

**UNIVERSIDAD NACIONAL
JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Física Aplicada

**Implementación de un Seguidor Solar para la
Evaluación Energética Comparativa de
Paneles Fotovoltaicos**

TESIS

Presentada por:

Bach. Alessandro De La Gala Contreras

Para optar el Título Profesional de:

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

TACNA – PERÚ

2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 312

En la ciudad de Tacna, en el Auditorio de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, siendo las 11:44 h del 17 de abril de 2018, estando presente el Jurado Calificador nominado por Resolución de Facultad N° 9028-2018-FACI-UN/JBG (13 de abril de 2018), conformado por los siguientes docentes.

Dr. Daladier Miguel Castillo Cotrina – Presidente
Lic. Juan Manuel Abanto Sáenz – Secretario
Msc. Hugo Alfredo Torres Muro – Miembro

Se dio lectura a la Resolución correspondiente, y se dio también lectura al art. 22 del Reglamento de Grados y Títulos, de la Facultad de Ciencias. A continuación el Presidente del Jurado Calificador invitó a exponer su trabajo al Bach. Alessandro De La Gala Contreras, titulado: Implementación de un Seguidor Solar para la Evaluación Energética Comparativa de Paneles Fotovoltaicos.

Terminó de exponer a las 12:44 h. Luego los miembros del Jurado Calificador formularon las preguntas respectivas. Culminada las preguntas se invitó a los presentes a abandonar el auditorio. Para que el Jurado emita su calificación.

El promedio de la nota es 18 (Sobresaliente). Felicitando al expositor. Siendo las 13:21 h se dio por concluida el acto de sustentación.

PRESIDENTE:

.....
Dr. Daladier Miguel Castillo Cotrina

SECRETARIO:

.....
Lic. Juan Manuel Abanto Sáenz

MIEMBRO:

.....
Msc. Hugo Alfredo Torres Muro

*A mi mamá y a mi nona por darme el regalo
más importante de todos,
la Fe*

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a la verdadera responsable de este proyecto, quien jamás dudo de mí, y conociéndome, decidió ser mi mecenas proveedora de Fe y Esperanza, dándome todo el apoyo que una madre podría darle a su hijo, así es, a Rosa María Contreras Bartesaghi, simplemente sin su ayuda nada de esto hubiera sido posible.

A su vez me gustaría expresar mi más profundo aprecio a todos aquellos que me brindaron la posibilidad de completar este trabajo, sobre todo a mi asesor Carlos Polo Bravo por permitirme su experiencia y su paciencia, así como su amplio apoyo, a través de los equipos de nuestros laboratorios y con la elaboración, redacción y corrección de esta tesis. También a mis profesores Hugo Torres y José Tiburcio por disponer de su conocimiento así como de sus valiosos consejos. Al técnico de laboratorio Horlando Mariaca quien fue mi compañía electrónica en las etapas tempranas de este proyecto.

Al final pero no menos importante a Fhatia Nohemi Perez Bayona, por haber confiado y acompañado en esta etapa de mi vida, quien sabiendo que no sería fácil, y con prodigiosa paciencia, nunca dejo de apoyarme con su habilidad, con su tiempo y con su corazón.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
GENERALIDADES	4
1.1. Formulación del Problema.....	4
1.2. Pregunta de investigación	5
1.3. Justificación.....	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos.....	6
1.5. Hipótesis	6
1.6. Variables	6
1.7. Indicadores.....	7
1.8. Limitaciones de la investigación	7
1.9. Descripción de las características de la investigación	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. El Sol.....	8
2.2. Movimientos Sol – Tierra y Trayectoria Solar.....	9
2.2.1. El movimiento diario de la Tierra.....	9
2.2.2. El movimiento anual de la Tierra.....	10
2.2.3. Distancia Tierra – Sol.....	11
2.3. Declinación Solar δ	14
2.3.1. Solsticios y Equinoccios.....	15
2.4. Radiación Solar.....	22
2.4.1. Radiación solar directa.....	23
2.4.2. Radiación solar difusa.....	24
2.4.3. Radiación solar reflejada.....	25
2.4.4. Trayectoria de la Irradiación solar en la atmósfera.....	27
2.4.5. Constante Solar.....	31
2.4.6. Cálculo de la Irradiancia Solar.....	33
2.4.7. Medición de la irradiancia solar global.....	39
2.5. Aprovechamiento de la Radiación.....	43

2.5.1. La célula fotovoltaica	44
2.5.2. Módulo Fotovoltaico	45
2.5.3. Tipos de Células solares que conforman el Módulo Fotovoltaico.....	46
2.5.4. Característica I – V de iluminación	47
2.5.5. Modificación del comportamiento básico.	51
2.6. Seguidores Solares	54
2.6.1. Tipos de Seguidores Solares	56
2.6.2. ¿Por qué sería útil para nuestra localidad?	62
2.6.3.Requerimientos de un seguidor solar	62
CAPITULO III	
MATERIALES	65
3.1. Materiales para le etapa de Movimiento.....	68
3.1.1. Sensor de Posición	68
3.1.2. Soportes	72
3.1.3. Motores.....	75
3.2. Materiales para la etapa de Registro	77
3.2.1. Paneles.....	77
3.2.2. Diseño 3D	79

3.2.3. Radiación.....	80
3.2.4. Temperatura.....	81
3.2.5. Almacenamiento SD y RTC	82
3.3. Materiales para la etapa de Control.....	83
3.3.1. Tarjeta Arduino Mega 2560.....	83
3.3.2. Tarjeta de Potencia.....	84
3.3.3. Tarjeta de Arranque y Alimentación.....	85
3.3.4. Algoritmo.....	87

CAPITULO IV

PROCEDIMIENTO.....	89
4.1. Sensor de orientación solar.....	90
4.1.1. Concepto.....	90
4.1.2. Construcción	91
4.2. Montura.....	93
4.2.1. Concepto.....	93
4.2.2. Construcción	94
4.3. Paneles	101
4.4. Irradiancia	103

4.5. Temperatura.....	105
4.6. Almacenamiento SD y RTC	106
4.7. Tarjeta de Potencia	108
4.7.1. Concepto.....	108
4.7.2. Construcción	108
4.8. Tarjeta Arduino	109
4.8.1. Implementación.....	109
4.8.2. Desarrollo del Algoritmo.....	109
4.9. Arranque y Alimentación.....	112
4.9.1. Concepto.....	112
4.9.2. Construcción	112

CAPITULO V

RESULTADOS	116
5.1. Ensamble final de todas las tarjetas electrónicas.....	116
5.3. Esquema electrónico de la tarjeta de potencia.....	119
5.4. Esquema electrónico del dispositivo de Arranque y alimentación	120
5.5. Acopladores de plástico para paneles fotovoltaicos	121
5.6. Sensor de Irradiancia.....	122

5.7. Temperatura.....	123
5.8. Construcción final del seguidor solar.	124
5.10. Gráficas correspondientes a la Irradiancia vs Tiempo	126
5.11. Gráfica de la Potencia de la potencia incidente total vs Tiempo	128
5.12. Gráfica de la Potencia generada por los paneles vs Tiempo	129
5.13. Gráfica de la Temperatura vs Tiempo	131
5.14. Gráfica de la Energía incidente y la producida por el panel fotovoltaico	133
5.15. Gráfica de la Eficiencia.....	134
CAPITULO VI	
DISCUSIÓN.....	136
CAPITULO VII	
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	141
5.1. Conclusiones.....	141
5.2. Sugerencias	144
REFERENCIAS	146

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Movimiento aparente del sol visto desde ambos hemisferios.	10
Figura 2. Posiciones de la tierra en la eclíptica a lo largo del año.....	11
Figura 3. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol.....	12
Figura 4. Debido al movimiento del Sol de Norte al Sur durante el año, unas veces sigue un círculo muy grande haciendo este día largo y otras veces un círculo muy pequeño haciendo estos días cortos	15
Figura 5. Solsticio para el hemisferio norte como para el sur.....	16
Figura 6. Equinoccios para el hemisferio norte y sur	16
Figura 7. Solsticio para el hemisferio norte como para el sur.....	17
Figura 8. Equinoccios para el hemisferio norte y sur	17
Figura 9. Esfera celeste con el aparente movimiento del sol y la declinación.....	19
Figura 10. La Tierra como se ve desde un punto a lo largo de su órbita	20
Figura 11. a - c. Trayectoria de radiación solar. a Directa. b Difusa. c Reflejada.	23
Figura 12. a, b. Trayectoria de la radiación solar.....	28
Figura 13. Angulo del sol y distancia a través de la atmósfera.	29
Figura 14. Variación mensual de la radiación extraterrestre.....	32
Figura 15. Variación de H con la Latitud y la Estación, insolación diaria con cielo despejado sobre un plano horizontal.....	34
Figura 16. Radiación solar superficial.	35

Figura 17. Distribución representativa de la potencia como una función de la longitud de onda para la energía solar en la atmósfera superior, para condiciones de un cielo despejado, Las barras muestran regiones utilizadas por sistemas de conversión de energía.....	38
Figura 18. Celda Fotoconductora, a. Construcción, b. Simbolo.....	41
Figura 19. Respuestas espectrales relativas para el silicio, germanio y selenio, comparadas con las del ojo humano	42
Figura 20. Características terminales de una celda fotoconductora.	43
Figura 21. Característica I – V de iluminación.....	48
Figura 22. Variación de los parámetros con la temperatura.....	53
Figura 23. Campo termosolar de seguidores con motor Stirling.....	58
Figura 24. Campo Solar de seguidores con paneles fotovoltaicos.	59
Figura 25. Seguidores solares Kipp & Zonen SOLYS	59
Figura 26. Campo Solar de seguidores con paneles fotovoltaicos de un eje.	60
Figura 27. Campo Solar de seguidores con paneles fotovoltaicos de dos ejes	61
Figura 28. Telescopio con seguimiento estelar de montura ecuatorial	61
Figura 29. Celda fotoconductora a utilizar para el sensor de posición.	69
Figura 30. Izquierda, Amplificador Operacional LM324. Derecha, Schmitt Trigger negador CD40106	69
Figura 31. Izquierda, Multiplexor/Demultiplexor análogo de 8 canales HCF4051. Derecha, Switch análogo bilateral CD4066	70

Figura 32. Izquierda, Regulador de tensión AMS 11117. Derecha, Resistencias de precisión	70
Figura 33. Izquierda, Placa prototipada Datak 15x16. Derecha, Pines hembra y macho	70
Figura 34. Baja lenguas de madera a utilizar.	71
Figura 35. Izquierda, Carton maqueta. Derecha, tornillos y resortes de 1/8.....	71
Figura 36. Demostración del software trabajando según la latitud de Tacna 18°	73
Figura 37. Tripode utilizado.....	73
Figura 38. Base utilizada.....	74
Figura 39. Madera de pino.	74
Figura 40. Varilla roscada de ¼ de pulgada.	74
Figura 41. Izquierda, Tornillos 1/4 de pulgada. Derecha, Tornillos largos de 1/8 de pulgada.	75
Figura 42. Motor paso a paso extraído de una vieja impresora.....	75
Figura 43. Piñón para correas de plástico.	76
Figura 44. Varillas a utilizar.....	76
Figura 45. Izquierda, Correa de transmisión dentada. Derecha, Rodamientos 608 – 2NSL.....	76
Figura 46. Contrapeso a utilizar.	77
Figura 47. Panel Fotovoltaico a utilizar.	78
Figura 48. Diodos de silicio.	78

Figura 49. Reóstatos a utilizar.	78
Figura 50. Resistencia a utilizar.	79
Figura 51. Captura del software Autodesk Inventor.	79
Figura 52. Ácido poliláctico para impresoras 3D.	80
Figura 53. Celda fotoconductora.	80
Figura 54. Potenciómetros a utilizar.	81
Figura 55. Izquierda, conectores DIN. Derecha, cable estéreo.	81
Figura 56. Sensor de temperatura a utilizar.	81
Figura 57. Plug a utilizar.	82
Figura 58. RTC DS1307. Tarjeta SD marca Kingstone de 1GB.	82
Figura 59. Batería de Lithium de 3V modelo CR2032. Cristal de 32.768 Hz.	83
Figura 60. Tarjeta Arduino Mega 2560 a utilizar.	84
Figura 61. Demultiplexor Binario Dual CD4555. Transistor TIP 120.	84
Figura 62. Paneles a utilizar.	85
Figura 63. Izquierda, Diodo zenner de 6V. Derecha, Rectificador MCR 106.	85
Figura 64. Transformador a utilizar.	86
Figura 65. Batería 6LR61 y AA. Condensador electrolítico de 25V y 10mF.	86
Figura 66. Izquierda, Regulador L7809. Derecha, Transistor 2N3055.	86
Figura 67. Bump switch pequeño. Bump Switch grande modelo TM-1703.	87
Figura 68. Relé modelo HRS2H de 5V. Relé Omron LY2N de 12 V.	87
Figura 69. Vista general de la versión del Arduino IDE a utilizar.	88

