora de calor

Figura 58. Diagrama esquemático de la placa PCB y Arduino.



Una de las funciones de esta placa a parte de las nombradas anteriormente basándonos en sus ventajas como alternativa de uso como unidad de conexión entre los componentes, es la necesidad de impartir energía suficiente a los 4 servomotores a utilizar y así asegurarnos de su correcto funcionamiento.

Figura 59. Construcción de la placa PCB



Finalmente, debemos conectar los servos y los demás componentes electrónicos como señales de entrada, a la placa PCB y los paneles al sistema de medición ya mencionado. Una vez hecho eso se debe posicionar todo el conjunto de acuerdo a la orientación del algoritmo de control mediante los ejes cardinales como se observa en la siguiente imagen.

Figura 60. Ensamblaje Final

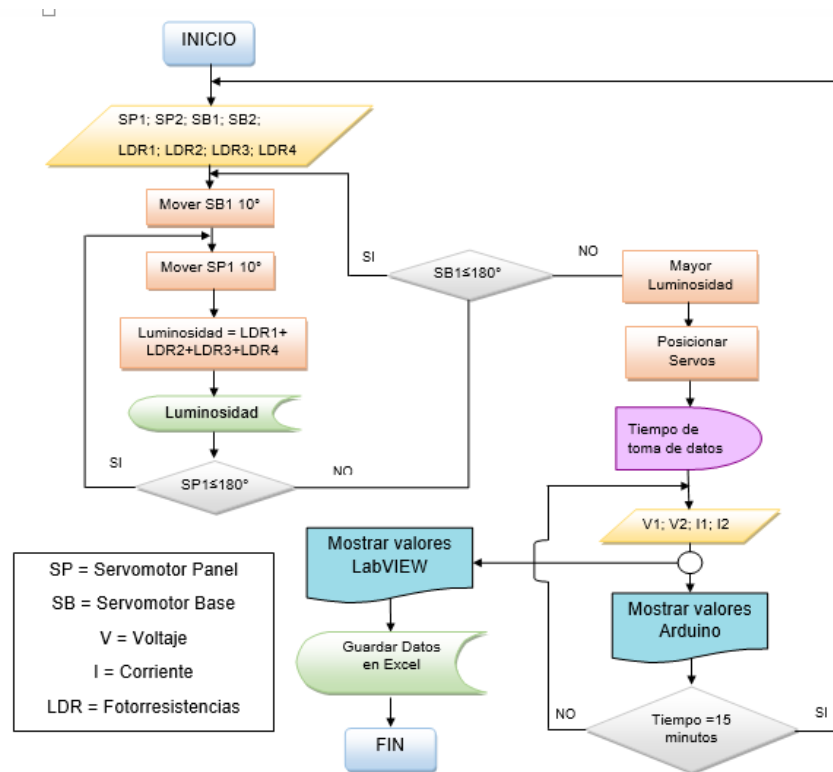


6.3 MODULO DE CONTROL

Una vez construido el conjunto mecánico con la unidad eléctrica y electrónica, además de su respectivo cableado pasamos a desarrollar el algoritmo de seguimiento solar mediante el entorno Arduino. Tal como lo dijimos desde un principio en la descripción de la alternativa del robot seguidor, se usará un Arduino MEGA que controlará todo el sistema, el cuál realizará un escaneo en los 180° con los dos servomotores cada 30 minutos, tomando los datos de la mejor ubicación para el panel. Posicionara un conjunto de paneles que en nuestro caso será simulado por el panel 2 y mediante la comunicación Arduino-LabVIEW guardara el voltaje y la corriente de cada panel respectivamente para ser estudiada más adelante mediante pruebas comparativas.

A continuación mostraremos un diagrama de flujo el cual muestra un resumen en perspectiva del algoritmo seguimiento en donde SP es el servomotor del panel, SB es el servomotor de la base, V es voltaje, I corriente y LDR las fotorresistencias.

Figura 61. Diagrama de flujo del algoritmo de seguimiento solar.



Una vez teniendo una panorámica del algoritmo mediante el diagrama de flujo se procede a explicar paso a paso el código completo mostrado en el anexo F.

6.3.1 Declaración de variables El comienzo del programa está compuesto por la sección de declaración de variables donde empezamos con los dos servos de cada panel mediante una librería que obtenemos al ir a programas/include Library/servo. “<Servo.h>”. Posteriormente declaramos “pos”, “posBase”, “PosPanel1”, “posBase2”, “posPanel2” que usaremos más adelante y las cuatro señales de las fotorresistencias (LDR) de acuerdo al color de su cableado. Indicamos un valor iniciales para el desarrollo correcto del código que hablaremos más adelante.

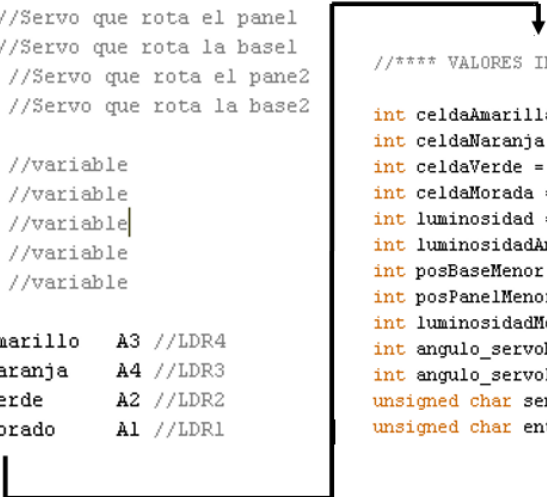
Figura 62. Declaración de Variables.

```
#include <Servo.h>
Servo panelServo; //Servo que rota el panel
Servo baseServo; //Servo que rota la base1
Servo panelServo2; //Servo que rota el pane2
Servo baseServo2; //Servo que rota la base2

int pos = 0; //variable
int posBase = 0; //variable
int posPanel = 0; //variable
int posBase2 = 0; //variable
int posPanel2 = 0; //variable

#define amarillo A3 //LDR4
#define naranja A4 //LDR3
#define verde A2 //LDR2
#define morado A1 //LDR1

//**** VALORES INICIALES****
int celdaAmarilla = 0;
int celdaNaranja = 0;
int celdaVerde = 0;
int celdaMorada = 0;
int luminosidad = 5000; //asigno inicialmente un valor alto
int luminosidadAnterior = 5000;
int posBaseMenor = 0;
int posPanelMenor = 0;
int luminosidadMenor = 5000;
int angulo_servoB=180; // VARIABLES DE REGISTRO DEL ANGULO
int angulo_servoP=180; // VARIABLES DE REGISTRO DEL ANGULO
unsigned char sentido = 0;
unsigned char entrada = 0;
```



6.3.2 Inicialización del programa En esta parte viene método “void setup()”. En el lenguaje Arduino el uso de este método es de carácter obligatorio, por lo que no será posible escribir un algoritmo sin contar con dicha función.

El “setup()” es la parte encargada de recoger la configuración de entradas y salidas. Iniciamos indicando un puerto serial de 57600 que es la velocidad en baudios de transmisión de datos con un tipo de espera de 100 milisegundo posteriormente asignamos los pines PWM 12, 11, 10 y 9 de la placa PCB al Arduino mediante el uso del método “attach” sacado de librería anteriormente mencionada para controlar los cuatro servos. Luego establecemos una posición posterior de los servos “posPanel” y “posBase” utilizados más adelante.

Figura 63. El “Void setup()” del código.

```
unsigned char sentido = 0;
unsigned char entrada = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(57600);
  delay(100);
  baseServo.attach(12); //12 panel1
  panelServo.attach(11); //11 base1
  baseServo2.attach(10); //10 panel2
  panelServo2.attach(9); //9 base2
  posBase = 0;
  posPanel = 0;
  Panel(20, posPanel);
  Base(20, posBase);
  Serial.println("Conectado");
}
```

6.3.2 Movimiento de los servos La otra función principal del robot es la de movimiento, Que se encuentra en la parte final del código dentro de la función “void loop()” que será explicada en el siguiente inciso para así llevar un orden explicación adecuado.

Teniendo las variables “angulo_servoB” y “angulo _servoP” la cual están declaradas inicialmente como 180° que es valor máximo de movimiento de los servos. Mediante un “for” indicamos que se mueva cada grado en un determinado tiempo condicionándolo para un movimiento de retorno. Como se observa en la siguiente figura explicada por cada renglón del código.

Figura 64 Movimiento del servo base

```
void Base(unsigned int tiempo, unsigned int rotacion)
{
    if(rotacion>angulo_servoB) //SI EL ANGULO ANTERIOR ES MENOR QUE EL DESEADO
    {
        for( ; angulo_servoB < rotacion; angulo_servoB++) //AUMENTA UN GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            baseServo.write(angulo_servoB); // SUBIR BRAZO
            delay(tiempo); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    if(rotacion<angulo_servoB)//SI EL ANGULO ANTERIOR ES MENOR QUE EL DESEADO
    {
        for(; angulo_servoB > rotacion; angulo_servoB--) //DISMINUYE UN GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            baseServo.write(angulo_servoB); //BAJAR BRAZO
            delay(tiempo); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    angulo_servoB=rotacion;// MEMORIZA EL ANGULO DESEADO PARA EL SERVOMOTOR 1
}
```

Figura 65. Movimiento del servo panel

```
void Panel(unsigned int tiempo2, unsigned int rotacion2)
{
    if(rotacion2>angulo_servoP) //SI EL ANGULO ANTERIOR ES MAYOR QUE EL DESEADO
    {
        for( ; angulo_servoP < rotacion2; angulo_servoP++) //AUMENTA UN GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            panelServo.write(angulo_servoP); // SUBIR BRAZO
            delay(tiempo2); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    if(rotacion2<angulo_servoP)//SI EL ANGULO ANTERIOR ES MENOR QUE EL DESEADO
    {
        for(; angulo_servoP > rotacion2; angulo_servoP--) //DISMINUYE UN GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            panelServo.write(angulo_servoP); //BAJAR BRAZO
            delay(tiempo2); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    angulo_servoP=rotacion2;// MEMORIZA EL ANGULO DESEADO PARA EL SERVOMOTOR 1
}
```

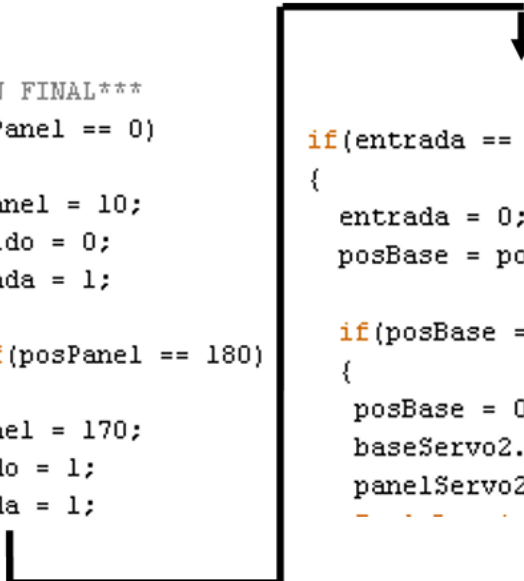
6.3.3 Ubicación final Con el “loop()” el programa ejecutara cíclicamente los siguientes pasos: Primero leerá las entradas analógicas de cada fotorresistencia para hacer una sumatoria durante un ciclo de movimiento del servo base del robot seguidor cada 10° (posBase) y de 180° para el servo panel (posPanel).

Luego de terminar el ciclo y con los datos almacenados de las sumatoria de cada valor de la fotorresistencia y con la suma arbitraria tomada de 5000 para la luminosidad, la cual indica que esta en total oscuridad, entre más bajo sea el valor, mayor será la intensidad e incidencia del sol, por lo tanto, el panel se ubicará en ese lugar, y obtendrá la energía solar máxima como se explicó en la configuración de conexión de la fotorresistencia ver Figura 56. Cogemos el punto de la menor luminosidad y posicionamos los servos del panel 2 mediante la función “write()”.