Figura 70. Esquema general del proceso de construcción del seguidor solar.	89
Figura 71. Concepto geométrico del sensor de orientación solar.	90
Figura 72. Vista axial de la T divisoria.	91
Figura 73. Proceso de soldado de la parte de auto calibración.	92
Figura 74. Proceso de sujeción de la tarjeta de auto calibración y T divisoria.	92
Figura 75. Proceso de soldado de la tarjeta de autobalance dinámico.	93
Figura 76. Concepto de la montura mecánica del seguidor solar.	94
Figura 77. Eje de la ascensión recta y sujetador de madera.	95
Figura 78. Colocación del engranaje en el eje de ascensión recta.	95
Figura 79. Proceso de construcción de la pieza de acople.	96
Figura 80. Colocación de rodamientos para los ejes de los motores.	96
Figura 81. Colocación del motor y su eje en los rodamientos.	97
Figura 82. Acople para el eje de declinación y varilla pequeña de acero.	98
Figura 83. Proceso temprano de armado del seguidor solar.	98
Figura 84. Proceso de ensamblado del motor del eje de ascensión recta.	99
Figura 85. Contrapeso de la sección del panel. Contrapeso de Declinación.	99
Figura 86. Contrapeso del motor Declinación. Contrapeso de ascensión recta. ..	100
Figura 87. Contrapeso del eje de la latitud.	100
Figura 88. Proceso de ensamblado de base de sujeción.	101
Figura 89. Esquema del acondicionamiento de los paneles fotovoltaicos.	101
Figura 90. Diseño en 3D de la pieza de sujeción del panel fotovoltaico.	102

Figura 91. Diseño en 3D de la pieza de acople de la pieza de sujeción.....	102
Figura 92. Esquema electrónico del sensor de irradiancia solar.	103
Figura 93. Proceso de diseño en 3D del armazón del sensor.	104
Figura 94. Proceso de diseño en 3D de la pieza de acople.	104
Figura 95. Proceso de calibración del sensor de irradiancia solar.....	105
Figura 96. Proceso de soldado y armado del sensor de temperatura.	106
Figura 97. Proceso de calibración de los sensores de temperatura.....	106
Figura 98. Esquema electrónico de la tarjeta de almacenamiento SD y RTC. ...	107
Figura 99. Proceso de armado de la tarjeta de almacenamiento SD y RTC.	107
Figura 100. Proceso de construcción de la tarjeta de potencia.....	108
Figura 101. Pruebas de implementación iniciales realizadas.	109
Figura 102. Armado de sensores de orientación y los sensores de arranque.	113
Figura 103. Proceso de implementación de relés.	113
Figura 104. Implementación de la tarjeta de arranque y alimentacion	114
Figura 105. Proceso construcción y ensamblado final de todas las etapas.	115
Figura 106. Ensamble final de todas las partes electrónicas.	117
Figura 107. Esquema del sensor de orientación	118
Figura 108. Esquema de la tarjeta de potencia	119
Figura 109. Esquema de la tarjeta de arranque y alimentación.....	120
Figura 110. Acoplador A y B de plástico poliláctico para panel fotovoltaico. ...	121
Figura 111. Construcción final del armazón del Sensor de Irradiancia.	122

Figura 112. Armado final del sensor de Irradiancia con su pieza de acople C. ...	123
Figura 113. Armado final de los sensores de temperatura.	123
Figura 114. Construcción final del seguidor solar.	124
Figura 115. Vista superior del seguidor solar con sus respectivos sensores.	125
Figura 116. Irradiancia vs Tiempo para el mes de Octubre.	127
Figura 117. Irradiancia vs Tiempo para el mes de Noviembre.	127
Figura 118. Potencia incidente vs Tiempo para el mes de Octubre.	128
Figura 119. Potencia incidente vs Tiempo para el mes de Noviembre.	129
Figura 120. Potencia Generada vs Tiempo para el mes de Octubre.	130
Figura 121. Potencia Generada vs Tiempo para el mes de Noviembre.	130
Figura 122. Potencia Generada vs Tiempo para el mes de Noviembre.	132
Figura 123. Temperaturas vs Tiempo para el mes de Noviembre.	132
Figura 124. Comparativa de le Energía para el mes de Octubre.	133
Figura 125. Comparativa de le Energía para el mes de Noviembre.	133
Figura 126. Comparativa de la eficiencia para ambos paneles fotovoltaicos.	135

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Declinación para cada día del año.	21
Tabla 2. Lista de materiales usados para la construcción del seguidor solar.	67

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo principal la implementación de un seguidor solar para la evaluación energética comparativa de paneles fotovoltaicos. Siendo necesario para ello diseñar, construir e implementar un seguidor solar diario de dos ejes, automático con capacidad de registro de datos tales como temperatura, irradiancia y potencia de paneles fotovoltaicos, todo ello, con materiales accesibles para nuestra localidad. Alcanzándose este objetivo exitosamente, permitiendo así, la evaluación energética comparativa de dos paneles fotovoltaicos de iguales características, uno estacionario y el otro en constante seguimiento del sol, bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Tacna, del 20 de octubre al 10 de noviembre del 2017.

Concluyéndose así, con la implementación de un seguidor solar, la de un sensor de seguimiento, un sistema de registro automático, el de una tarjeta para el arranque y otra de control de potencia, así como procesar y analizar la información registrada. Notamos que, si bien la máxima temperatura alcanzada por un panel fotovoltaico en seguimiento, 38°C , fue más elevada que el del estacionario, $34,4^{\circ}\text{C}$, y estos a su vez que la del ambiente, $27,6^{\circ}\text{C}$, la energía total generada por este fue de $33,15\text{Wh}$ en contraste con los $20,5\text{Wh}$ generados por el panel estacionario. Logrando así una ganancia energética del 38% incrementando la eficiencia de un panel fotovoltaico policristalino en un 2,45% debido al uso de este seguidor solar.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía, el continuo agotamiento de las fuentes existentes de combustibles fósiles y la creciente preocupación por la contaminación del medio ambiente, han empujado a la humanidad a explorar nuevas tecnologías para la producción de energía eléctrica a partir de fuentes limpias y renovables, como la energía solar, la energía hidráulica, la energía eólica, etc. Entre las fuentes de energías no convencionales y renovables, la energía solar ofrece un gran potencial para su conversión en energía eléctrica, capaz de suplir en gran parte las necesidades de energía del planeta.

La conversión de la luz solar en energía eléctrica representa una de las tecnologías energéticas más prometedoras y desafiantes, en continuo desarrollo, siendo limpia, silenciosa y fiable, con costes de mantenimiento muy bajos y con el mínimo impacto ecológico. La energía solar es gratis, prácticamente inagotable, y no emite gases de efecto invernadero.

Existen dos tecnologías para llevar a cabo la conversión de la luz solar en electricidad, por conversión fotovoltaica y por inducción electromagnética, ambas sometidas a cambios; para mejorar la eficiencia en el caso de la fotovoltaica, podemos mencionar, la optimización de la configuración de la célula solar, variar su geometría y la utilización de nuevos materiales así como tecnologías.

Pero hay una mejora que se repite en todas ellas una que al ser aplicada marcaría una colosal diferencia aumentando la eficiencia de todas las tecnologías capaces de convertir la luz solar en electricidad, aquella que mantenga a nuestro equipo en la orientación correcta mientras dure el día, y esta es la de implementar un Seguidor Solar.

En la actualidad en la ciudad de Tacna y considerando los factores meteorológicos propios de la localidad, no se han realizado o al menos publicado de forma seria ningún estudio que proyecte con claridad cómo es que el factor de orientación afecta a la producción energética de un panel fotovoltaico.

La razón principal de esto es que no existe un equipo, construido o implementado con un sistema electromecánico que permita a un panel fotovoltaico seguir al sol de forma continua durante el día y que dicho sistema posea una montura ecuatorial (la forma más eficiente de seguir un astro), que sea basado en la eclíptica para garantizar un movimiento más preciso, a su vez que permita el registro continuo de data de parte de los sensores a fines de manera automática y periódica. También debido a la inexistencia de dicho equipo otros estudios como el de la radiación solar directa, radiación solar difusa, estudios fotométricos, radiométricos, pirheliométricos y horas de sol son imposibles así como estudios basados en las tecnologías de Concentración Solar de Potencia como la de cilindro parabólico, disco parabólico, lineal Fresnel y torre de concentración se ven ampliamente limitadas.

Estos equipos (los seguidores solares) ya existen en el mercado mundial pero debido a su costo y desconocimiento para nuestra localidad y autoridades son poco accesibles, haciéndose imposible los estudios que dependan de ellos.

En vista de la ausencia de los equipos anteriormente mencionados y contando con los factores climáticos y geográficos ideales para el estudio en nuestra localidad, es que me veo en la necesidad de fabricarlos y hacerlos accesibles. Esto es con la finalidad de abrir las puertas a un nuevo tipo de estudio y desarrollo tecnológico para la ciudad de Tacna dentro del ámbito de la Energía Renovable Solar así como de brindar ciertas herramientas que permitiesen el registro automático para los sensores concernientes al área, y cuyo diseño sea fácilmente masificado y con el tiempo mejorado. Este seguidor sería vital al momento de realizar un estudio del potencial energético solar de una determinada zona, ya que contratar personal que este pendiente de maniobrar y tomar las medidas respectivas de forma artesanal implicaría un mayor costo y esfuerzo, como actualmente se venía haciendo.

A su vez no solo serviría para analizar el movimiento del sol así como su radiación sino que serviría de base universal para todos los equipos que requieran un constante seguimiento solar y así hacer el análisis meteorológico que corresponda.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Formulación del Problema

En la actualidad en la ciudad de Tacna y considerando los factores meteorológicos propios de la localidad, no se han realizado o al menos publicado de forma seria ningún estudio que proyecte con claridad cómo es que el factor de orientación afecta a la producción energética de un panel fotovoltaico.

La razón principal de esto es que no existe ningún equipo construido o implementado con un sistema electromecánico que permita a un panel fotovoltaico seguir al sol de forma continua durante el día y que dicho sistema sea a base de dos ejes, para garantizar máxima precisión así como permita el registro continuo de datos de parte de los sensores a fines, de manera automática y periódica. Debido a la inexistencia de dicho equipo, otros estudios como el de la radiación solar directa, radiación solar difusa, estudios fotométricos, radiométricos, pirheliométricos y horas de sol son imposibles así como estudios basados en las tecnologías de Concentración Solar de Potencia como la de cilindro parabólico, disco parabólico, lineal Fresnel y torre de concentración se ven ampliamente limitadas.

Estos equipos ya existen en el mercado mundial pero debido a su costo y desconocimiento para nuestra localidad y autoridades son poco accesibles, haciéndose imposible los estudios que dependan de ellos.

1.2. Pregunta de investigación

¿La construcción y uso de un seguidor solar permitirá la evaluación energética comparativa entre paneles fotovoltaicos con seguimiento y sin seguimiento?

1.3. Justificación

En vista de la ausencia de los equipos anteriormente mencionados y contando con los factores climáticos y geográficos ideales para el estudio en nuestra localidad, es que me veo en la necesidad de no solo fabricarlos sino de hacerlos con materiales accesibles.

Esto es con la finalidad de abrir las puertas a un nuevo tipo de estudio y desarrollo tecnológico para la ciudad de Tacna dentro del ámbito de la Energía Renovable Solar así como de brindar ciertas herramientas que permitiesen el registro automático de los diversos sensores concernientes al área.

Este seguidor sería vital al momento de realizar el estudio del potencial energético solar de una determinada zona, algo que, como ya hemos mencionado, de otro modo sería muy costoso y complicado, a su vez serviría de base universal para todos los equipos que requieran un constante seguimiento solar.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Implementar un Seguidor Solar para la Evaluación Energética Comparativa de Paneles Fotovoltaicos

1.4.2. Objetivos Específicos

- Construir un seguidor solar diario.
- Construir un sistema de registro de datos automático.
- Implementar sensores digitales para medir temperatura, irradiancia solar y voltaje de paneles fotovoltaicos.
- Comparar la energía generada por un panel fotovoltaico con seguimiento solar y uno en estado estacionario.

1.5. Hipótesis

Es posible construir un seguidor solar de dos ejes con capacidad de registro de datos a un bajo costo que demuestre que un panel fotovoltaico con seguimiento solar es más eficiente que uno en condición estacionaria.

1.6. Variables

- Variable I

Seguidor Solar

- Variable II

Evaluación energética comparativa de paneles fotovoltaicos

1.7. Indicadores

- Indicadores de la Variable I

Irradiancia solar

Trayectoria solar

- Indicadores de la Variable II

Posición del sistema según la declinación del sol para determinado día del año

Posición del sistema según la trayectoria del sol durante el día

Temperatura de los Paneles fotovoltaicos

Energía obtenida de los Paneles fotovoltaicos

1.8. Limitaciones de la investigación

- El sistema estará limitado a funcionar solo en presencia de sol (durante el día).
- Debido a la ausencia de financiamiento se deberá construir el sistema con materiales únicamente accesibles para la localidad.
- Debido a la naturaleza de los materiales y a bajos recursos económicos el sistema a construir tendrá calidad de prototipo, diseñado para fines demostrativos y de investigación bajo un entorno ausente de lluvias.

1.9. Descripción de las características de la investigación

- **Tipo de Estudio:** Investigación Tecnológica
- **Nivel de investigación:** Investigación Aplicada, Experimental

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. El Sol

El Sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de $1,39 \times 10^9 m$ en promedio y dista de la Tierra en $1,5 \times 10^{11} m$. Visto desde la Tierra, el Sol rota sobre su eje una vez cada cuatro semanas. Sin embargo este no rota como un cuerpo sólido; a su ecuador le toma acerca de 27 días y a las regiones polares les toma cerca de 30 días cada rotación. El Sol tiene una temperatura en su superficie de 5777 K siendo la temperatura en su interior estimada entre 8×10^6 y $40 \times 10^6 K$ y 100 veces más denso que el agua.

El Sol es en efecto un reactor de fusión continuo usando sus gases constituyentes retenidos por fuerzas gravitacionales como fuente de combustible. Se han sugerido que la energía radiada por el sol es suplida por varias reacciones de fusión, siendo el proceso considerado más importante en el que el hidrógeno (cuatro átomos) se combinan para formar helio (un solo átomo); cuyo núcleo resultantes es menor que la de los cuatro núcleos de hidrógeno juntos, la masa perdida en la reacción es convertida en energía.

La energía producida en el interior de la esfera solar a temperaturas de varios millones de grados debe ser transferida a la superficie y luego ser radiada al espacio. Una sucesión de procesos de radiación y convección es producida con sucesiva

emisión, absorción y re-radiación; La radiación en el núcleo del Sol se encuentra en el espectro de los rayos X y rayos gamma, con las longitudes de onda de la radiación aumentándose a medida que la temperatura desciende a distancias radiales grandes. (Duffie y Beckman, 2013, p. 3)

Y es ésta radiación la que se quiere aprovechar, después de haber recorrido enormes distancias, disminuyendo hasta tener un valor de 1367 W/m^2 fuera de la atmósfera terrestre, pero con suficiente energía aún para suplir todas nuestras necesidades energéticas.

2.2. Movimientos Sol – Tierra y Trayectoria Solar

Es tentador empezar a hablar acerca de los tipos de seguidores solares y como construirlos pero antes de empezar con esto, es necesario conocer nuestro entorno, así como la pieza central de nuestra investigación, el sol. Debemos entender ciertos aspectos de su trayectoria con respecto a la tierra, conocer la cantidad de movimientos existentes y a partir de estos diseñar la manera eficiente y conveniente en la que nuestro seguidor solar debe moverse (grados de libertad y mas). Para de este modo, al momento de hacer nuestra evaluación comparativa, ésta sea lo más certera posible.

2.2.1. El movimiento diurno de la Tierra

La Tierra tarda en dar una vuelta alrededor de su eje 23h 56m 4.1s, (redondeado a 24 horas, para la mayoría de las aplicaciones cotidianas). Desde el suelo, dicho movimiento se refleja en el movimiento aparente que sufren las

estrellas y todos los astros llamándose a este efecto movimiento diurno. Este movimiento es el responsable de que por ejemplo el Sol salga por el Este y se ponga por el Oeste cada día. Puesto que el Sol, los planetas, la Luna y todos los demás cuerpos celestes parecen girar de Este a Oeste, esto significa que en realidad la Tierra está animada del movimiento contrario, es decir, que gira de Oeste a Este. (Asociació Observatori Esteve Duran, 2016)

Esto es cierto en todo el planeta, pero se aprecia diferente en diferentes lugares del mismo. Por ejemplo en el hemisferio Norte se aprecia como un movimiento horario, mientras que en el hemisferio Sur como un movimiento anti horario (dependiendo de la latitud específica y el día del año).

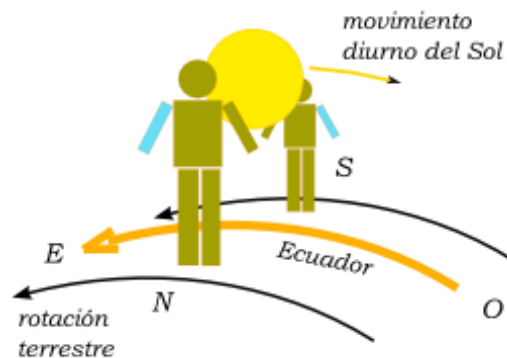


Figura 1. Movimiento aparente del sol visto desde ambos hemisferios. (Recuperado del sitio web https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Movimiento_diurno-Sol.png, 2017)

2.2.2. El movimiento anual de la Tierra

La Tierra gira alrededor del Sol, denotando así, los años. A este movimiento se le llama de traslación. La forma de la trayectoria de La Tierra alrededor del Sol

puede considerarse circular, aunque en realidad es una elipse. La órbita de la tierra, es decir esta circunferencia de giro alrededor del Sol es completamente plana; y el plano que contiene la órbita de La Tierra se le llama plano orbital o también es conocida como eclíptica como puede verse en la figura 2.

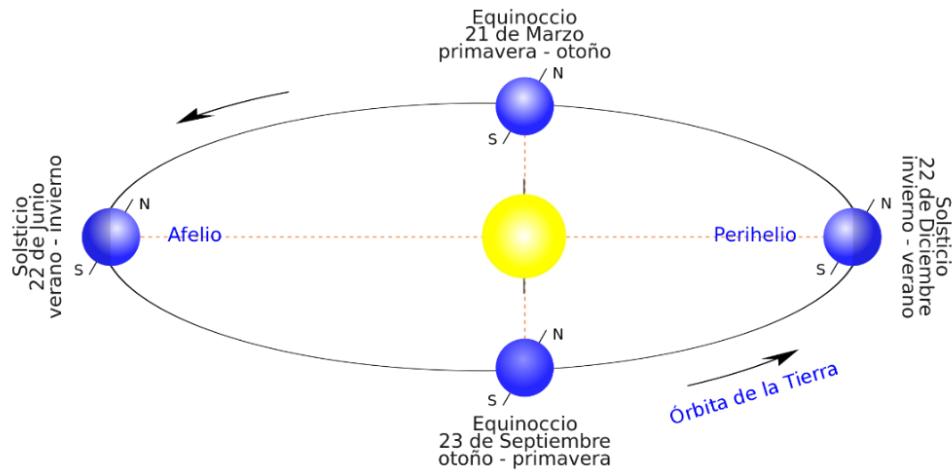


Figura 2. Posiciones de la tierra en la eclíptica a lo largo del año. (Muhammad Iqbal, 1983)

2.2.3. Distancia Tierra – Sol

La cantidad de Radiación Solar que alcanza a la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia del Sol. Por lo tanto es importante calcular el valor de la distancia Tierra – Sol con precisión. Debido a la órbita elíptica de la Tierra tal y como se aprecia en la figura 3, se considerará un valor promedio de la distancia siendo éste valor r_0 llamado una Unidad Astronómica:

$$1 AU = 1,496 \times 10^8 km \quad (1)$$

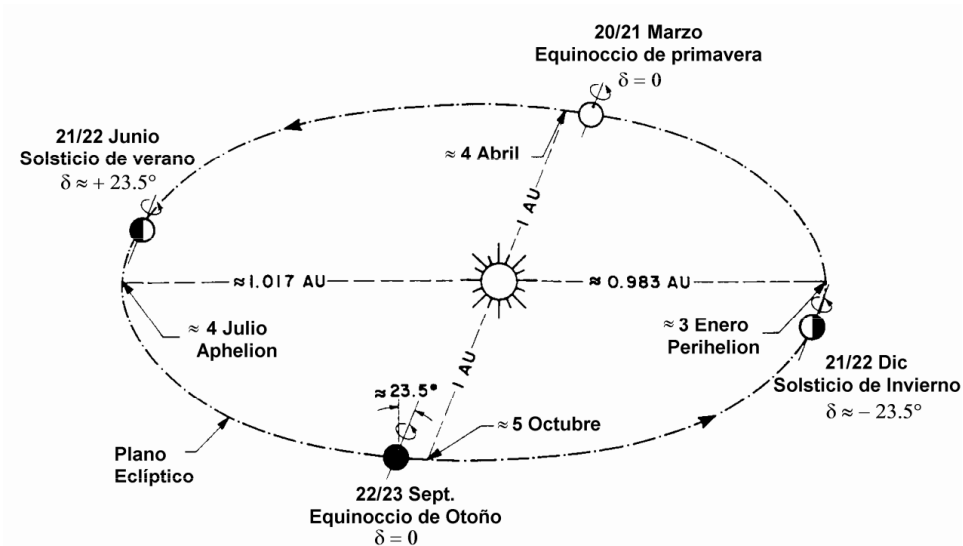


Figura 3. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol. (Muhammad Iqbal, 1983)

O más precisamente, $149\,597\,890 \pm 500$ km. La distancia mínima Tierra – Sol es como 0.983 AU, y la máxima es aproximadamente 1.017 AU. La Tierra está en su punto más cercano al sol (Perihelio) aproximadamente en el 3 de Enero y en su punto más lejano (Afelio) aproximadamente en el 4 de Julio. La Tierra se encuentra a su distancia media del Sol aproximadamente los 4 de Abril y 5 de Octubre. En ciclos de largo plazo, estas distancias son influenciadas, aunque ligeramente, por otros cuerpos celestes y el ciclo del año bisiesto. Sin embargo, La distancia Tierra – Sol r para cada día de cada año es conocido con considerable exactitud. Para información precisa de un año en particular, una Efemérides debería ser consultada tal como la “*American Ephemeris and Nautical Almanac*” (Efemérides Americana y Almanaque Náutico), publicado cada año por la “*U.S. Naval Observatory*” (Observatorio Naval de los Estados Unidos).

Para fines prácticos es más deseable expresar la distancia en una forma matemática simple: para este propósito, están disponibles un número considerable de expresiones matemáticas. Pero tradicionalmente, la distancia r es expresada en términos de una serie de Fourier expandida con cierto número de coeficientes con un error máximo de 0.0001, publicada en 1971 por J. W. Spencer, en donde calcula el factor de corrección de excentricidad de la órbita terrestre, o sea E_0 :

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \quad (2)$$

En esta ecuación, Γ , está en radianes y es llamado ángulo diario. Este es representado por:

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (3)$$

Donde d_n es el número del día del año, empezando desde 1 siendo este el 1 de Enero hasta 365 siendo este el 31 de Diciembre. Febrero siempre se asumirá que tiene 28 días, alcanzando la ecuación 2 su máxima precisión cuando los datos son tomados justo en el medio del ciclo de 4 años del año bisiesto, sin embargo para la mayoría de las aplicaciones tecnológicas y en el área de la ingeniería la ecuación 2 puede reducirse a:

$$E_0 = (r_0/r)^2 = 1 + 0.033 \cos(2\pi d_n/365) \quad (4)$$

Siendo comparada su efectividad al compararse con valores experimentales, pero para una mayor precisión y si se tiene la facilidad de utilizar máquinas digitales, como es en nuestro caso, se preferirá la ecuación 2.