Figura 66 Código Posición final

```
*POSICION FINAL***
  if(posPanel == 0)
  {
    posPanel = 10;
    sentido = 0;
    entrada = 1;
  }
  else if(posPanel == 180)
  {
    posPanel = 170;
    sentido = 1;
    entrada = 1;
  }
  if(entrada == 1)
  {
    entrada = 0;
    posBase = posBase + 10;

    if(posBase == 190)
    {
      posBase = 0;
      baseServo2.write(posBaseMenor);
      panelServo2.write(posPanelMenor);
      -----
    }
  }
```



6.3.4 Interfaz Labview Las Datos de voltaje y corriente obtenidos mediante el sistema de medición son enviadas al computador donde gracias a un programa realizado en el software de National Instruments llamado LabVIEW se pueden mostrar en una interfaz y guardar en Excel para su posterior análisis.

Figura 67. Interfaz gráfica en LabVIEW para extraer datos.



El programa creado en LabVIEW permite una comunicación con el usuario mostrando los valores arrojados por el monitor serial de Arduino. Pero para que el programa Arduino se ejecute de manera correcta en LabVIEW debemos crear otro código Arduino aparte donde eliminaremos cualquier letra que nos imprima, dejando así solo los valores obtenidos del sistema de medición espaciados por un (*) que le indica a LabVIEW la separación de datos como se observa en las Figuras 68 y 69.

Figura 68. Monitor serial del código Arduino original.

```
299 Voltaje Panel 1: 0.27      Voltaje Panel2 : 0.27  Corriente Panel 1: -15.92  Corriente Panel2 : -15.93
298 Voltaje Panel 1: 0.21      Voltaje Panel2 : 0.21  Corriente Panel 1: -16.22  Corriente Panel2 : -16.22
297 Voltaje Panel 1: 0.21      Voltaje Panel2 : 0.21  Corriente Panel 1: -16.22  Corriente Panel2 : -16.22
296 Voltaje Panel 1: 0.21      Voltaje Panel2 : 0.21  Corriente Panel 1: -16.25  Corriente Panel2 : -16.25
295 Voltaje Panel 1: 0.21      Voltaje Panel2 : 0.21  Corriente Panel 1: -16.25  Corriente Panel2 : -16.25
294 Voltaje Panel 1: 0.20      Voltaje Panel2 : 0.20  Corriente Panel 1: -16.25  Corriente Panel2 : -16.25
293 Voltaje Panel 1: 0.20      Voltaje Panel2 : 0.20  Corriente Panel 1: -16.25  Corriente Panel2 : -16.25
```

Como se observa tomamos valores aleatorios de voltaje y corriente con el fin de solo visualizar la modificación del código para implementar en LabVIEW.

Figura 69. Monitor serial del código Arduino modificado para pruebas LabVIEW.

```
299*0.26*0.25*-15.93*-15.94
298*0.23*0.23*-16.04*-16.04
297*0.24*0.24*-16.02*-16.03
296*0.24*0.24*-16.01*-16.02
295*0.24*0.24*-16.02*-16.02
294*0.24*0.24*-16.01*-16.01
293*0.23*0.23*-16.06*-16.06
```

Como se observa en la figura todos los valores fueron apartados por un (*) el cual le indica a LabVIEW la separación de datos y poder ser visualizados en la interfaz. Una vez modificado y cargado los códigos para las diferentes pruebas en la tarjeta Arduino pasamos a diseñar y construir la programación grafica LabVIEW la cual explicaremos cada bloque en la Tabla 14.

Figura 70. Programación grafica LabVIEW para extraer datos.

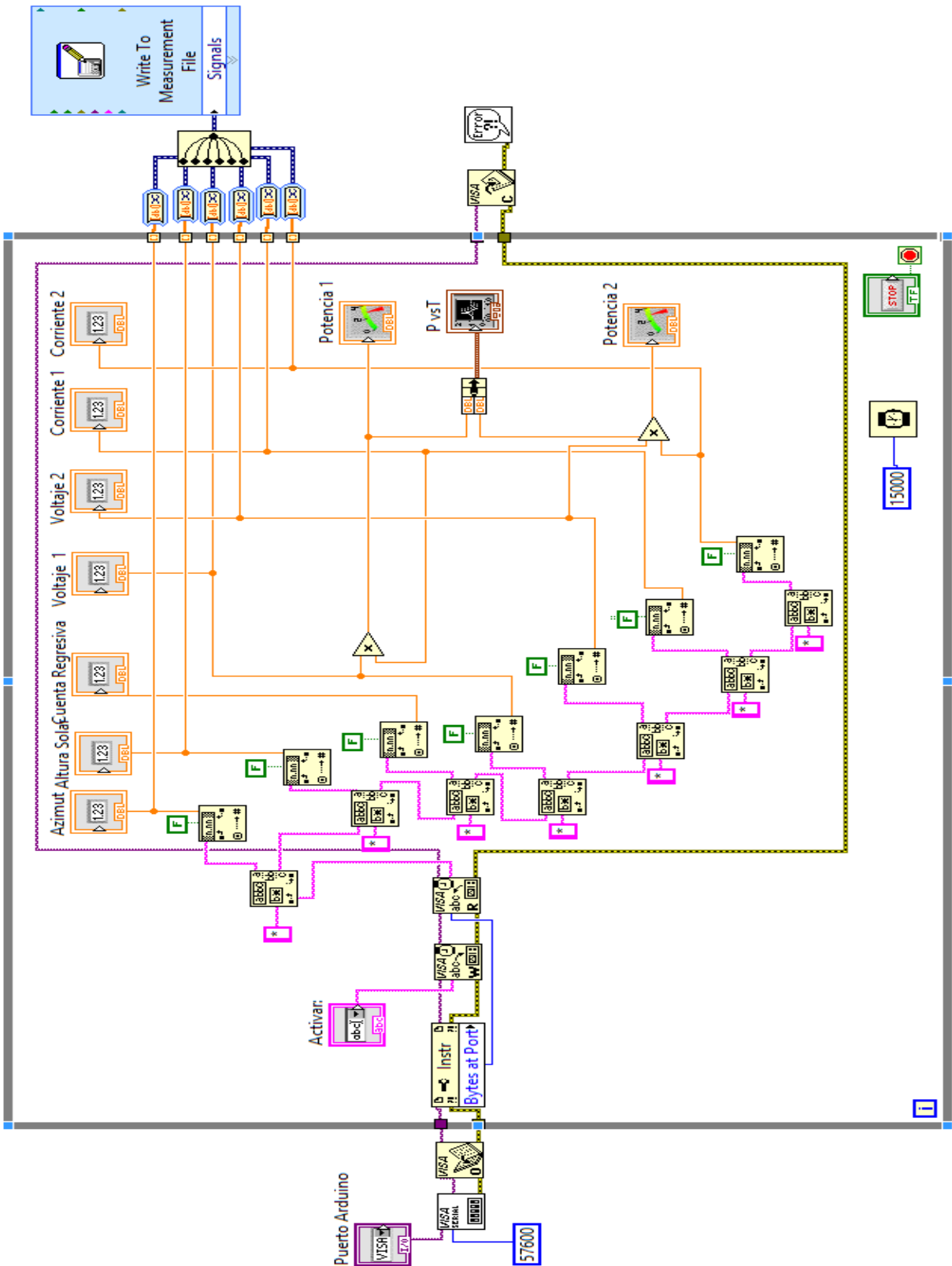


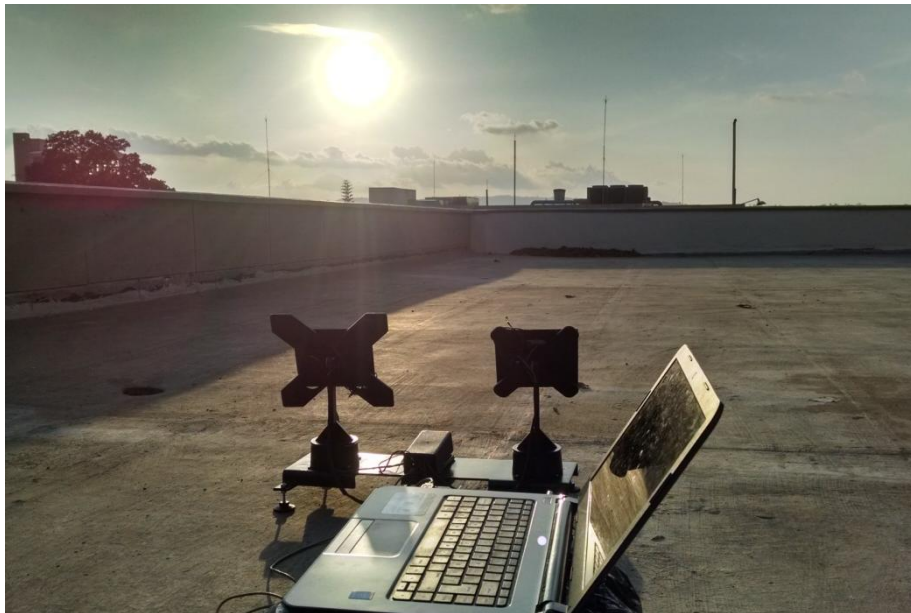
Tabla 13. Descripción de bloques LabVIEW

NOMBRE	FUNCIÓN	SIMBOLO
VISA Configure Serial Port	Para tener acceso al puerto serial Arduino usando LabVIEW se debe iniciar una sesión VISA	
VISA Open Function	Abre una sesión en el dispositivo especificado por el nombre del recurso VISA	
Property Node	Obtiene (lee) y / o establece (escribe) las propiedades de una referencia.	
VISA Write Function	Escribe los datos en el monitor serial Arduino proporcionado una orden a ejecutar	
VISA Read Function	Lee el número especificado en bytes por el recurso VISA y devuelve los datos en el búfer de lectura.	
Match Pattern Function	Busca la expresión regular en cadena. Si la función encuentra un indicativo como el (*), divide la cadena de caracteres.	
Fract/Exp String To Number Function	Interpreta los caracteres del 0 al 9, más, menos, e, E y el punto decimal (generalmente punto). La letra F en la parte superior indica mostrar decimales.	
Meter	Indicador de potencia de los paneles	
Waveform Chart	Indicador grafico de potencia de los paneles a través del tiempo	
Multiply	Es utilizado para introducir operaciones matematicas como la multiplicación	
Wait	Tiempo en que tarda generar un dato en milisegundos. En 30 minutos de toma de datos son 120 datos obtenidos	
Write To Measurement File Express VI	Permite tomar los datos del proceso de medición guardandolos en un documento de excel.	
WHILE LOOP	El ciclo while ejecuta el código que contiene hasta la terminal condicional, una terminal de entrada recibe un valor Booleano.	
VISA Close Function	Cierre de la sesión ejecutado por el recurso VISA.	
Simple Error Handler VI	Indicador de error si el programa no compila bien	

7. PUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Bajo las condiciones de los objetivos planteados para el desarrollo del robot seguidor que funcionará como control para el posicionamiento adecuado de un conjunto de paneles solares modelado en este caso por un segundo panel que contiene de igual manera dos servomotores como actuadores para los dos grados de libertad, se realizaran las debidas pruebas de funcionamiento del algoritmo.

Figura 71. Puesta en marcha de toma de datos



7.1 CALIBRACIÓN

Previamente en el apartado de diseño del conjunto eléctrico del circuito de medición, se realizó la debida calibración de los sensores de corriente que me proporcionaran las señales de las mismas, como también de las señales de voltaje por medio del divisor de tensión.

Como pruebas piloto se decidió implementar dos fuentes de alimentación externas (como reemplazo del funcionamiento de los dos paneles fotovoltaicos), que por efectos prácticos, me proyectaran valores de voltaje y corrientes, estables y fijos facilitando de esta manera la lectura de comparación proveniente de un multímetro Contra los resultados del código a implementar.

Las líneas de código respectivas que me permitirán realizar la lectura y el procesamiento de estas reduciendo el error por medio de filtros que implementan la media aritmética de las señales se muestra a continuación.

Figura 72. Código final de lectura de las señales de corriente y voltaje con filtro.