2.3. Declinación Solar δ

El plano de revolución de la Tierra alrededor del Sol es llamado **plano de la eclíptica**. La Tierra en si misma gira alrededor de un eje llamado eje polar, el cual está inclinado aproximadamente en $23,45^\circ$ con respecto a la normal del plano de la eclíptica como ya hemos apreciado con anterioridad en la figura 3. La rotación de la Tierra alrededor de su propio eje causa cambios diurnos en la radiación entrante; la posición de este eje relativa al sol causa cambios estacionales en la radiación solar. Sin embargo el ángulo entre el eje polar y la normal al plano de la eclíptica permanece, a fines prácticos, inalterable. A su vez también el ángulo entre el plano ecuatorial de la Tierra y el plano de la eclíptica permanece invariable. Sin embargo, el ángulo que forma la línea que une los centros del Sol y la Tierra con el plano ecuatorial cambia cada día, de hecho, a cada instante. Este ángulo es llamado la **Declinación Solar δ** , variando de $-23,45^\circ$ a $+23,45$ y cuyo valor se hace 0° en los Equinoccios de primavera y otoño siendo los únicos días en donde el sol sale por el este y se oculta por el oeste, aquí los días y las noches duran exactamente lo mismo, En nuestra latitud no apreciamos demasiado esta diferencia por estar muy cerca al ecuador, pero en latitudes más altas, en algunas épocas del año, por ejemplo, a las 9 pm aún se ve como si estuviera de día. (Iqbal, 1983).

2.3.1. Solsticios y Equinoccios

A partir del equinoccio de otoño (21 Marzo) el Sol inicia su recorrido hacia el Norte hasta llegar, tres meses después, a su punto más extremo el 22 de junio, que es otro día importante y lo llamamos solsticio de invierno (invierno en nuestro hemisferio). En el solsticio de invierno se tiene la noche más larga. Luego vuelve sobre sus pasos durante otros tres meses hasta el equinoccio de primavera (22 de septiembre) cuando sale otra vez exactamente por el Este, y sigue su camino hacia el Sur hasta que llega a su punto más extremo al Sur el 22 de Diciembre solsticio de verano (verano en nuestro hemisferio) aquel es el día más largo y la noche más corta del año. Como se aprecia en la figura 4.

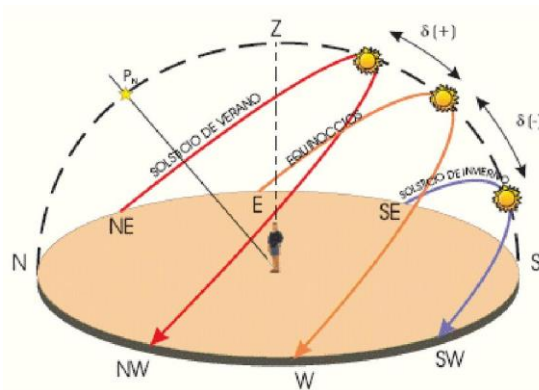


Figura 4. Debido al movimiento del Sol de Norte al Sur durante el año, unas veces sigue un círculo muy grande haciendo este día largo y otras veces un círculo muy pequeño haciendo estos días cortos (Universidad de Antioquia, 2011)

En el Solsticio de Invierno. En el 21 ó 22 de junio, como puede verse en la figura 5, el Hemisferio Sur se inclina alejándose del Sol. Los días son más cortos que las noches y los rayos del Sol inciden de forma oblicua, iniciándose en

este hemisferio la estación más fría, el invierno. Sin embargo en el hemisferio Norte se produce la situación contraria, iniciándose entonces el Verano.

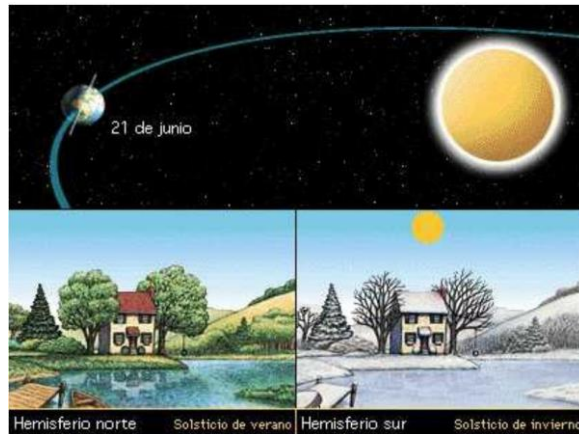


Figura 5. Solsticio para el hemisferio norte como para el sur (Universidad de Antioquia, 2011)

En el Equinoccio de Primavera. En el 22 ó 23 de septiembre, como puede verse en la figura 6, los días y las noches tienen igual duración en todo el planeta, al situarse el Sol en la vertical del Ecuador, comenzando la Primavera en el Hemisferio Sur y el Otoño en el Norte.



Figura 6. Equinoccios para el hemisferio norte y sur (Universidad de Antioquia, 2011)

En el Solsticio de verano. En el 22 ó 23 de diciembre, como puede verse en la figura 7, es el Hemisferio Sur el que tiene los días más largos que las noches, a la vez que los rayos del Sol inciden de una forma más perpendicular, comenzando en este hemisferio la estación más cálida, el verano. En el Hemisferio Norte se produce la situación contraria, iniciándose entonces el invierno.

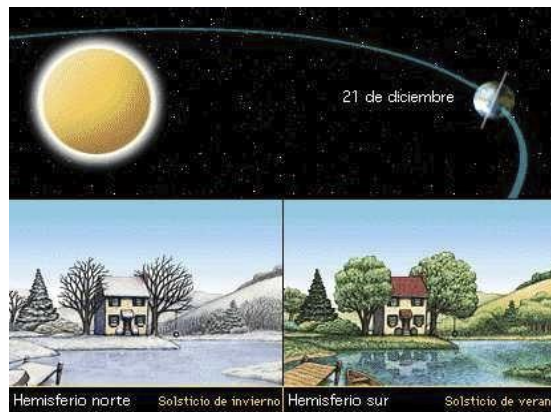


Figura 7. Solsticio para el hemisferio norte como para el sur (Universidad de Antioquia, 2011)



Figura 8. Equinoccios para el hemisferio norte y sur (Universidad de Antioquia, 2011)

En el Equinocio de otoño. En el 20 ó 21 de marzo, como puede verse en la figura 8, los días y las noches tienen igual duración en todo el planeta, al situarse de nuevo el Sol en la vertical del Ecuador, comenzando el Otoño en el Hemisferio Sur y la Primavera en el Hemisferio Norte.

Otro medio de describir la declinación solar es dibujando una esfera celeste con la Tierra en el centro y el Sol rotando alrededor de la Tierra como se muestra en la Figura 9. Los polos celestes corresponden a los puntos en los cuales el eje polar de la Tierra corta a la esfera celeste. De modo similar, el ecuador celeste es una proyección del plano ecuatorial terrestre sobre la esfera celeste. La intersección del plano ecuatorial terrestre con el plano de la revolución del sol, la elíptica, produce un ángulo de aproximadamente $23,5^\circ$. Para cualquier instante, la posición del sol relativa al plano del ecuador celeste describe el ángulo de declinación. La principal variación en la declinación es la debida al ciclo del año bisiesto: durante este período de cuatro años la declinación puede variar desde el orden de $\pm 10'$ en los equinoccios hasta menos de $1'$ en los solsticios.

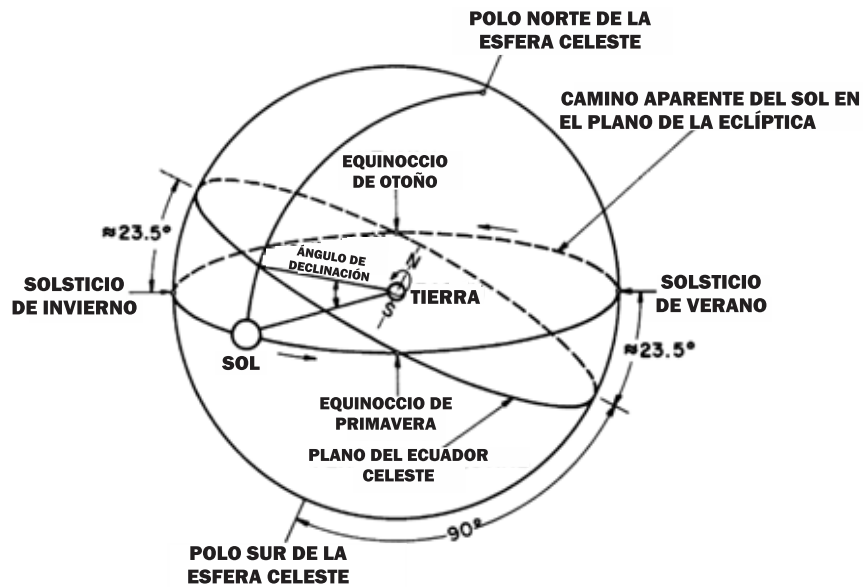


Figura 9. Esfera celeste con el aparente movimiento del sol y la declinación solar. (Muhammad Iqbal, 1983)

En 24h, el máximo cambio de la declinación (lo cual ocurre en los equinoccios) es menor a $0,5^\circ$. Muchos autores han desarrollado diversas ecuaciones para poder encontrar la declinación δ con distintos grados de precisión, sin la obligatoria necesidad de consultar las Efemérides. Spencer desarrollo una de las ecuaciones de mayor precisión para δ , la cual se utilizará en el presente trabajo y se cita a continuación:

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (5)$$

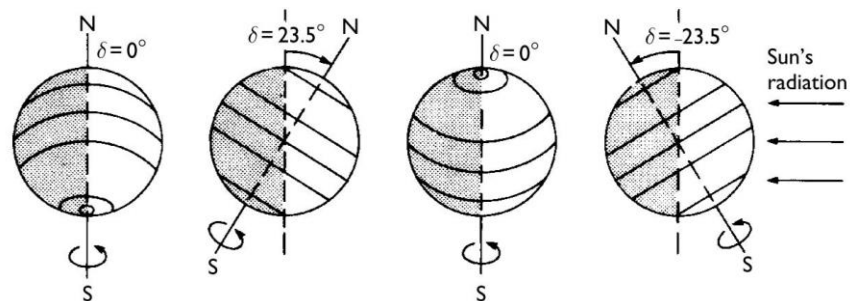


Figura 10. La Tierra como se ve desde un punto a lo largo de su órbita (Twidell y Weir, 2006)

La tabla 1 deja ver porque es tan importante que todo sistema que utilice al sol como principal fuente de energía posea algún sistema de seguimiento ya que de lo contrario la variación de la posición del sol con respecto a una fecha del año podría hacer ineficiente al sistema, como también podría apreciarse en la figura 10. Notar que aquí δ está dado en grados sexagesimales. Esta ecuación estima δ con un error máximo de 0.0006rad ($< 3'$).

Adicionalmente existen otras dos ecuaciones comúnmente utilizadas para la declinación, como la obtenida por Perrin de Brichambaut:

$$\delta = \sin^{-1}\left\{0.4 \sin \left[\frac{360}{365}(d_n - 82)\right]\right\} \quad (6)$$

Y la obtenida por Cooper

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365}(d_n + 284)\right] \quad (7)$$

Tabla 1.