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  float Sensibilidad1=0.145; //sensibilidad en
  Voltios/Amperio para sensor de 5A
  float Sensibilidad2=0.145;
  float DivisorTension1 = 1.5;
  float DivisorTension2 = 1.5;
  float muestras = 5000;
  float voltajeP1;
  float voltajeP2;
  float corrienteP1;
  float corrienteP2;
  float sensorA8
  float sensorA9;
  float sensorA10;
  float sensorA11;
  float sumaV1=0;
  float sumaV2=0;
  float sumaC1=0;
  float sumaC2=0;
}

for(int i=0;i<muestras;i++)
{
  sensorA8 = analogRead(A8) * (4.8 / 1023.0);
  sensorA9 = analogRead(A9) * (4.8 / 1023.0);
  sensorA10 = analogRead(A10) * (5.028 / 1023.0);
  sensorA11 = analogRead(A11) * (5.028 / 1023.0);
  sumaV1=sumaV1+(sensorA8*DivisorTension1);
  sumaV2=sumaV2+(sensorA9*DivisorTension2);
  sumaC1=sumaC1+(sensorA10 - 2.5)/Sensibilidad1;
  sumaC2=sumaC2+(sensorA11 - 2.5)/Sensibilidad2;
}
voltajeP1=sumaV1/muestras;
voltajeP2=sumaV2/muestras;
corrienteP1=sumaC1/muestras;
corrienteP2=sumaC2/muestras;