Declinación para cada día del año

Día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	-23,07	-17,28	-7,78	4,36	14,93	22,02	23,20	18,20	8,51	-2,95	-14,26	-21,74
2	-22,99	-17,00	-7,40	4,75	15,24	22,15	23,13	17,94	8,14	-3,33	-14,58	-21,90
3	-22,90	-16,71	-7,02	5,13	15,54	22,29	23,06	17,69	7,78	-3,72	-14,90	-22,05
4	-22,80	-16,41	-6,63	5,51	15,83	22,41	22,98	17,42	7,41	-4,11	-15,22	-22,19
5	-22,70	-16,11	-6,25	5,89	16,12	22,53	22,89	17,16	7,04	-4,50	-15,53	-22,32
6	-22,59	-15,81	-5,86	6,27	16,41	22,64	22,80	16,89	6,67	-4,88	-15,83	-22,45
7	-22,47	-15,50	-5,47	6,65	16,69	22,74	22,70	16,61	6,30	-5,27	-16,13	-22,57
8	-22,34	-15,18	-5,08	7,03	16,96	22,84	22,59	16,33	5,93	-5,65	-16,43	-22,68
9	-22,21	-14,87	-4,69	7,40	17,24	22,93	22,48	16,05	5,55	-6,03	-16,72	-22,79
10	-22,07	-14,54	-4,30	7,77	17,50	23,01	22,36	15,76	5,17	-6,41	-17,01	-22,88
11	-21,92	-14,22	-3,90	8,14	17,77	23,09	22,23	15,46	4,80	-6,79	-17,29	-22,98
12	-21,76	-13,89	-3,51	8,51	18,02	23,16	2,10	15,17	4,42	-7,17	-17,57	-23,06
13	-21,60	-13,55	-3,12	8,87	18,28	23,23	21,96	14,87	4,03	-7,55	-17,84	-23,13
14	-21,43	-13,22	-2,72	9,24	18,52	23,28	21,81	14,56	3,65	-7,92	-18,11	-23,20
15	-21,25	-12,87	-2,33	9,60	18,77	23,33	21,66	14,25	3,27	-8,30	-18,37	-23,26
16	-21,07	-12,53	-1,93	9,95	19,00	23,38	21,50	13,94	2,88	-8,67	-18,62	-23,31
17	-20,88	-12,18	-1,54	10,31	19,23	23,41	21,34	13,62	2,50	-9,04	-18,87	-23,36
18	-20,68	-11,83	-1,14	10,66	19,46	23,44	21,17	13,30	2,11	-9,40	-19,12	-23,39
19	-20,48	-11,47	-0,74	11,01	19,68	23,47	20,99	12,98	1,72	-9,77	-19,36	-23,42
20	-20,27	-11,12	-0,35	11,35	19,90	23,48	20,81	12,66	1,34	-10,13	-19,59	-23,44
21	-20,05	-10,76	0,05	11,70	20,10	23,49	20,63	12,33	0,95	-10,49	-19,82	-23,46
22	-19,83	-10,39	0,44	12,04	20,31	23,49	20,43	11,99	0,56	-10,85	-20,04	-23,46
23	-19,60	-10,03	0,84	12,37	20,51	23,49	20,23	11,66	0,17	-11,21	-20,25	-23,46
24	-19,37	-9,66	1,23	12,71	20,70	23,47	20,03	11,32	-0,22	-11,56	-20,46	-23,45
25	-19,13	-9,29	1,63	13,04	20,88	23,46	19,82	10,98	-0,61	-11,91	-20,67	-23,43
26	-18,88	-8,91	2,02	13,36	21,07	23,43	19,60	10,63	-1,00	-12,25	-20,86	-23,40
27	-18,63	-8,54	2,41	13,68	21,24	23,40	19,38	10,28	-1,39	-12,60	-21,05	-23,37
28	-18,37	-8,16	2,80	14,00	21,41	23,36	19,15	9,93	-1,78	-12,94	-21,23	-23,33
29	-18,11	0,00	3,19	14,32	21,57	23,31	18,92	9,58	-2,17	-13,27	-21,41	-23,28
30	-17,84	0,00	3,58	14,63	21,73	23,26	18,68	9,22	-2,56	-13,61	-21,58	-23,22
31	-17,56	0,00	3,97	0,00	21,87	0,00	18,44	8,87	0,00	-13,94	0,00	-23,16

Nota: Extraído del libro *An Introduction to Solar Radiation* de Muhammad Iqbal (1983)

A pesar de que estas dos ecuaciones son prácticas para su cálculo manual, también es cierto que son menos certeras, así pues como no es nuestra intención encontrar manualmente la declinación y además contamos con el apoyo de un microprocesador para hacer los cálculos necesarios con precisión es que decidimos utilizar la de Spencer.

2.4. Radiación Solar

La radiación del sol después de haber salido del sol y viajado por el espacio entra en la atmósfera en una suerte de interface espacio – atmósfera, donde termina la capa de ionización de la atmósfera. Posteriormente, una cierta cantidad de radiación solar o fotones son absorbidos por la atmósfera, las nubes y las partículas en la atmósfera, una cierta cantidad es reflejada de nuevo en el espacio, y una cierta cantidad es absorbida por la superficie de la tierra. La superficie de la tierra también refleja una cierta cantidad de energía por radiación a diferentes longitudes de onda debido a la temperatura de la superficie terrestre.

La rotación de la Tierra alrededor de su eje produce variaciones horarias en las intensidades de potencia en un lugar dado en el suelo durante el día y da como resultado sombreado completo durante la noche.

La presencia de la atmósfera y los efectos climáticos asociados atenúan y cambian la naturaleza del recurso de energía solar. La combinación de reflexión, absorción (filtración), refracción y dispersión resultan en niveles de radiación altamente dinámica en cualquier lugar dado en la Tierra. Como resultado de la cobertura de nubes y la dispersión de la luz solar, la radiación recibida en cualquier punto es tanto directa (o haz) como difusa (o dispersa).

Después de que la radiación solar entra en la atmósfera de la Tierra, ésta es parcialmente dispersada y parcialmente absorbida. La radiación dispersa es llamada ***Radiación Difusa***. Una vez más, una parte de esta radiación difusa regresa al

espacio y una porción alcanza el suelo. La radiación solar alcanza la superficie de la tierra de tres maneras diferentes como irradiación directa, difusa y reflejada como en la Figura 11.

La cantidad de radiación solar que llega a cualquier parte particular de la superficie de la tierra está determinada por la posición, la época del año, la difusión atmosférica, la cobertura de nubes, la forma de la superficie y la reflectividad de la superficie.

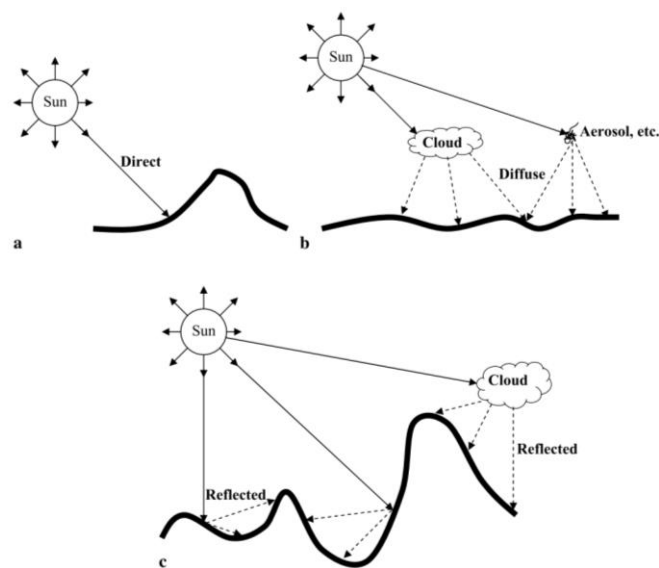


Figura 11. a - c. Trayectoria de la radiación solar. a Directa. b Difusa. c Reflejada. (Zekai Sen, 2008)

2.4.1. Radiación solar directa.

Es aquella que viaja en línea recta desde el sol hasta la superficie terrestre. Los valores del día de cielo claro se miden en muchas localidades del mundo. Modelar esto requeriría conocimiento de intensidades y dirección en diferentes momentos del día. Radiación directa como su nombre indica es la cantidad de

radiación solar recibida en cualquier lugar de la tierra directamente desde el sol sin ningún tipo de disturbios. No hay interferencia sobre la radiación solar directa por el polvo, gas, nubes o cualquier otro material intermedio. La radiación directa es prácticamente adsorbida por algún intermediario y luego este intermediador emite ondas electromagnéticas similares a la fuente principal que es el sol. La radiación solar directa puede reflejarse y dispersarse a través de la superficie de la tierra o de nuevo a la atmósfera. Por otro lado, la radiación que llega al suelo directamente en línea desde el sol se denomina directa o *radiación de haz* como se muestra en la figura 11a.

2.4.2. Radiación solar difusa.

La radiación solar directa es en realidad el flujo de fotones en el espacio y tiene una velocidad de 299 792 458 m/s exactamente. La radiación difusa se produce cuando pequeñas partículas y las moléculas de gas difumina parte de la radiación solar entrante en direcciones aleatorias sin ninguna alteración en la longitud de onda de la energía electromagnética.

Al pasar a través de la atmósfera, el haz solar experimenta absorción y dispersión dependiente de la longitud de onda y de la dirección por los gases atmosféricos, los aerosoles y las gotitas de las nubes. La radiación dispersa que llega a la superficie de la tierra se denomina radiación difusa (figura 11b). La radiación difusa es primero interceptada por los constituyentes del aire como el vapor de agua, el CO₂, el polvo, los aerosoles, las nubes, etc., y luego se libera

como radiación dispersa en muchas direcciones. Todas las partículas pequeñas o grandes en la naturaleza dispersan la radiación. La radiación difusa se dispersa del haz solar por gases (dispersión de Rayleigh) y por aerosoles (que incluyen partículas de polvo, así como partículas de sulfato, hollín, partículas de sal marina, polen, etc.).

2.4.3. Radiación solar reflejada

La radiación reflejada se refleja principalmente en el terreno y, por lo tanto, es más importante en las zonas montañosas. La radiación directa de onda corta es el componente más importante de la radiación global, ya que contribuye más al balance energético y también a los demás componentes que dependen de ésta, directa o indirectamente (Kondratyev 1965). Si las partículas son esféricas y mucho más pequeñas que la longitud de onda de la radiación incidente, se denomina *dispersión de Rayleigh*. En la dispersión de Rayleigh, el proceso de dispersión es idéntico en direcciones hacia adelante y hacia atrás con un mínimo de dispersión en el medio. Cuando el tamaño de partícula es del orden de la longitud de onda en este caso, la dispersión se llama *dispersión de Mie* y más energía se dispersa en una dirección hacia adelante que hacia atrás. En cualquier día claro, el componente difuso de Rayleigh y la dispersión de aerosol es de aproximadamente el 10-30% de la radiación incidente total, mientras que cuando el haz solar pasa a través de una nube esencialmente toda la radiación superficial es difusa. Esta radiación consiste en fotones solares que llegan de todas las direcciones del cielo, con intensidades

dependiendo de la dirección entrante. La radiación difusa ocurre cuando partículas pequeñas y moléculas de gas difunden parte de la radiación solar entrante en direcciones aleatorias sin ninguna alteración en la longitud de onda de la energía electromagnética.

El modelado de la energía solar requiere el conocimiento de la reflectancia superficial y forma, un medio de modelar cualquier dispersión. El Albedo es una medida de cuanta radiación es reflejada por una superficie. Cuando el *albedo* es 1,0, toda la radiación se refleja; ninguna absorbida. Cuando el albedo es 0,0 no se refleja ninguna radiación; Toda es absorbida (Graves, 1998). Una proporción significativa de la radiación solar directa que golpea una superficie es *reflejada*, particularmente en la nieve y las nubes.

Calcular la radiación difusa proveniente de las nubes requeriría modelar el comportamiento de las nubes mismas lo que es considerado imposible de hacer y que habría sido variable de día en día. Al parecer esta solo contribuye una pequeña parte a la energía radiante por encima del espectro medio visible hasta el espectro infrarrojo, pero puede contribuir hasta un 40% de la energía de radiación desde el espectro medio visible hasta el espectro medio ultravioleta (Barbour et al., 1978).

La radiación solar total (global) es la suma del haz y la radiación solar difusa en una superficie. Las mediciones más comunes de la radiación solar son radiación total sobre una superficie horizontal, en lo sucesivo denominada radiación global en la superficie. La radiación solar total se utiliza a veces para indicar cantidades

integradas en todas las longitudes de onda del espectro solar. La energía total del sol está compuesta de 7% de radiación ultravioleta (UV), 47% de radiación visible y 46% de radiación infrarroja (calor). La radiación UV hace que muchos materiales se degraden y la capa de ozono en la atmósfera superior la filtra de manera significativa.