//muestra cuenta regresiva en segundos en conjunto

Serial.print(contadorMinutos-i);
Serial.print(" Volt Panel 1: "); Serial.print(voltajeP1);
Serial.print("\t Volt Panel2: "); Serial.print(voltajeP2);
Serial.print("\t Corr Panel 1: "); Serial.print(corrienteP1);
Serial.print("\t Corr Panel2: "); Serial.println(corrienteP2);

```

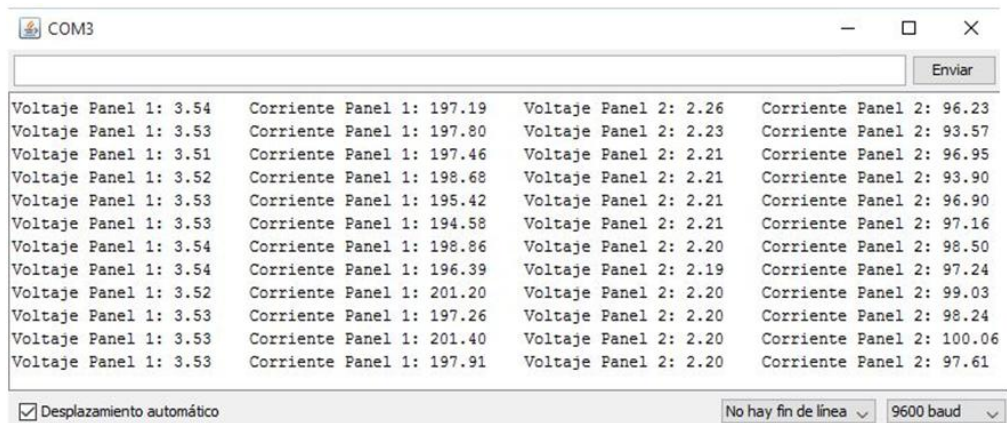
Se usaron fuentes de 9V y de 5V; los resultados se mostraran a continuación:
Lectura de voltaje y corriente por medio del multímetro

Figura 73. Lectura de voltaje y corriente por medio del multímetro.



Estos son los valores de tensión como de corriente que pasan a través de la carga, medidos con el multímetro que nos proporciona una media confiable y nos sirve de comparación contra la medición dada por el microcontrolador.

Figura 74. Resultado monitor serial de las señales de voltaje y corriente

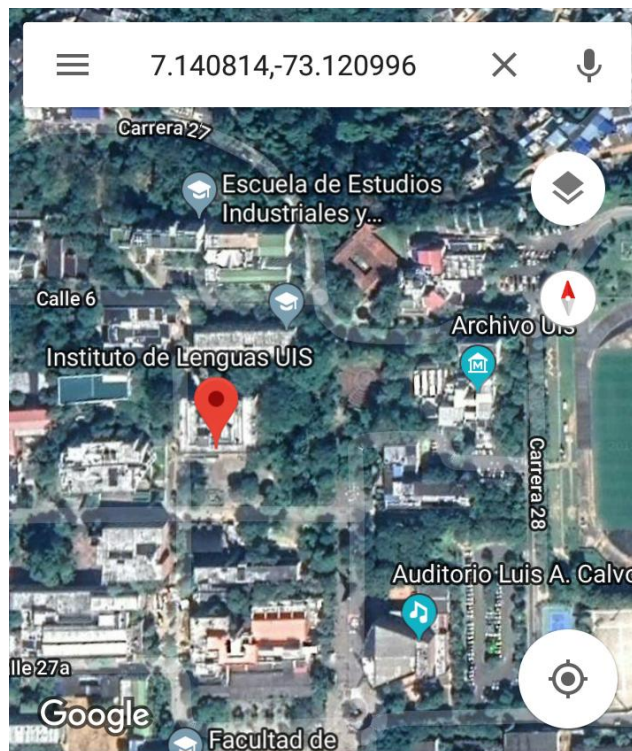


De tal manera que confirmamos el buen funcionamiento del circuito implementado, como del algoritmo de lectura y procesamiento de la información a suministrar por medio del monitor serial que serán enlazados con la interfaz de usuario labVIEW, de tal manera que se puedan guardar todos los datos durante las pruebas necesarias, para realizar los pertinentes análisis de cantidad de energía capturada y aprovechamiento de ésta, por medio del sistema de seguimiento comparándolo de forma experimental a el caso en que no se implementara.

7.2 DESCRIPCION DEL MONTAJE

Las pruebas se realizaron en la ciudad de Bucaramanga - Colombia, Se instaló en un lugar apropiado y despejado que me asegure la no presencia de sombras producto de edificaciones o zonas verdes con árboles.

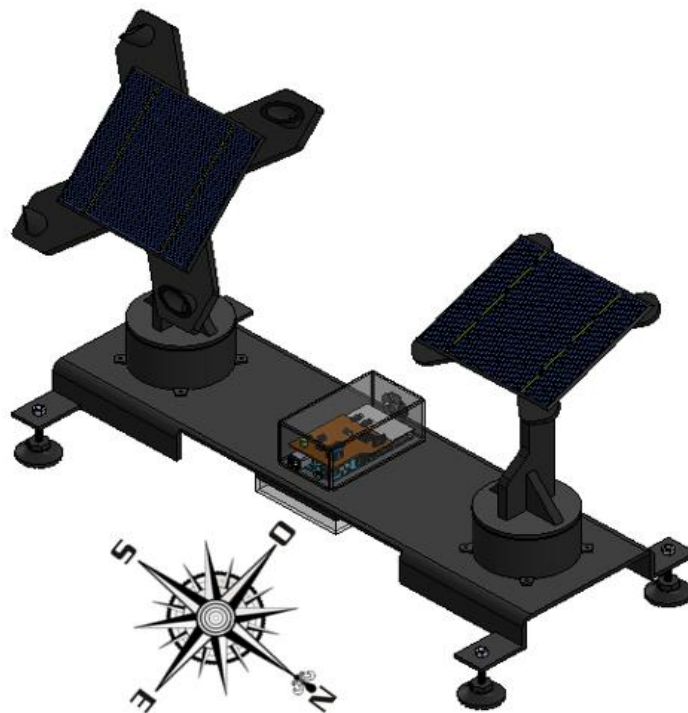
Figura 75. Ubicación geográfica de la realización de las pruebas.



Biblioteca Central UIS

Para el montaje inicial del, se orientó ayudándonos con una brújula de tal manera que el eje acimutal de los paneles coincida con la línea sentido Sur – Norte. Se asegura que todas las uniones de entrada de las señales se encuentren correctamente conectadas, junto con el circuito de medición de potencia.

Figura 76. Orientación en los Ejes Cardinales



Se realiza la comunicación con el ordenador, donde se compila el sketch y se carga el algoritmo de arduino. Posteriormente se ejecuta la interfaz de labVIEW por el mismo puerto serial para poder visualizar y obtener los datos a cuarto.

Las pruebas iniciaron desde las 7:00 am hasta las 5:00 pm. Con un rango de tiempo total de prueba de 10 horas en la cual cada 15 segundos se realizara una muestra para mayor percepción real de la cantidad de energía captada, debido a las condiciones geograficas, sabiendo que es propenso a que se presenten

fluctuaciones de la radiación incidente causa de la nubosidad y variaciones meteorológicas del día.

7.3 PRUEBAS

Figura 77. Ejecución del conjunto robot-seguidor durante las pruebas



Para esto se realizaron tres tipos de pruebas:

Tabla 14. Configuración del montaje de las pruebas a realizar

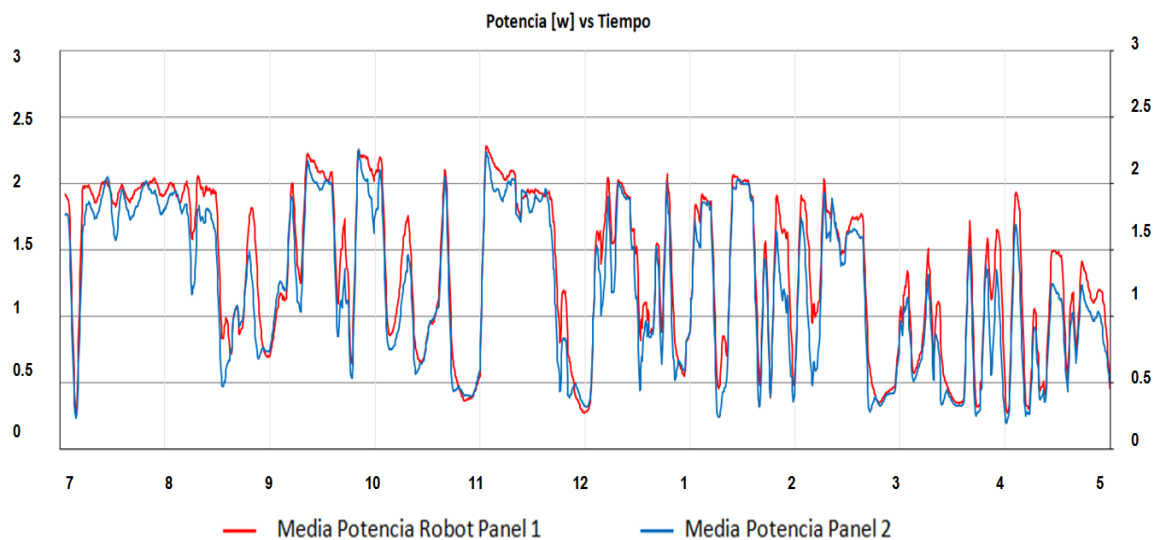
Numero de prueba	PANEL	Configuración
1.	Panel 1 (ROBOT)	Con sistema de seguimiento. 2 grados de libertad
	Panel 2	Con sistema de seguimiento. 2 grados de libertad
2.	Panel 1 (ROBOT)	Estático con altura solar 90°
	Panel 2	Estático con altura solar 90°
3.	Panel 1 (ROBOT)	Con sistema de seguimiento. 2 grados de libertad.
	Panel 2	Estático con altura solar 90°

Al medir cada voltaje y corriente podemos obtener la potencia entregada por cada panel para cada instante. Al trazar la curva Potencia vs Tiempo integramos la función de la curva obtenida en el tiempo total y se obtiene la energía producida por el panel.

$$Energia\ producida = \int Potencia$$

7.3.1 Prueba 1 (Robot y Panel 2 con seguimiento solar) Primeramente se desarrolló el debido análisis de las pruebas con los dos paneles bajo el control del seguimiento. Se espera que arrojen un comportamiento equivalente entre ellos mismos de manera que nos aseguramos que el conjunto se encuentra trabajando de manera correcta.

Figura 78. Grafica potencia panel 1 y 2 con control de seguimiento



Las pruebas se realizaron los días 8 al 10 de enero del 2018. A partir de la hora establecida. Las curvas para este caso nos muestran una tendencia a mantenerse constante la potencia generada, alrededor de los 2 [w] con perturbaciones considerables producto de las fluctuaciones por el paso de masas de nubes.

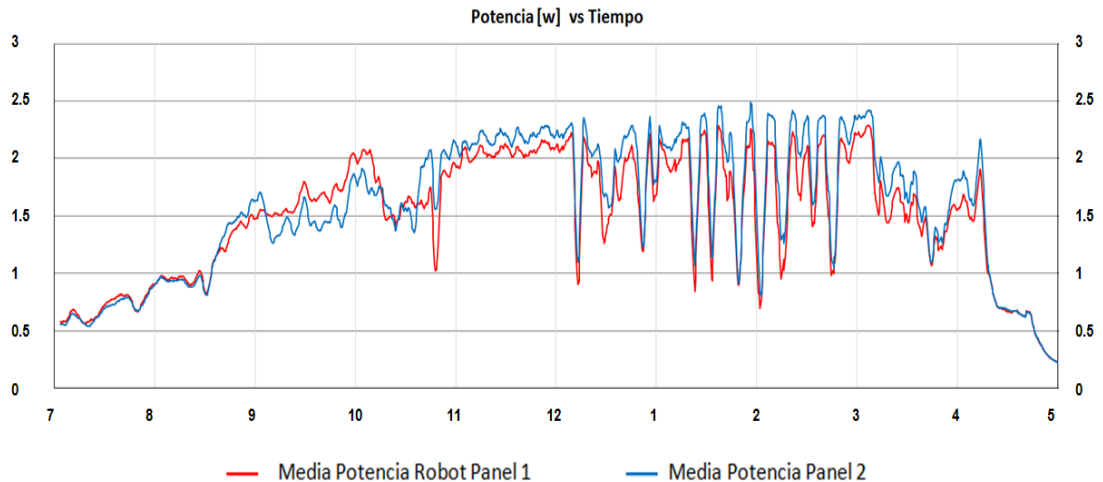
En general nos arroja una conducta como lo esperado, semejantes entre los dos paneles. Para este caso en particular vemos un día poco productivo por grandes caídas de radiación incidente.

Tabla 15. Cantidad de energía entregada: Robot y Panel 2 con seguimiento

Energía producida Prueba 1	
Panel Robot seguidor	1.73 [W/Hora]
Panel 2	1.64 [W/Hora]

7.3.2 Prueba 2 (Robot y Panel 2 estáticos 90° altura solar) ahora se efectúan la toma de datos bajo las condiciones en las que los dos paneles se encuentran sin el control de seguimiento solar, ubicados horizontalmente 90° de altura solar, simulando un sistema fijo.

Figura 79. Grafica potencia panel 1 y 2 horizontales sin control de seguimiento



Las pruebas se realizaron los días 11 al 13 de enero del 2018. El comportamiento para esta configuración a diferencia de implementar el sistema de seguimiento, es la cantidad de energía capturada en las primeras horas de la mañana y las horas finales de la tarde. En este caso vemos la conducta lógica de crecimiento

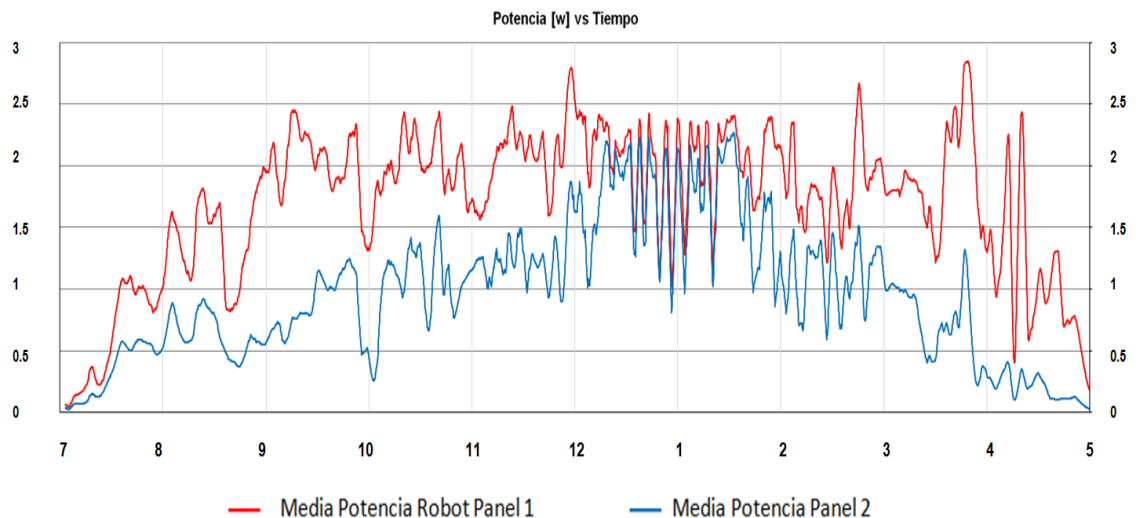
progresivo a las primeras horas, mientras el sol obtiene altura. Para las horas alrededor del mediodía, captura la mayor cantidad de radiación. De igual manera mientras el sol pierde altura avanzando las horas de la tarde, va reduciendo la potencia debido al mismo efecto de que los rayos no llegan de manera perpendicular a la superficie del panel. La energía capturada durante la prueba, depende de igual manera de las condiciones de ese día el cual se presenciaron pocas interrupciones arrojando de esta manera buenos resultados.

Tabla 16. Cantidad de energía entregada: Robot y Panel 2 Estáticos

Energía producida Prueba 2	
Panel Robot seguidor	1.60[W/Hora]
Panel 2	1.68[W/Hora]

7.3.3 Prueba 3 (Robot con seguimiento solar, Panel 2 90° altura solar) Para esta ultima configuración, se puede llegar a determinar la comparación de la cantidad de energía que es capaz de entregar de mas, si no se tuviera el sistema de seguimiento.

Figura 80. Grafica potencia panel 1 con seguimiento y panel 2 horizontal sin control de seguimiento



Las pruebas se realizaron los días 14 al 16 de enero del 2018. Como es evidente la mayor captación de energía del sistema de seguimiento en las pruebas realizadas bajo un clima ideal. Esto depende como bien sabemos de las condiciones del terreno en que se implemente, ya que entre más despejado se encuentre el cielo, el seguidor puede sacar ventaja mayormente de la radiación solar de las primeras horas antes del medio día y finalizando la tarde. De lo contrario la potencia generada será mayormente por radiación difusa si se encuentra bajo condiciones de funcionamiento en un lugar con mucha nubosidad o precipitaciones, por el cual la cantidad de energía aprovechada será considerablemente menor.

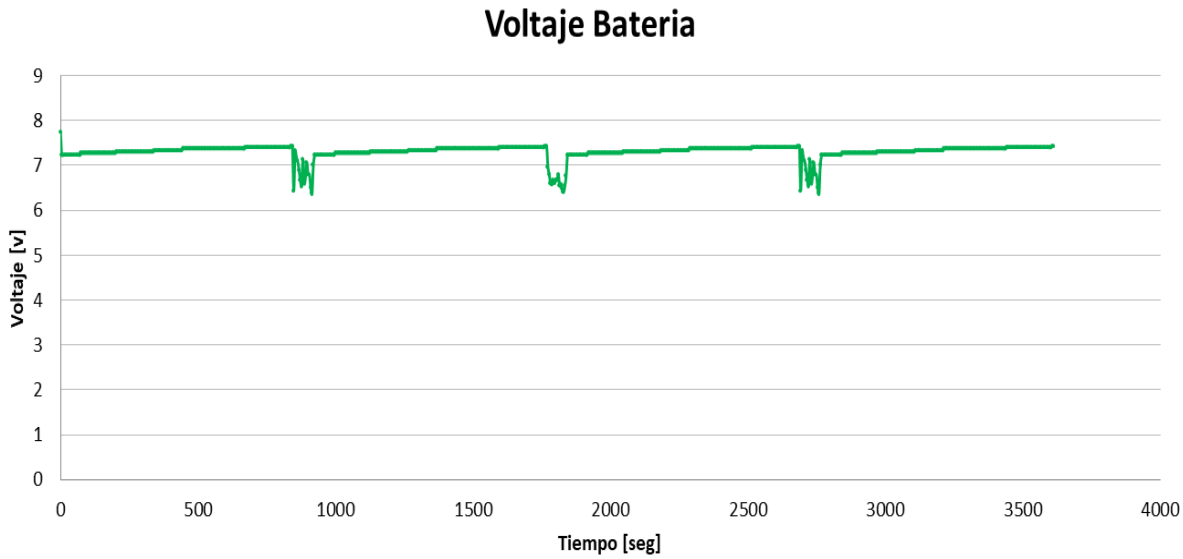
Tabla 17. Cantidad de energía entregada: Robot con seguimiento y Panel 2 Estático.

Energía producida Prueba 3	
Panel Robot seguidor	2.50[W/Hora]
Panel 2	1.47[W/Hora]

Se determina un aprovechamiento de energía captada por el seguidor frente al panel estático en un 40 % aproximadamente para el promedio de las pruebas realizadas bajo esta configuración.

7.3.4 Comportamiento de la Batería Con una batería de 9V y 2A logramos hacer funcionar los servomotores de manera correcta, y su carga será permanente ya que los dos paneles recolectan la energía suficiente para cargarla y mantener funcionando el circuito de forma correcta, en la gráfica de la Figura 77 observamos la tensión de la batería vs el tiempo, mientras funciona el sistema total con un tiempo de escaneo cada 15 minutos.

Figura 81. Grafica voltaje de la Bateria



8. CONCLUSIONES

- Los servomotores se ubicaron de manera perfecta, dependiendo de la señal que proporciona el Arduino a la hora de re-ubicarlo.
- La comparación de energía eléctrica con el algoritmo de seguimiento es mayor a que si estuviesen en una sola posición.
- Las fotoresistencias proveen la máxima incidencia del sol de una forma correcta debido a su buena sensibilidad de luz.
- El sistema logra ser totalmente autónomo, gracias a la captura de la energía solar proporcionada por los dos paneles fotovoltaico.
- Si el sistema hace un escaneo cada 15 minutos la batería se mantiene cargada y permite el funcionamiento autónomo del robot, solo si está bajo óptimas condiciones de radiación solar.
- No se tomó en cuenta los días con precipitaciones altas, solo se realizaron en 7 días soleados y con buen clima.
- La presencia de nubes esporádicas no afectan el funcionamiento del sistema, sin embargo, las perturbaciones altas hacen poco eficiente el mismo.
- Es necesario realizar una caracterización más amplia para lograr obtener una ecuación y realizar un posicionamiento PID para la zona, ya que las perturbaciones son muy altas, y dependiendo de la temporada, tenemos una diferente ubicación para la mayor luminosidad; sin embargo, con el sistema totalmente elaborado logramos detectar la posición precisa para la mayor incidencia del sol.

9. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones a lo largo de esta área o con ayuda de este proyecto recomendamos:

- Caracterizar la zona de forma más amplia, considerando las precipitaciones en el ambiente, para esto se pueden dirigir a la entidad meteorológica de cada país, por ejemplo en Colombia es el IDEAM (Instituto Meteorológico de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Este control se puede realizar con ayuda de un PID.
- Utilizar un PLC para tener un mejor funcionamiento del sistema, con este ya se puede utilizar de forma más masiva y/o industrial.
- En un principio no tuvimos en cuenta que un panel no lograba alimentar la batería por tanto tuvimos que hacer una conexión en serie con el panel 2 para que el sistema lograra ser autónomo se recomienda comprar un panel de mayor capacidad.
- Cubrir mejor la parte electrónica al sistema para no tener problemas cuando el clima presente precipitaciones o lluvias.

BIBLIOGRAFIA

MIRANDA, Juan y GÓMEZ, Ricardo. Diseño, construcción y evaluación de un sistema de colector fotovoltaico con seguidor solar de 2 Grados de libertad. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander. Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2011. 136 p.

SUMANO, Jhonatan. Diseño y construcción de un sistema de seguimiento fotovoltaico. Trabajo de grado Ingeniero Mecatronico. Huajuapán de León: Universidad Tecnológica De La Mixteca. Departamento de Ingeniería Mecatronica. 2012. 98 p.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. 3 ed. Madrid: Person Educacion. 2010. 894 p.

HARPER, Enríquez. Instalaciones y sistemas fotovoltaicos. 1 ed. México: Limusa. 1998. p.334.

SANCHEZ, Miguel. Energía solar fotovoltaica. México: Limusa. 2008. p. 314.

FERNANDEZ, Jose. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica y termoeléctrica. Madrid: Mundi-prensa, 2010. p. 542.

MENDEZ, Javier; CUERVO, Rafael. Energía solar fotovoltaica. 2 ed. Madrid: Fundación Confemetal. 2007. p.248.

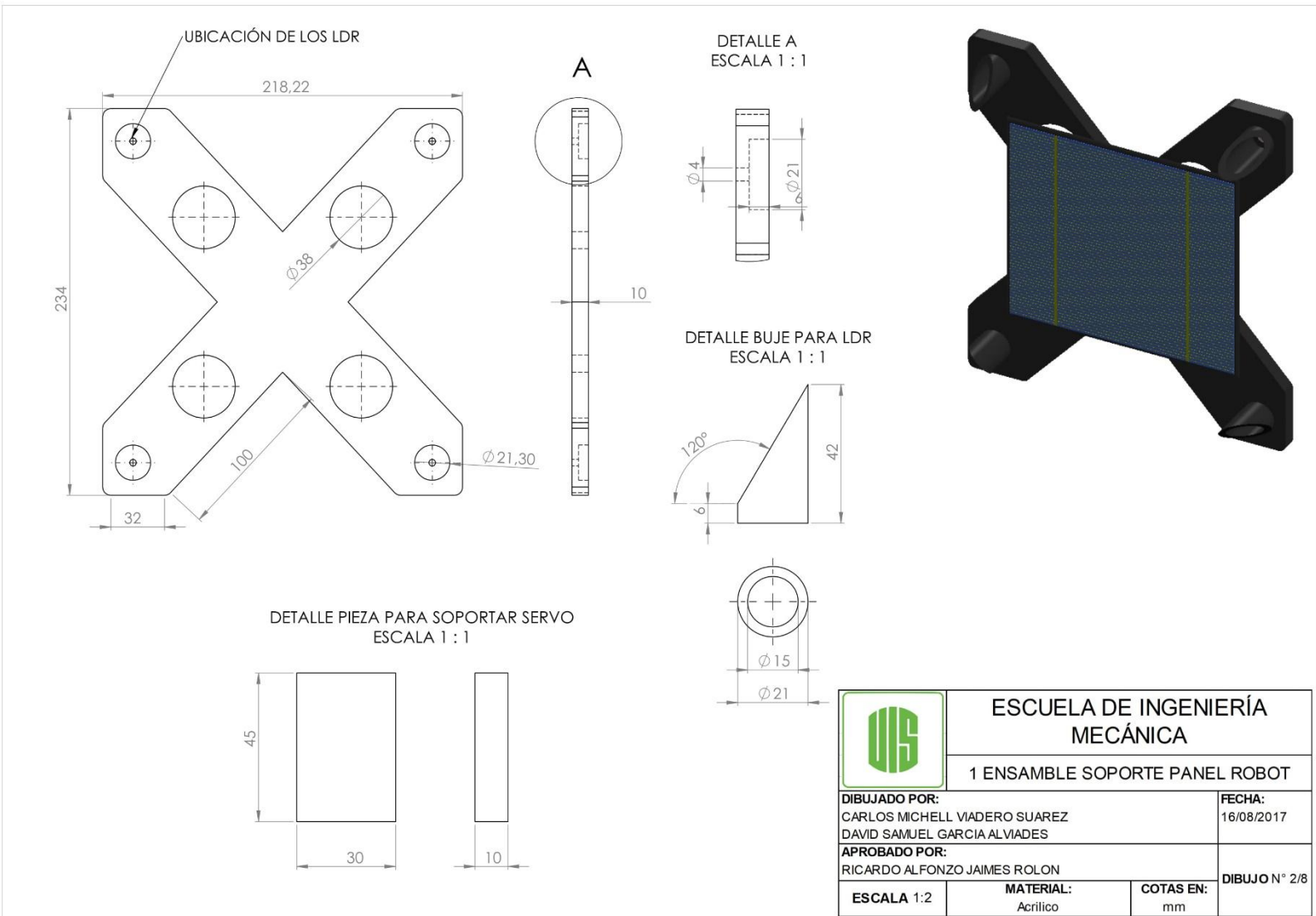
INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES: Atlas De Radiación Solar De Colombia. [En línea] Bogotá 2005, (Recuperado el 4 de agosto del 2015). Disponible en: <<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21129/.../2a207e33-fe43-4aa3-930d-70ba60b10d57>>

ANEXOS

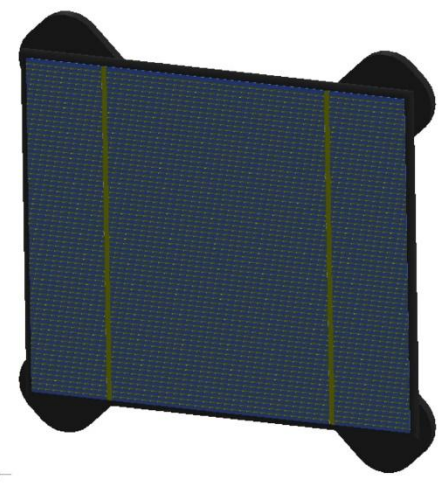