De hecho, la radiación difusa comprende menos del 16% de la irradiancia total a longitudes de onda visibles en la región verde y roja (Dubayah 1992), aumentando al 30% para el azul. El flujo de la radiación difusa del cielo claro varía con la orientación de la pendiente de la misma manera que el flujo de la radiación solar directa, preservando así la variabilidad espacial en la radiación total (Dubayah et al., 1989).

2.4.4. Trayectoria de la Irradiación solar en la atmósfera

Los rayos de radiación emanados por el sol salen de el y viajan hacia la Tierra encontrando en su camino muchas moléculas, siendo el número de ellas dependiente de la distancia recorrida l , la cual es llamada distancia de recorrido (o slant path). Si la densidad dependiente de dicha distancia es $\rho(l)$, entonces la masa de aire óptica real m_a , puede expresarse como:

$$m_a = \int_0^{\infty} \rho(l) dl \quad (8)$$

Esto es válido para radiación monocromática ya que la refracción a lo largo del trayecto recorrido depende de la longitud de onda. Si el sol está en el cenit de cierta locación, la ecuación 8 puede ser escrita como:

$$m_z = \int_0^{\infty} \rho(z) dz \quad (9)$$

Donde z es la distancia en la dirección del cenit, figura 12.

Si la trayectoria es diferente de la dirección del cenit, entonces su trayectoria óptica puede ser expresado como la relación m de la ecuación 8 y la ecuación 9.

$$m = \frac{\int_0^{\infty} \rho(l) dl}{\int_0^{\infty} \rho(z) dz} \quad (10)$$

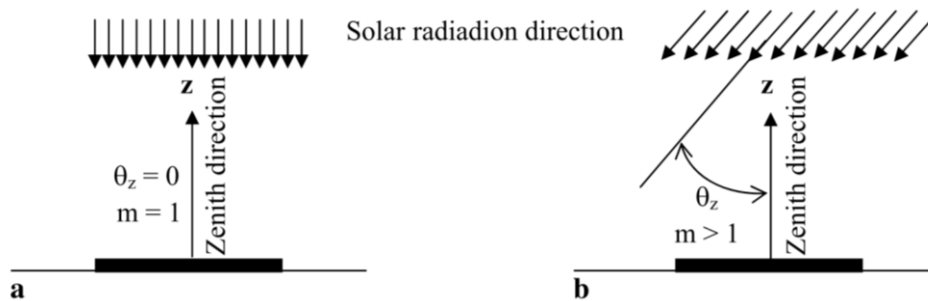


Figura 12. a, b. Trayectoria de la radiación solar. (Zekai Sen, 2008)

Esto se denomina masa de aire óptica relativa. Sobre la base de los supuestos de que la tierra no tiene ninguna excentricidad y la troposfera es completamente homogénea y libre de cualquier aerosol o vapor de agua, entonces la masa óptica relativa, m , en cualquier dirección con un ángulo de θ_z desde el cenit puede ser escrito simplemente como:

$$m = m_a \sec \theta_z = \frac{m_a}{\cos \theta_z} \quad (11)$$

Si dichas suposiciones se aplican a un caso real, esta expresión produce errores de hasta 25% en un $\theta_z = 60^\circ$, el cual disminuye hasta el 10% en $\theta_z = 85^\circ$ (Iqbal 1986). Al nivel del mar, $m = 1$ cuando el sol está en el cenit y $m = 2$ para $\theta_z = 60^\circ$.

La masa de aire como se define en la ecuación 11 es una cantidad útil para tratar los efectos atmosféricos. Indica la distancia relativa que la luz debe viajar a través de la atmósfera a un lugar determinado. No hay efecto de atenuación en el espacio fuera de la atmósfera, la masa de aire se considera igual a cero y como igual a uno cuando el sol está directamente sobre la cabeza. Sin embargo, un valor de masa de aire de 1,5 se considera más representativa de las condiciones terrestres medias y se utiliza comúnmente como condición de referencia en la calificación de módulos y arreglos fotovoltaicos (Fig. 13).

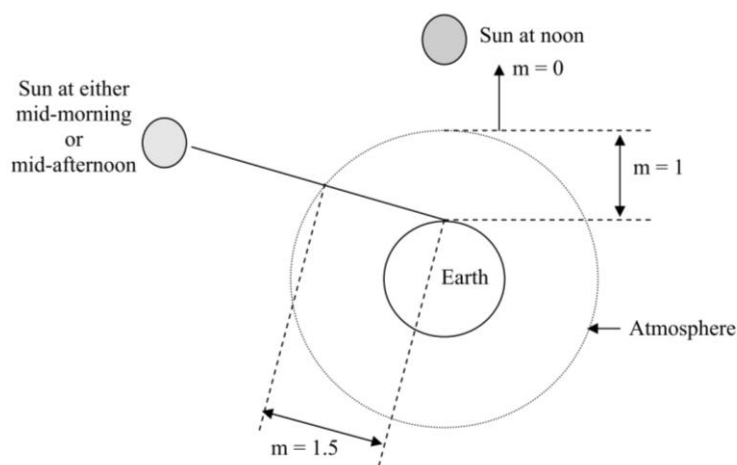


Figura 13. Angulo del sol y distancia a través de la atmósfera. (Zekai Sen, 2008)

Los dos factores principales que afectan a la relación de masa de aire son la dirección de la trayectoria y la altitud local. La dirección de la trayectoria se describe en términos de su ángulo cenital θ_z , que es el ángulo entre la trayectoria y la posición cenital directamente sobre la cabeza. El ajuste en la masa de aire para la altitud local se hace en términos de la presión atmosférica local, p , y se define como:

$$m = \frac{p}{p_0} m_0 \quad (12)$$

donde p es la presión local y m_0 y p_0 son la masa del aire y la presión respectivamente al nivel del mar. La ecuación 11 es válida solamente para ángulos menores que 70° (Kreith and Kreider 1978). De lo contrario, la aproximación secante subestima la energía solar porque la refracción atmosférica y la curvatura de la tierra no se han tenido en cuenta. (Frouin et al. 1989) han sugerido el uso de lo siguiente:

$$m = [\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (13)$$

Kreith y Kreider (1978) y Cartwright (1993) han sugerido el uso de la siguiente relación, donde el modelo requiere el cálculo de la relación de masa de aire como:

$$m = [1229 + (614 \sin \alpha)^2]^{1/2} - 614 \sin \alpha \quad (14)$$

Es obvio entonces que la proporción relativa de radiación directa a difusa depende de la ubicación, la estación del año, la elevación del nivel medio del mar

y la hora del día. En un día claro, el componente difuso será alrededor del 10 – 20% de la radiación total, pero durante un día nublado puede llegar hasta el 100%. Este punto implica, prácticamente, que en los cálculos de energía y radiación solar, y las condiciones meteorológicas, además de las implicaciones astronómicas, deben tenerse en cuenta. Por otro lado, a lo largo del año la cantidad de radiación solar difusa es menor en las regiones ecuatoriales y tropicales que en las regiones subpolares y polares del mundo. La radiación total instantánea puede variar considerablemente durante el día dependiendo de la cobertura de nubes, la concentración de polvo, la humedad, etc.

2.4.5. Constante Solar

La radiación del sol está sujeta a muchos efectos de absorción, difusión y reflexión dentro de la atmósfera terrestre, que tiene unos 10 km de espesor y medio, por lo tanto, es necesario conocer la densidad de potencia, Watts por metro por minuto en la atmósfera exterior de la Tierra y en ángulo recto con la radiación incidente. La densidad definida de esta manera se denomina constante solar. La constante solar y el espectro asociado inmediatamente fuera de la atmósfera terrestre están determinados únicamente por la naturaleza del sol radiante y la distancia entre la tierra y el sol.

La Tierra recibe prácticamente toda su energía del espacio en forma de radiación solar EM. Su contenido total de calor no cambia significativamente con el tiempo, lo que indica un equilibrio global cercano entre la radiación solar

absorbida y la corriente difusa de radiación térmica a baja temperatura emitida por el planeta. La radiación a la distancia solar media, la constante solar, es de unos 1360 W/m^2 (Monteith 1962). A la distancia media tierra – sol el sol subtende un ángulo de $32'$. La radiación emitida por el sol y su relación espacial con la tierra dan lugar a una intensidad casi fija de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre. La constante solar, $I_0 \text{ (W/m}^2\text{)}$, es la energía del sol por unidad de tiempo por unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación. Las mediciones realizadas experimentalmente con varios instrumentos separados resultaron como $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ con un error estimado de $\pm 1.5\%$. El Centro Mundial de Radiación (The World Radiation Center) ha adoptado el valor de 1367 W/m^2 con una incertidumbre de 1% . La constante solar más actualizada es $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, el cual es equivalente a $I_0 = 1.960 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ o $4.921 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}$. Como la distancia entre el Sol y la Tierra cambia durante todo el año la constante solar también cambia, como se muestra en la figura 14.

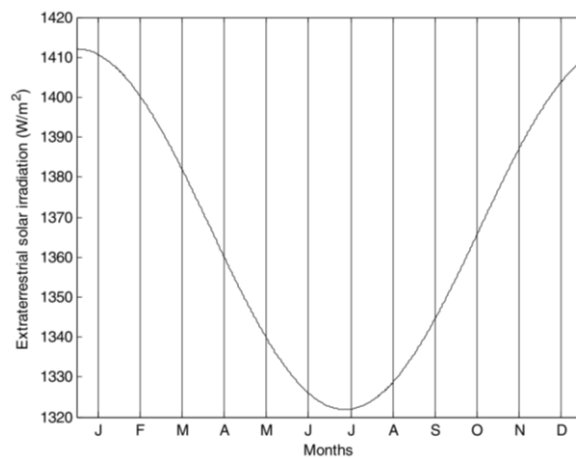


Figura 14. Variación mensual de la radiación extraterrestre. (Muhammad Iqbal, 1983)

Considerando que la constante solar es una medida de la densidad de energía solar fuera de la atmósfera terrestre, al momento de considerar sus posibles usos en tecnología fotovoltaica podemos concluir que es necesario considerar tanto los efectos atmosféricos como los geométricos, incluyendo la rotación de la Tierra alrededor de su eje inclinado y su revolución orbital alrededor del sol

2.4.6. Cálculo de la Irradiancia Solar

La irradiancia solar, I (W/m^2), es la razón a la que la energía radiante es incidente sobre una superficie unitaria. La energía incidente por unidad de superficie se encuentra mediante la integración de la irradiancia a lo largo de un tiempo especificado, generalmente una hora o un día. La insolación es un término específicamente para la irradiación de la energía solar sobre superficies de cualquier orientación.

Hay dos dimensiones para el flujo de energía debido a la energía de los fotones y la energía misma. Los especialistas en "energía solar" piensan en términos de una expresión integrada durante un cierto intervalo de tiempo y tienen la dimensión de energía, H , que es la "insolación" como la "irradiancia" integrada, siendo la insolación diaria H es la energía total por unidad de área recibida por el Sol en un día, siendo su ecuación:

$$H = \int_{t=0h}^{t=24h} G dt \quad (15)$$

pudiendo ser modelada explícitamente, pero en la práctica esto es costoso desde el punto de vista computacional ya que se debe calcular la radiación difusa de diferentes partes del cielo (Sekai Sen 2008). Para calcular el flujo solar real, se deben utilizar datos de campo de varios piranómetros (que midan el flujo solar entrante real en una estación), datos ópticos atmosféricos o procesamiento atmosférico por sonar.

Si I es la intensidad de la radiación que llega a la superficie del suelo desde una dirección determinada, entonces la cantidad incidente por unidad de superficie a lo largo de la dirección cenital es:

$$I_z = I \cos \theta_z \quad (16)$$

Donde θ_z es el ángulo acimutal entre la normal a la superficie y la dirección del haz mostrada en la figura 16. En los esfuerzos de modelado más simples se supone que la tierra es horizontal.