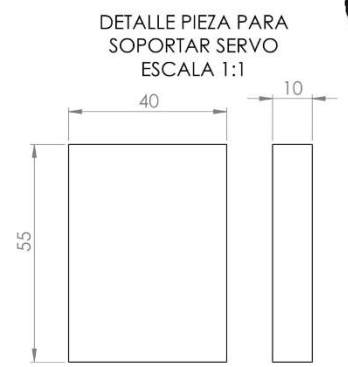
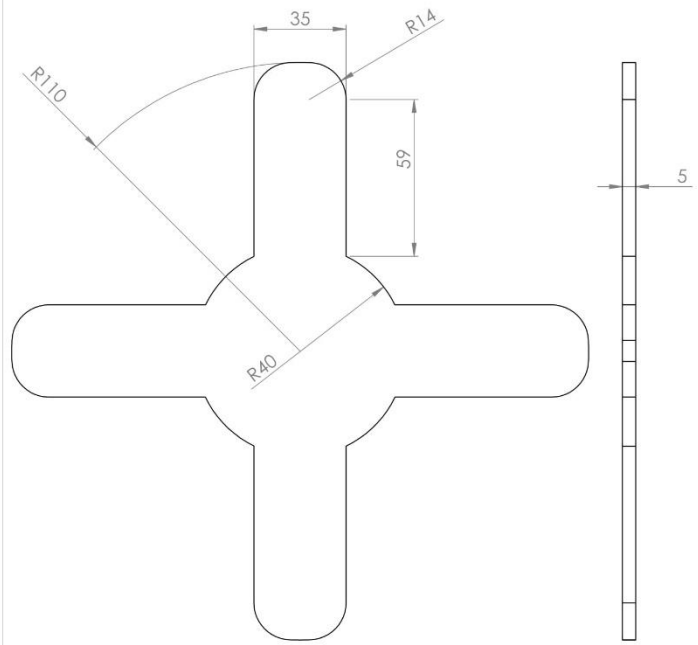
Anexo A. Planos de diseño del conjunto.

SUB CONJUNTO N°	NOMBRE	CANT.
1	Ensamble soporte panel robot	1
2	Ensamble soporte panel 2	1
3	Ensamble soporte vertical	2
4	Base giratoria servo	2
5	Unidad de control	1
6	Sistema de medición	1
7	Base estructura	1

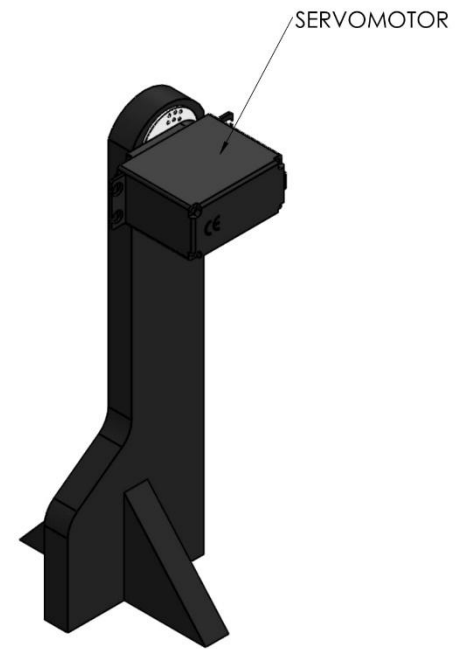
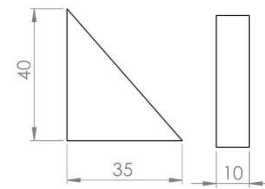
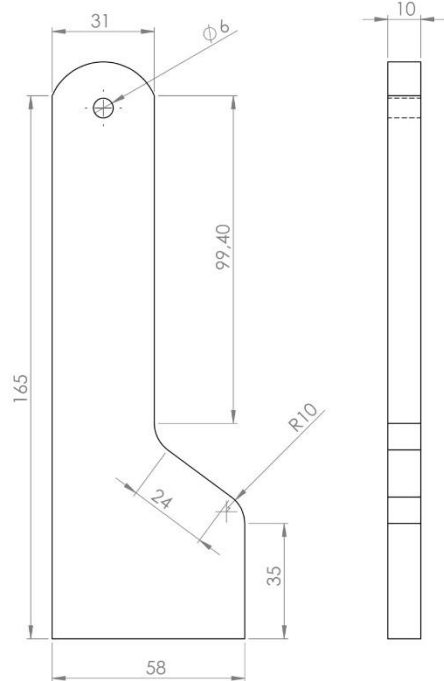
	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
	VISTA ISOMETRICA EXPLOSIONADA	
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCIA ALVIADES		FECHA: 16/08/2017
APROBADO POR: RICARDO ALFONZO JAMES ROLON		DIBUJO N° 1/8
ESCALA 1:5	MATERIAL: Acero, Plastico y Acrílico	




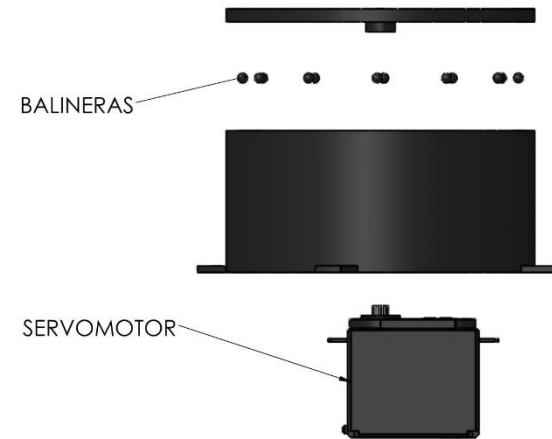
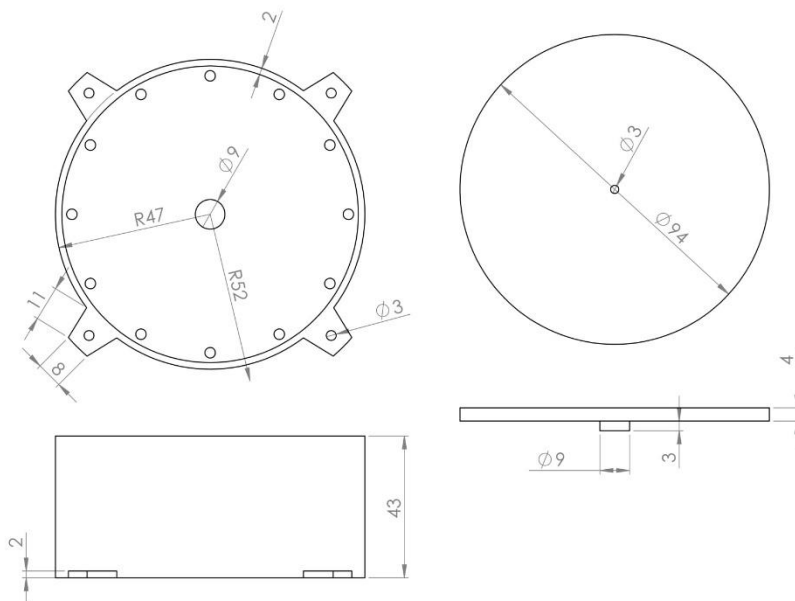
	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
	1 ENSAMBLE SOPORTE PANEL ROBOT	
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCIA ALVIADES	FECHA: 16/08/2017	
APROBADO POR: RICARDO ALFONZO JAIMES ROLON	DIBUJO N° 2/8	
ESCALA 1:2	MATERIAL: Acrílico	COTAS EN: mm



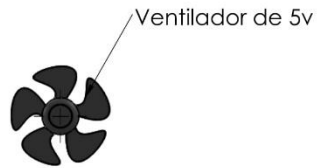
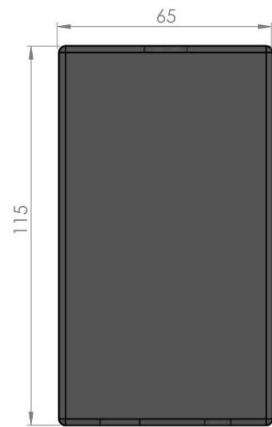
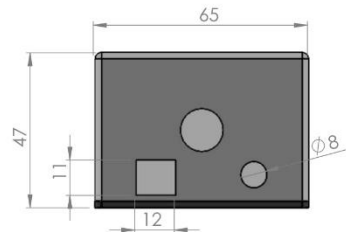
	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
	2. ENSAMBLE SOPORTE PANEL 2	
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCIA ALVIADES		FECHA: 16/08/2017
APROBADO POR: RICARDO ALFONZO JAIMES ROLON		DIBUJO N° 3/8
ESCALA 1:1.5	MATERIAL: Acrílico	



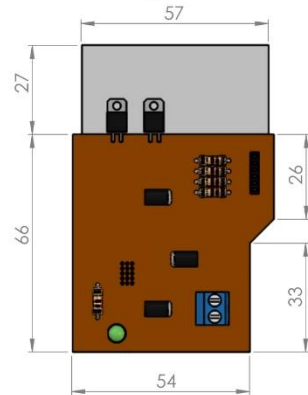
	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
	3. ENSAMBLE SOPORTE VERTICAL	
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCIA ALVIADES		FECHA: 16/08/2017
APROBADO POR: RICARDO ALFONZO JAIMES ROLON		DIBUJO N° 4/8
ESCALA 1:1.2	MATERIAL: Acrílico	



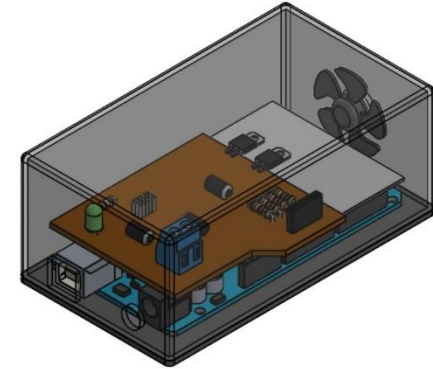
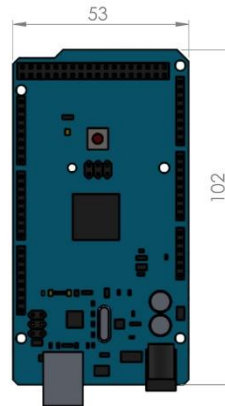
		ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
		4. ENSAMBLE SOPORTE VERTICAL	
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCÍA ALVADES		FECHA: 16/08/2017	
APROBADO POR: RICARDO ALFONZO JAIMES ROLON		DIBUJO N° 5/8	
ESCALA 1:1.2	MATERIAL: Plastico	COTAS EN: mm	




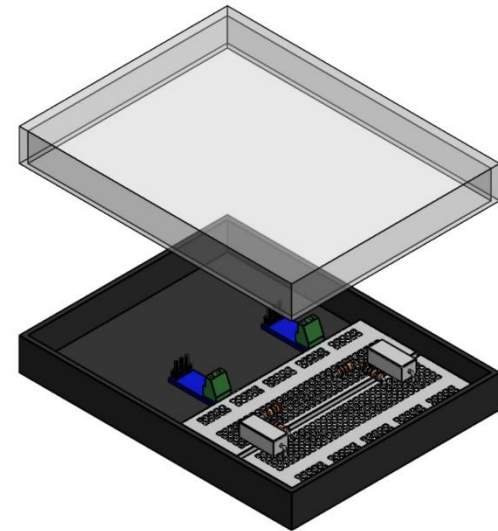
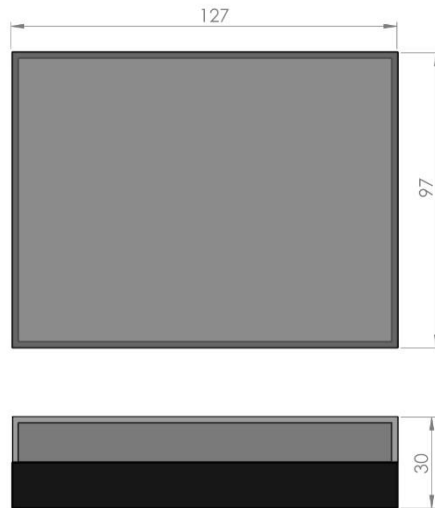
Circuito PCV



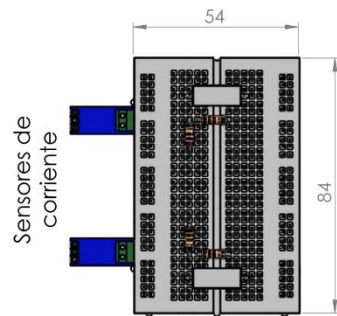
Arduino MEGA




	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
	5. UNIDAD DE CONTROL		
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCÍA ALVADES		FECHA: 16/08/2017	
APROBADO POR: RICARDO ALFONZO JAIMES ROLON		DIBUJO N° 6/8	
ESCALA 1:1.2	MATERIAL: Plastico	COTAS EN: mm	

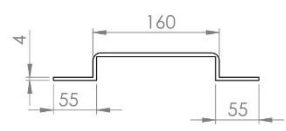
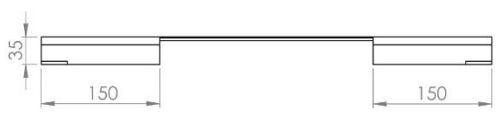
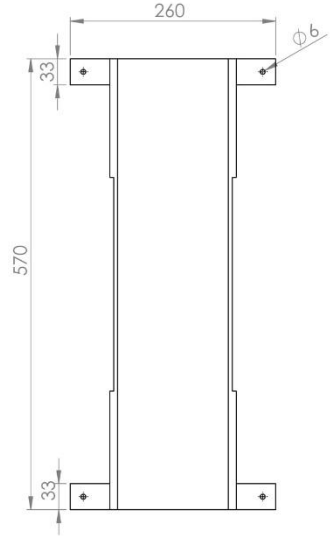
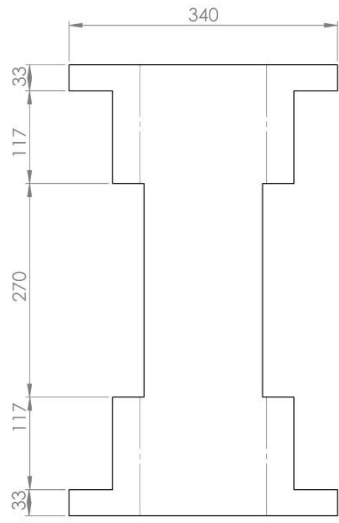


Circuito Divisor De Tension

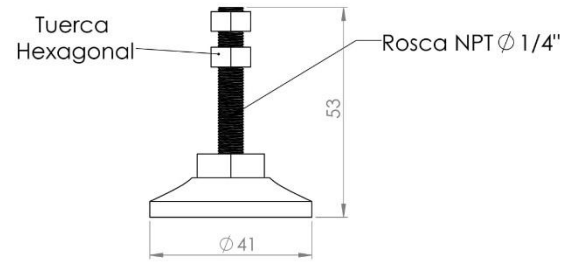


	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
	6. SISTEMA DE MEDICIÓN	
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCIA AL VIADES		FECHA: 16/08/2017
APROBADO POR: RICARDO AL FONZO JAIMES ROLON		DIBUJO N° 7/8
ESCALA 1:1.2	MATERIAL: Plastico	

DESARROLLO



DETALLE PATA NIVELADORA ESCALA 1:1



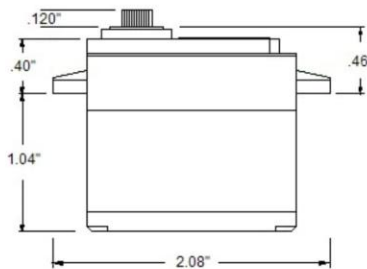
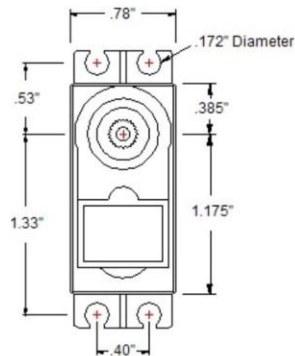
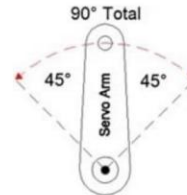
	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
	7. BASE ESTRUCTURA	
DIBUJADO POR: CARLOS MICHELL VIADERO SUAREZ DAVID SAMUEL GARCIA ALVIADES		FECHA: 16/08/2017
APROBADO POR: RICARDO ALFONZO JAIMES ROLON		DIBUJO N° 8/8
ESCALA 1:5	MATERIAL: Plastico	

Anexo B. Data Sheets Servomotor HS311

HS - 311 Standard

Detailed Specifications

Control System: +Pulse Width Control 1500usec Neutral
Required Pulse: 3-5 Volt Peak to Peak Square Wave
Operating Voltage: 4.8-6.0 Volts
Operating Temperature Range: -20 to +60 Degree C
Operating Speed (4.8V): 0.19sec/60° at no load
Operating Speed (6.0V): 0.15sec/60° at no load
Stall Torque (4.8V): 42 oz/in (3.0 kg/cm)
Stall Torque (6.0V): 49 oz/in (4.5 kg/cm)
Current Drain (4.8V): 7.4mA/idle, 160mA no load operating
Current Drain (6.0V): 7.7mA/idle, 180mA no load operating
Dead Band Width: 5usec
Operating Angle: 40° one side pulse traveling 400usec
Direction: Clockwise/Pulse Traveling 1500 to 1900usec
Motor Type: Cored Metal Brush
Potentiometer Drive: 4 Slider/Direct Drive
Bearing Type: Top/Resin Bushing
Gear Type: Nylon
360 Modifiable: [Yes](#)
Connector Wire Length: 11.81" (300mm)
Weight: 1.52oz (43g)





Data Sheet

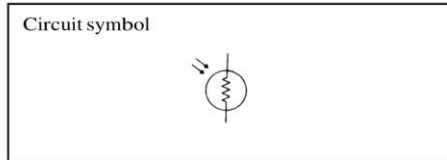
Light dependent resistors

NORP12 RS stock number 651-507
NSL19-M51 RS stock number 596-141

Two cadmium sulphide (cdS) photoconductive cells with spectral responses similar to that of the human eye. The cell resistance falls with increasing light intensity. Applications include smoke detection, automatic lighting control, batch counting and burglar alarm systems.

Guide to source illuminations

Light source	Illumination (Lux)
Moonlight	0.1
60W bulb at 1m	50
1W MES bulb at 0.1m	100
Fluorescent lighting	500
Bright sunlight	30,000



Light memory characteristics

Light dependent resistors have a particular property in that they remember the lighting conditions in which they have been stored. This memory effect can be minimised by storing the LDRs in light prior to use. Light storage reduces equilibrium time to reach steady resistance values.

NORP12 (RS stock no. 651-507)

Absolute maximum ratings

Voltage, ac or dc peak	320V
Current	75mA
Power dissipation at 30°C	250mW
Operating temperature range	-60°C to +75°C

Electrical characteristics

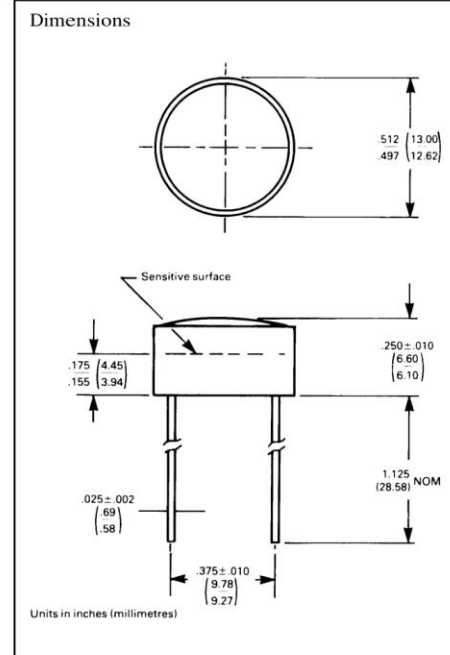
$T_A = 25^\circ\text{C}$. 2854°K tungsten light source

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Cell resistance	1000 lux	-	400	-	Ω
	10 lux	-	9	-	k Ω
Dark resistance	-	1.0	-	-	M Ω
Dark capacitance	-	-	3.5	-	pF
Rise time 1	1000 lux	-	2.8	-	ms
	10 lux	-	18	-	ms
Fall time 2	1000 lux	-	48	-	ms
	10 lux	-	120	-	ms

1. Dark to 110% R_L
 2. To $10 \times R_L$
- R_L = photocell resistance under given illumination.

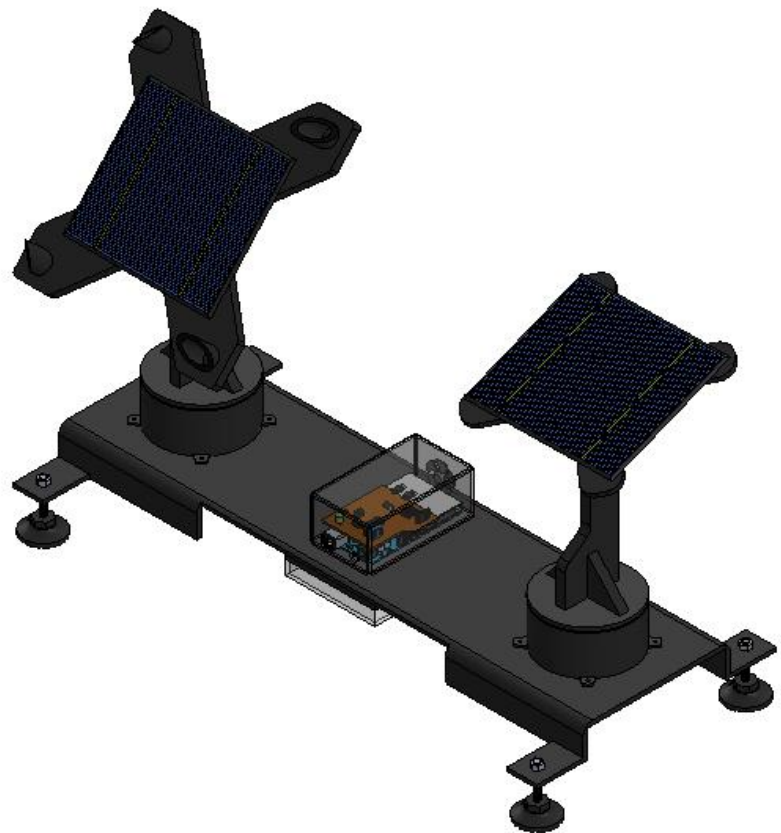
Features

- Wide spectral response
- Low cost
- Wide ambient temperature range.



MANUAL DE USUARIO

ROBOT SEGUIDOR DE LUZ SOLAR



Carlos Michell Viadero Suarez
David Samuel García Alviades
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

INTRODUCCIÓN

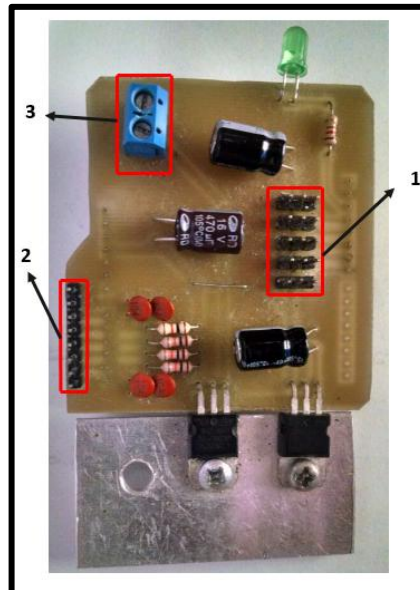
En el manual de usuario podrás encontrar toda la información necesaria, tanto para la puesta en marcha del robot seguidor como todas la demás funciones.

Se explicaran detalladamente todos los pasos a seguir para establecer todas la conexiones de cableado necesarias en los circuitos de sistema de medición y unidad de control para el correcto funcionamiento del robot.

Para adquisición de datos experimentales es necesario conocer la comunicación del robot desde Arduino a LabVIEW mediante la ejecución de una plataforma la cual será explicada detalladamente en este manual de usuario.

CONEXIONES DEL ROBOT SEGUIDOR DE LUZ

- TARJETA DE CONTROL

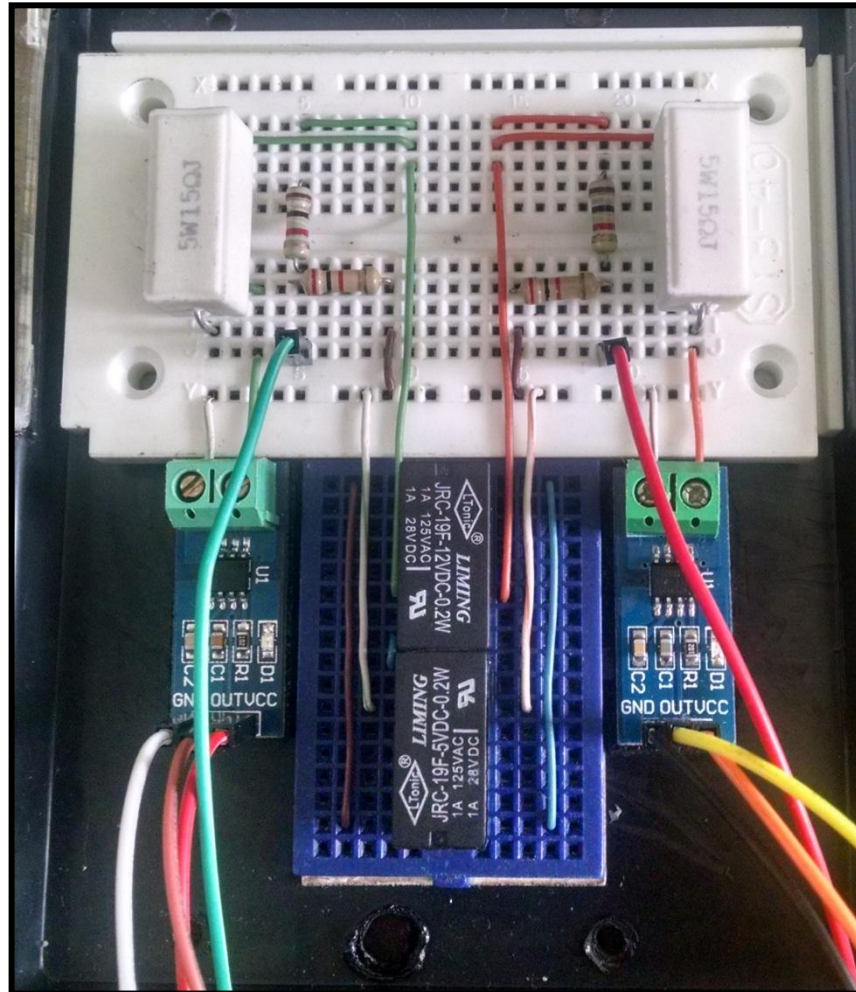


1. Conector de servomotores: A la izquierda GND y a la derecha positivo (5v DC) con el siguiente orden de arriba hacia abajo: Servobase robot, Servopanel robot, Servobase panel 2, Servopanel panel 2 y por último el ventilador (pines PMW 11, 10, 9, 8, 12).

2. Conector fotorresistencias: Para las fotorresistencias no importara el orden ya que el código esta implementada una suma que no involucra su posición de pines. Deben ser las entradas analógicas A1, A2, A3 y A4

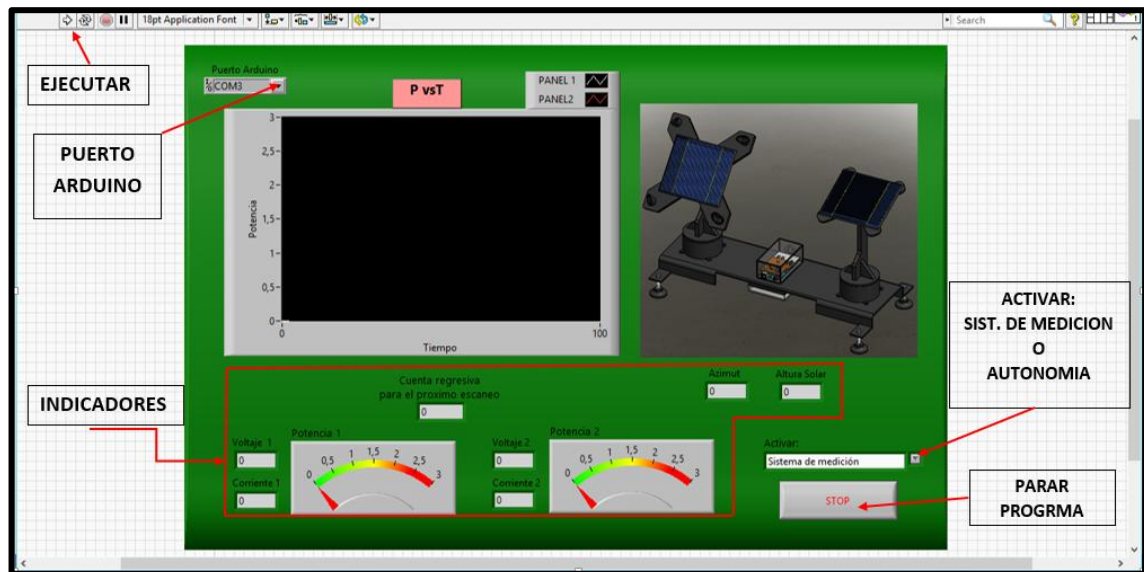
3. Conector de alimentación: en la parte superior GND e inferior positivo. Tener en cuenta que el voltaje debe ser entre 7 a 9 v DC un voltaje mayor recalienta la tarjeta y uno menor no sería capaz de mover los servomotores.

- CIRCUITO DE MEDICIÓN



En el circuito que se observa en la imagen debemos conectar las entradas de señal de voltaje de los dos paneles como se indica, para poder sensor respectiva la corriente con el ACS 712 el cual su bornera tiene como positivo a la derecha y GND a la izquierda. Los pines de entrada analógica al Arduino son los siguientes. Voltaje1 A8, Voltaje2 A9, Corriente1 A10 y Corriente2 A11.

PARTES DE LA INTERFAZ



Para abrir la interfaz debemos tener instalado el software LabVIEW 2014 puesto que una versión anterior no abriría el archivo, debemos tener los complementos necesarios para la comunicación Arduino (NIVISA / VI PACKAGE MANAGER). Ya una vez teniendo el programa precedemos a abrir el archivo "Toma de datos_FINAL" el cual debe mostrar lo que se ve en la imagen.

PUESTA EN MARCHA

Una vez Teniendo en cuenta todas las indicaciones anteriores procedemos hacerlos siguientes pasos:

1) Conectamos el Arduino MEGA al PC y cargamos el código de acuerdo a las pruebas que quiera realizar:

- Prueba #1 (P1 y P2 con seguimiento)
- Prueba #2 (P1 y P2 sin seguimiento)
- Prueba #3 (P1 con seguimiento y P2 sin seguimiento)

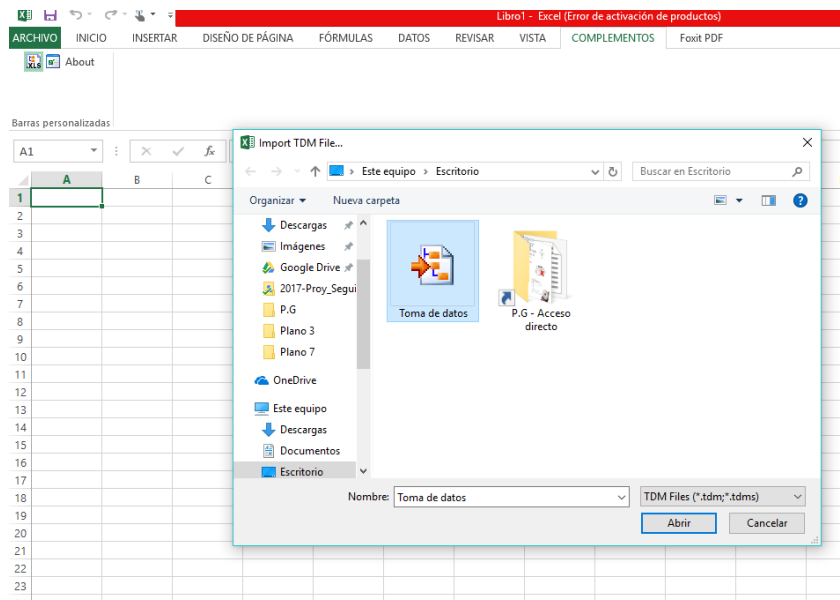
2) Seleccionamos el puerto “COM” Arduino en la interfaz

3) Ejecutamos la interfaz

4) Activamos el modo sistema de medición o autonomía de acuerdo a lo que se quiera realizar.

5) Después del tiempo de captura de datos paramos el programa para que automáticamente guarde los datos.

6) Abrimos un archivo en Excel nuevo y en la parte superior derecha “complementos, XLS” seleccionamos y buscamos nuestro archivo Toma de datos como se observa en la imagen.



FALLAS COMUNES

En esta sección se indicarán los pasos a seguir en las situaciones más comunes que pueden darse con el uso del robot o la interfaz. Se describirán todos y cada uno de los pasos a seguir de forma numerada para comprobar punto por punto los elementos implicados en el correcto funcionamiento.

- No enciende el módulo de control
 - 1) Comprobar la alimentación de la placa PCV
 - 2) Examinar la polaridad de la Bornera
 - 3) Revisar que los pines de la placa estén bien conectadas con el Arduino

- Los datos no son coherentes
 - 1) Activar el sistema de medición
 - 1) Revisar detenidamente las conexiones del sistema de medición
 - 2) Cerrar el programa Arduino y volverlo a cargar
 - 3) Calibrar nuevamente los sensores de corriente

- La interfaz no se ejecuta
 - 1) Comprobar que este arrojando datos correctos en el puerto serial Arduino y luego si ejecutar la interfaz LabVIEW
 - 2) Revisar que el puerto serial COM sea el correcto
 - 3) No tener abierto el puerto serial Arduino al tiempo que la interfaz LabVIEW

RECOMENDACIONES PARA EL MANTENIMIENTO

Esta información será de vital importancia a la hora de realizar el mantenimiento correctivo de diversos elementos críticos del robot.

- Tener cuidado al soltar las piezas puesto que algunos elementos fueron atornillados y pegados para un mejor ensamblaje
- No tensionar los cables a la hora de soltar los componentes ya que sus conexiones son frágiles.
- Se recomienda no soltar la tarjeta de control del Arduino
- La Baseservo contiene balines que a la hora de desarmar se podrían perder.
- Fijarse bien en la posición de cada elemento sobre la base del sistema puesto que contiene muchas perforaciones para los tornillos y a la hora de ensamblar podrían quedar mal orientados. Tener en cuenta la orientación en los ejes cardinales.

Anexo E. Presupuesto del proyecto

PRESUPUESTO

SERVICIO	DESCRIPCIÓN	COSTO
Medios auxiliares e instrumentación	Transporte	\$ 660.000
	Libros y articulos tecnicos	
	Impresiones	
	DVD, CDS	
	Papeleria y utiles de escritorio	
	Horas de computador	
Materiales	Paneles solar de 6V	\$ 940.000
	Servomotores	
	Arduino	
	Protoboard	
	Componentes electronicos	
	Sensores LM7809	
	Estructura metalica, plastica y acrilico	
	Tira de pines	
	Cable Electrico	
	Otros	
Mano de obra	Diseño de software	\$ 1.400.000,00
	Elaboracion de documentacion	
	Comprobaciones	
	Montajes	
	Diseño y fabricacion de circuitos	
TOTAL		\$ 3.000.000

Anexo F. Código de programación