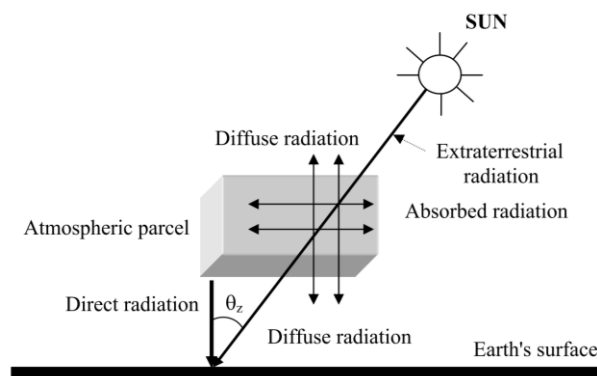


Figura 16. Radiación solar superficial. (Zekai Sen, 2008)

La radiación solar varía según las variaciones orbitales. Si I_T es la radiación solar total emitida por el sol a todas las frecuencias, entonces a una distancia R

desde el centro del sol, el flujo de la radiación será el mismo suponiendo que la radiación es igual en todas las direcciones. SI el flujo de la radiación por unidad de áreas a una distancia R es representada por $Q(R)$, entonces la radiación total es igual a $4\pi R^2 Q(R)$. De ahí que es posible escribir que:

$$I_T = 4\pi R^2 Q(R) \quad (17)$$

O tambien

$$Q(R) = \frac{I_T}{4\pi R^2} \quad (18)$$

Como vimos anteriormente, la Tierra está aproximadamente 150×10^6 km lejos del sol, por lo tanto la ecuación 18 conduce a que la potencia solar total es aproximadamente 3.8×10^{26} W. Por supuesto la radiación incidente en un planeta esférico no es igual a la constante solar de ese planeta. La tierra intercepta un disco de radiación del sol con área πR^2 , donde R es el radio de la tierra. Puesto que el área superficial de la tierra es $4\pi R^2$, la cantidad de radiación solar por unidad de área en un planeta esférico se convierte en:

$$\frac{\pi R^2 Q(R)}{4\pi R^2} = \frac{Q(R)}{4} \quad (19)$$

En consecuencia, la radiación media en la superficie terrestre puede calcularse como $1367/4 = 340 \text{ W/m}^2$. Todos estos cálculos suponen que la Tierra es perfectamente esférica sin ninguna atmósfera y gira sobre una órbita circular sin excentricidad. Por supuesto, estas simplificaciones deben utilizarse en aplicaciones prácticas. La fuerza motriz para la atmósfera es la absorción de energía solar en la

superficie de la tierra. Sobre las escalas del tiempo que son largas comparadas a éstos que controlan la redistribución de la energía, el sistema de la tierra-atmósfera está en equilibrio termal. La absorción de la radiación solar, en longitudes de onda visibles como radiación de onda corta (SW), debe ser compensada por la emisión al espacio de la radiación infrarroja o de onda larga (LW) por la superficie y la atmósfera del planeta. Un simple balance de las radiaciones SW y LW conduce a una temperatura de cuerpo negro equivalente para la Tierra como $T = 255$ K. Esto es unos 30 K más frío que la temperatura superficial media global $T_s \approx 288$ K. La diferencia entre estas dos temperaturas se debe al Efecto invernadero, que resulta de las diferentes formas en que la atmósfera procesa las radiaciones SW y LW. Aunque es transparente a la radiación SW (longitud de onda $\approx 1 \mu\text{m}$), la misma atmósfera es casi opaca a la radiación LW (longitud de onda $\approx 10 \mu\text{m}$) re-emitida por la superficie del planeta. Atrapando energía radiante que finalmente debe ser rechazada en el espacio, la capacidad de la atmósfera eleva la temperatura superficial más allá de lo que sería en ausencia de una atmósfera.

El cambio en la radiación solar extraterrestre se puede calcular tomando en cuenta los hechos astronómicos de acuerdo a la excentricidad de la órbita con la ecuación 4. Por otra parte, la radiación solar se atenúa cuando pasa a través de la atmósfera y, en un caso simplificado, puede estimarse según una disminución exponencial utilizando la Ley de Bouger (Kreith y Kreider 1978):

$$I = I_0 e^{-km} \quad (20)$$

Donde se asume un cielo despejado, I y I_0 son las intensidades del haz de radiación terrestre y extraterrestre, k es una constante de absorción y m es la relación de masa del aire.

Queda más que claro que para que cierta superficie sea beneficiada con la mayor cantidad de radiación solar ésta debe de estar orientada de formar perpendicular al haz de radiación Directa, es decir $\theta_z = 0$ asegurando así que la ecuación:

$$H_c = \int (G_b \cos \theta + G_d) dt \quad (21)$$

De como resultado el máximo valor posible.

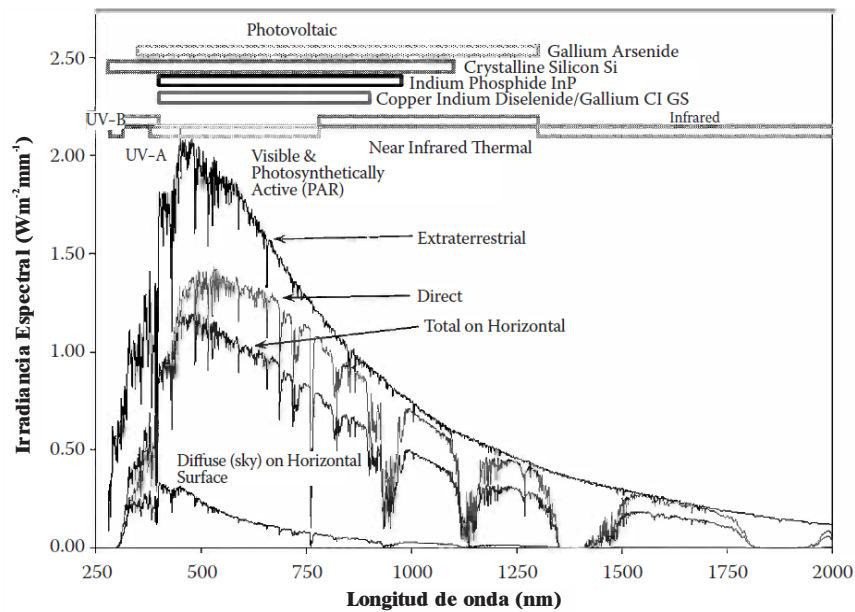


Figura 17. Distribución representativa de la potencia como una función de la longitud de onda para la energía solar en la atmósfera superior, para condiciones de un cielo despejado, Las barras muestran regiones utilizadas por sistemas de conversión de energía. (Myers, 2013)

2.4.7. Medición de la irradiancia solar global.

La radiometría es la medida de la radiación. La conversión de fotones de luz a algún tipo de señal medible es el propósito de los detectores radiométricos, en donde se prefiere que tengan un campo de visión hemisférico a fin de medir la irradiancia solar global. Como los de la figura 18.

Históricamente, ha habido varios medios para lograr esta conversión. Estos incluyen desde procesos térmicos hasta aplicación del efecto fotoeléctrico en detectores de estado sólido (Myers, 2013), sin embargo todos estos instrumentos son clasificados en: *Calorimétricos, Termomecánicos, Termoelectrónicos o fotoeléctricos*, siendo dichos instrumentos, *los sensores*, el corazón de la radiometría. Explicados brevemente a continuación según (Garg y Garg, 1993).

Basados en la sensibilidad, estabilidad y exactitud, la **WMO** (World Meteorological Organization) siendo la Organización Meteorológica Mundial por sus siglas en inglés clasificó los piranómetros como: *Primera clase, Segunda Clase y Tercera clase*, cambiando las características de estas clasificaciones cada cierta cantidad de años según el advenimiento de nueva tecnología siendo informada las características de estas clases en la *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (actualmente vigente la edición 2014).

Sensores Calorimétricos. En los instrumentos calorimétricos, la energía radiante incide sobre un metal de alta conductividad revestido con una pintura negra

de alta absorción. La energía radiante es convertida en calor el cual puede ser medido por una variedad de medios, usualmente termómetros.

Sensores Termomecánicos. En los instrumentos basados en el principio termomecánico el flujo radiante es medido mediante el plegado de una banda bimetalica, en donde los coeficientes desiguales de expansión térmica provocan la flexión de las placas en una curva. La distorsión se transmite óptica o mecánicamente a un indicador.

Sensores Termoeléctricos. Un dispositivo termoelectrico aplica el efecto Seebeck y consiste en dos cables metálicos de distinto material cuyos extremos son unidos. Una fuerza electromotriz (f.e.m.) es desarrollada cuando las dos juntas están a diferentes temperaturas, esta f.e.m. desarrollada es proporcional al diferencial de temperatura, y depende del material del que estén hechos los dos metales.

Sensores Fotovoltaicos. Estos dispositivos se basan en el Efecto Fotovoltaico Un dispositivo fotovoltaico esta hecho de un material semiconductor como el silicio. La junta de semiconductores p – n es formado por la unión de un material con déficit de electrones (huecos) a un material con un exceso de ellos. Una corriente eléctrica surge del movimiento continuo de electrones y huecos en exceso.

La celda fotoconductor. Es un dispositivo semiconductor de dos terminales cuya resistencia terminal varía (linealmente) con la intensidad de la luz incidente. Por razones obvias, con frecuencia se llama *dispositivo fotorresistivo* o

Light Dependent Resistor (LDR). En la figura 18 se ilustra la construcción típica de una celda fotoconductora junto con el símbolo gráfico más común. (Boylestad y Nashelsky, 2009, p. 817)

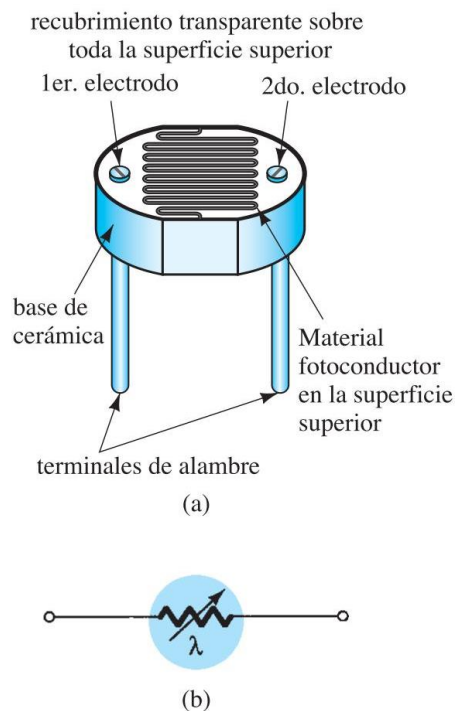


Figura 18. Celda Fotoconductora, a. Construcción, b. Símbolo (Boylestad y Nashelsky, 2009)

Entre los materiales fotoconductores de uso más frecuente están el sulfuro de cadmio (CdS) y el seleniuro de cadmio (CdSe). La respuesta espectral pico ocurre a aproximadamente 5100 Å para CdS y a 6150 Å para CdSe como se puede observar en la figura 19. El tiempo de las unidades de CdS es alrededor de 100 ms y el de las celdas de CdSe es de 10 ms. La celda fotoconductora no tiene una unión como el fotodiodo. Una delgada capa del material conectada entre las terminales simplemente se expone a la energía luminosa incidente.