```
//*****  
//*****Carlos M. Viadero*****  
//***David Samuel***  
//*****  
  
#include <Servo.h>  
Servo panelServo; //Servo que rota el panel  
Servo baseServo; //Servo que rota la base1  
Servo panelServo2; //Servo que rota el pane2  
Servo baseServo2; //Servo que rota la base2  
  
int pos = 0; //variable  
int posBase = 0; //variable  
int posPanel = 0; //variable  
int posBase2 = 0; //variable  
int posPanel2 = 0; //variable  
  
#define amarillo A3  
#define naranja A4  
#define verde A2  
#define morado A1  
  
int celdaAmarilla = 0;  
int celdaNaranja = 0;  
int celdaVerde = 0;  
int celdaMorada = 0;  
  
int luminosidad = 5000; //asigno inicialmente un valor alto  
int luminosidadAnterior = 5000;  
  
int posBaseMenor = 0;  
int posPanelMenor = 0;  
int luminosidadMenor = 5000;  
  
int angulo_servoB=180; // VARIABLES DE REGISTRO DEL ANGULO  
int angulo_servoP=180; // VARIABLES DE REGISTRO DEL ANGULO  
  
unsigned char sentido = 0;  
unsigned char entrada = 0;  
  
int relay1 = 7;  
int relay2 = 6;  
  
void setup()  
{  
  Serial.begin(57600);  
  delay(100);  
  baseServo.attach(11); //11 panel1  
  panelServo.attach(10); //10 base1  
  baseServo2.attach(9); //9 panel2  
  panelServo2.attach(8); //8 base2
```

```

    posBase = 0;
    posPanel = 0;
    posBase2 = 90;
    posPanel2 = 90;

    Panel(20, posPanel);
    Base(20, posBase);

    Serial.println("Conectado");
}

void loop()
{
    celdaAmarilla = analogRead(amarillo);
    celdaNaranja = analogRead(naranja);
    celdaVerde = analogRead(verde);
    celdaMorada = analogRead(morado);

    luminosidad = celdaAmarilla + celdaNaranja + celdaMorada + celdaVerde;

    if(luminosidad < luminosidadMenor) //La sumatoria menor, va ser la
referencia para saber en qué parte hay más incidencia de la luz, debido a
la conexión de las foto-celdas
    {
        luminosidadMenor = luminosidad;
        posBaseMenor = posBase;
        posPanelMenor = posPanel;
    }
    Serial.print(" Luminosidad: ");Serial.print(luminosidad);
    Serial.print(" \t Servo Panel: "); Serial.print(posPanel);
    Serial.print(" \t Servo Base: "); Serial.println(posBase);

        if(posPanel == 0)
        {
            posPanel = 10;
            sentido = 0;
            entrada = 1;
        }
        else if(posPanel == 180)
        {
            posPanel = 170;
            sentido = 1;
            entrada = 1;
        }

    if(entrada == 1)
    {
        entrada = 0;
        posBase = posBase + 10;

        if(posBase == 190)
        {

```

```

        posBase = 0;
Serial.println(" ----- ");
Serial.print(" Mayor luminosidad: "); Serial.print(luminosidadMenor);
Serial.print(" Servo Base: "); Serial.print(posBaseMenor);
Serial.print(" Servo Panel: "); Serial.println(posPanelMenor);
Serial.println(" ----- ");
        baseServo2.write(posBaseMenor);
        panelServo2.write(posPanelMenor);
        Panel(20, posPanelMenor); //ubicación final
        Base(20, posBaseMenor);
        posBaseMenor = 0;
        posPanelMenor = 0;
        luminosidadMenor = 5000;

//---- retardo de espera para volver a empezar a escanear todo el panel
        int minutos = 5;
        int contadorMinutos = 60*minutos;

                for(int j = 1; j<= minutos; j++) //
                {
                        for(int i = 1; i<=60; i++)
                        {

// ACTIVAR: SISTEMA DE MEDICIÓN O AUTONOMIA

int val = Serial.read();
if (val=='Sistema de medición')
digitalWrite(relay1, HIGH); // Relay 1 accionado
digitalWrite(relay2, HIGH); // Relay 2 accionado
if (val=='Autonomia')
digitalWrite(relay1, LOW); // Relay 1 accionado
digitalWrite(relay2, LOW); // Relay 2 accionado

// SISTEMA DE MEDICION DE POTENCIA

float Sensibilidad1=0.145; //sensibilidad del sensor de corriente
float Sensibilidad2=0.145;
float DivisorTension1 = 1.5;
float DivisorTension2 = 1.5;
float muestras = 5000;
float voltajeP1;
float voltajeP2;
float corrienteP1;
float corrienteP2;
float sensorA8;
float sensorA9;
float sensorA10;
float sensorA11;
float sumaV1=0;
float sumaV2=0;
float sumaC1=0;
float sumaC2=0;

```

```

for(int i=0;i<muestras;i++)
{
  sensorA8 = analogRead(A8) * (4.8 / 1023.0);
  sensorA9 = analogRead(A9) * (4.8 / 1023.0);
  sensorA10 = analogRead(A10) * (5.028 / 1023.0);
  sensorA11 = analogRead(A11) * (5.028 / 1023.0);

  sumaV1=sumaV1+(sensorA8*DivisorTension1);
  sumaV2=sumaV2+(sensorA9*DivisorTension2);
  sumaC1=sumaC1+(sensorA10 - 2.5)/Sensibilidad1;
  sumaC2=sumaC2+(sensorA11 - 2.5)/Sensibilidad2;
}
voltajeP1=sumaV1/muestras;
voltajeP2=sumaV2/muestras;
corrienteP1=sumaC1/muestras;
corrienteP2=sumaC2/muestras;

//muestra cuenta regresiva en conjunto con el voltaje

Serial.print(contadorMinutos-i);
Serial.print(" Voltaje Panel 1: "); Serial.print(voltajeP1);
Serial.print(" \t Voltaje Panel2 : "); Serial.print(voltajeP2);
Serial.print(" \t Corriente Panel 1: "); Serial.print(corrienteP1);
Serial.print(" \t Corriente Panel2 : "); Serial.println(corrienteP2);
}
  contadorMinutos = contadorMinutos - 60;
}
}
else
{
  if(sentido == 0)
  {
    posPanel = posPanel + 10; //aumento ángulo de la base
  }
  else
  {
    posPanel = posPanel - 10; //para que regrese
  }
}

Panel(9, posPanel);
Base(9, posBase); //movimiento de escaneo
}

```

```

//-----TIEMPO DE MOVIMIENTO DEL SERVO BASE POR CADA GRADO-----.
void Base(unsigned int tiempo, unsigned int rotacion)
{
    if(rotacion>angulo_servoB) //SI EL ANGULO ANTERIOR ES MENOR QUE EL
DESEADO
    {
        for( ; angulo_servoB < rotacion; angulo_servoB++) //AUMENTA UN
GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            baseServo.write(angulo_servoB); // SUBIR BRAZO
            delay(tiempo); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    if(rotacion<angulo_servoB) //SI EL ANGULO ANTERIOR ES MAYOR QUE EL
DESEADO
    {
        for(; angulo_servoB > rotacion; angulo_servoB--) //DISMINUYE UN
GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            baseServo.write(angulo_servoB); //BAJAR BRAZO
            delay(tiempo); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    angulo_servoB=rotacion; // MEMORIZA EL ANGULO DESEADO PARA EL
SERVOMOTOR 1
}

//-----TIEMPO DE MOVIMIENTO DEL SERVO PANEL POR CADA GRADO-----.
void Panel(unsigned int tiempo2, unsigned int rotacion2)
{
    if(rotacion2>angulo_servoP) //SI EL ANGULO ANTERIOR ES MENOR QUE
EL DESEADO
    {
        for( ; angulo_servoP < rotacion2; angulo_servoP++) //AUMENTA UN
GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            panelServo.write(angulo_servoP); // SUBIR BRAZO
            delay(tiempo2); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    if(rotacion2<angulo_servoP) //SI EL ANGULO ANTERIOR ES MAYOR QUE
EL DESEADO
    {
        for(; angulo_servoP > rotacion2; angulo_servoP--) //DISMINUYE UN
GRADO CADA "TIEMPO" (MILISEGUNDOS)
        {
            panelServo.write(angulo_servoP); //BAJAR BRAZO
            delay(tiempo2); // DURACIÓN DE CADA GRADO
        }
    }
    angulo_servoP=rotacion2; // MEMORIZA EL ANGULO DESEADO PARA EL
SERVOMOTOR 1
}

```