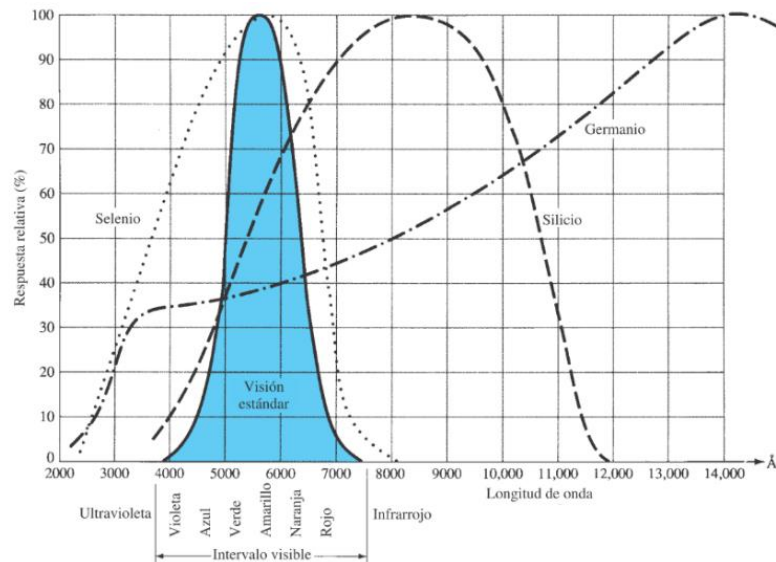


Figura 19. Respuestas espectrales relativas para el silicio, germanio y selenio, comparadas con las del ojo humano (Boylestad y Nashelsky, 2009)

A medida que la iluminación que incide en el dispositivo se hace más intensa, el estado energético de un mayor número de electrones en la estructura también se incrementará debido a la disponibilidad incrementada de los paquetes de fotones de energía. El resultado es un número cada vez mayor de electrones “libres” en la estructura y la reducción de la resistencia terminal. La curva de sensibilidad de un dispositivo fotoconductor típico aparece en la figura 20. Observe la linealidad (cuando se traza utilizando una escala logarítmica) de la curva resultante y el gran cambio en la resistencia para el cambio indicado de iluminación.

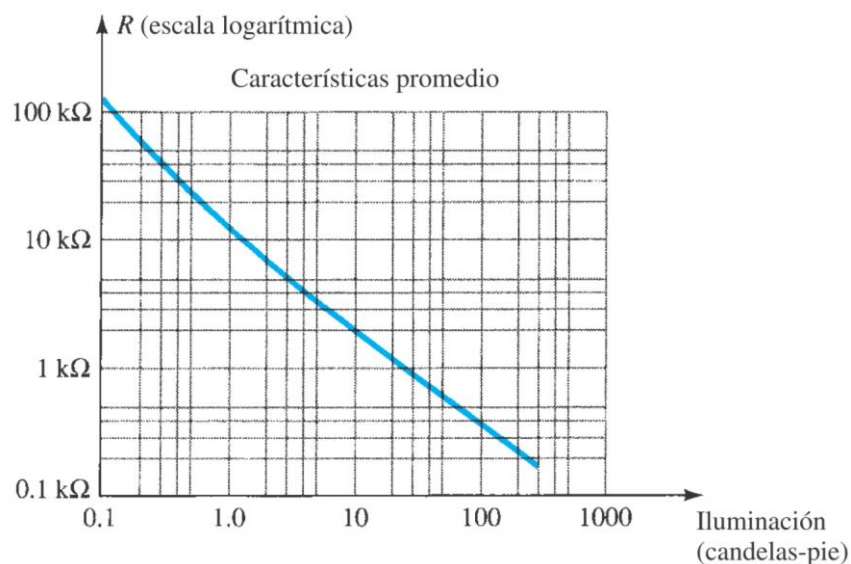


Figura 20. Características terminales de una celda fotoconductora. (Boylestad y Nashelsky, 2009)

2.5. Aprovechamiento de la Radiación

Existen muchas formas de aprovechar la radiación solar a fin de convertirla en energía pero aquí solo se mencionará aquel que se deriva del efecto fotovoltaico. La energía fotovoltaica es la energía eléctrica obtenida a través de los fotones procedentes de la luz solar mediante células fotovoltaicas. Este tipo de energía es cada día más importante debido a la mayor necesidad de energías limpias que permitan un desarrollo sostenible. La aparición de este nuevo método de producir energía estaba años atrás, restringido a la alimentación eléctrica de lugares aislados, en la actualidad las nuevas normativas y la evolución en la tecnología hacen que las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red supongan un porcentaje de la potencia total instalada en Tacna.

2.5.1. La célula fotovoltaica

Cuando la luz del sol incide sobre ciertos materiales llamados semiconductores, los fotones que la constituyen son capaces de transmitir su energía a los electrones de valencia del semiconductor para que rompan el enlace que les mantiene ligados a los átomos respectivos. Por cada enlace roto queda un electrón libre para circular dentro del sólido. La falta de electrón en el enlace roto, que se llama hueco, también puede desplazarse libremente por el interior del sólido, transfiriéndose de un átomo a otro debido al desplazamiento del resto de los electrones de los enlaces. Los huecos se comportan, en muchos aspectos, como partículas con carga positiva igual a la del electrón. . (Lorenzo y Araujo, 1994)

El movimiento de los electrones y huecos en direcciones opuestas genera una corriente eléctrica en el semiconductor capaz de circular por el circuito externo, y liberar en él energía de la cedida por los fotones al crear los pares electrón – hueco. Para separar los electrones de los huecos, e impedir que restablezcan el enlace, se utiliza un campo eléctrico (o la correspondiente diferencial de potencial), que hace que ambos circulen en direcciones opuestas, dando lugar a una corriente en el sentido del citado campo eléctrico.

Hoy en día existen a nivel de investigación en laboratorio y en el mercado diferentes tipos de celdas solares, las cuales se diferencian por el tipo de material usado para su fabricación y el tipo de juntura PN, Así se tienen celdas del tipo

homojuntura PN (caso del silicio monocristalino y policristalino) y tipo heterojunturas (caso CIS (CuInSe_2), CISG $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$), y otras.

2.5.2. Módulo Fotovoltaico

Desde el punto de vista de la aplicación de los sistemas fotovoltaicos para la obtención de la electricidad, es necesaria la asociación de células FV hasta obtener una potencia de generación deseada, que dependerá del tipo de instalación y adaptación de corriente. Esta asociación se materializa, en primer lugar, en el módulo FV, que es el dispositivo comercial ya acabado consistente en una asociación de células FV siguiendo una configuración serie-paralelo determinada y preparado para su instalación exterior.

Tradicionalmente los módulos fotovoltaicos más utilizados en aplicaciones autónomas de pequeña potencia estaban constituidos por 33 ó 36 células de silicio cristalino, asociadas en serie. No obstante en la actualidad, con la amplia gama de aplicaciones fotovoltaicas existentes y el incremento de nuevas aplicaciones como la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios o los módulos fotovoltaicos de alta concentración, el tamaño y características de los módulos presenta una gran variación, pudiendo encontrarse desde el módulo convencional con cubierta convencional transparente, y con 36 células conectadas en serie, hasta módulos semitransparentes coloreados especialmente para su integración en edificios, o los llamados “AC-modules”, que incorporan un pequeño inversor en la caja de conexiones generando por tanto en corriente alterna.

2.5.3. Tipos de Células solares que conforman el Módulo Fotovoltaico.

Existen diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales empleados, los métodos de fabricación que se empleen y la forma final. A continuación se mencionan los materiales que pueden formar las células solares:

Silicio Puro Monocristalino. Basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7% para éste tipo de paneles siendo en los comercializados del 16%.

Silicio puro Policristalino. Los materiales son semejantes a los del tipo anterior aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles policristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Se obtiene con ellos un rendimiento en laboratorio del 19,8% y en los módulos comerciales del 14% siendo de bajo costo.

Silicio amorfo. (TFS) Basados también en el silicio, pero a diferencia de los dos anteriores, este material no sigue aquí estructura cristalina alguna. Paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos (Calculadoras, relojes) y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 13% siendo el de los comerciales del 8%.

Teluro de cadmio. Posee un rendimiento en laboratorio del 16%, mientras que en módulos comerciales 8%.

Arseniuro de Galio. Uno de los materiales más eficientes, presenta unos rendimientos en laboratorio del 25,7% siendo los comerciales del 20%

Diseleniuro de cobre en indio. Con rendimientos en laboratorio próximos al 17% y en módulos comerciales del 9%

Triple unión. GaAs, Ge y GaInP2. Esta unión de tres semiconductores obtiene un rendimiento del 39%.

2.5.4. Característica I – V de iluminación .

La corriente eléctrica suministrada por una célula solar a una carga viene dada por la diferencia entre la fotocorriente I_L y la corriente de recombinación o de diodo, $I_D(V)$, De acuerdo con la ecuación 22:

$$I = I_L - I_D(V) \quad (22)$$

debido a la polarización producida por el voltaje generado. Considerando, para simplificar, que la corriente de diodo puede expresarse mediante el modelo de una sola exponencial, la ecuación característica del dispositivo es:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right] \quad (23)$$

La característica I – V representada por esta ecuación tiene la forma estándar que se muestra en la figura 21.

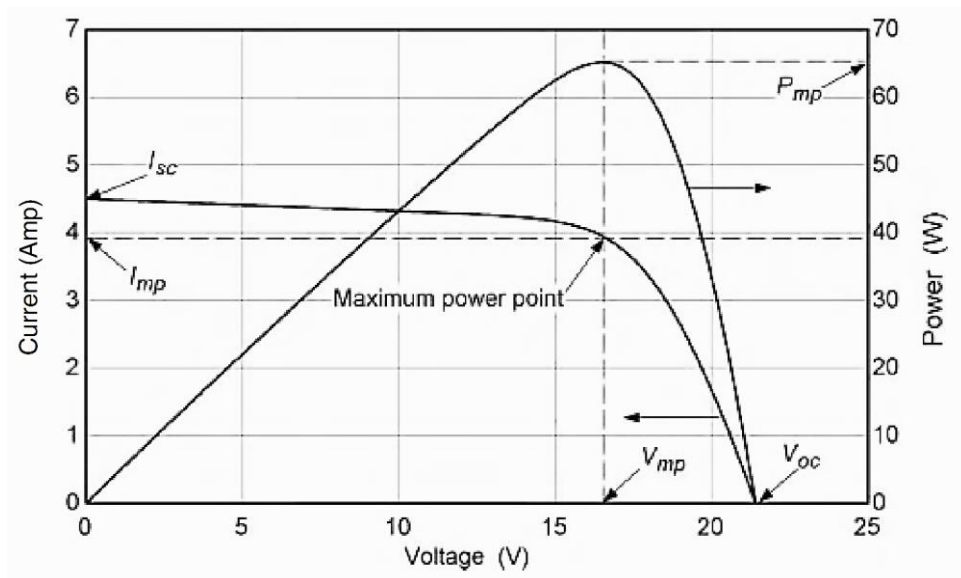


Figura 21. Característica I – V de iluminación. (Duffie & Beckman, 2000)

Corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto. Como puede observarse en la figura 21, el mayor valor de la corriente en la región de generación se obtiene para condiciones de cortocircuito, $V=0$. Según la ecuación 23, la corriente de cortocircuito I_{sc} viene dada por:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_L \quad (24)$$

Si el dispositivo se mantiene en circuito abierto ($I = 0$), éste se autopolarizará con una cierta tensión, que es la mayor que puede soportar en la región de generación. Se trata de la *tensión de circuito abierto* V_{oc} y su valor es tal que la fotocorriente queda completamente compensada por la corriente de polarización. Esto es, $I_L = I_D(V_{oc})$, en condiciones de circuito abierto y, teniendo en cuenta la ecuación 23 resulta:

$$V_{OC} = m \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (25)$$

La definición de los dos parámetros de operación anteriores permite escribir la característica de la célula de la siguiente manera alternativa:

$$I = I_{SC} \left[1 - \exp \left(- \frac{e(V_{OC} - V)}{mkT} \right) \right] \quad (26)$$

que puede resultar de utilidad en determinadas ocasiones. La fórmula es prácticamente cierta alrededor del circuito abierto, pero su validez para todo el rango de funcionamiento es cuestionable porque los parámetros m e I_0 de la ecuación 23 son, en general, variables con el punto de trabajo.

Punto de máxima potencia. Como ya se ha indicado anteriormente, la región de la curva característica comprendida entre I_{SC} y V_{OC} corresponde al funcionamiento de la célula como generador.

Si la energía es suministrada a una carga resistiva, como se mostró en la figura 21, la potencia entregada a la resistencia viene dada por el producto $P = VI$, y existirá un punto de funcionamiento (I_M, V_M) para el que la potencia entregada sea máxima: es el *punto de máxima potencia*. Los valores de I_M y V_M pueden obtenerse de la condición de máximo:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{o bien} \quad 0 = d(IV)_M = I_M dV + V_M dI \quad (27)$$

que también puede escribirse como:

$$\left[\frac{dI}{dV} \right]_M = - \frac{I_M}{V_M} \quad (28)$$

que representa una condición de máximo completamente general. Cuando se aplica a una célula descrita por la ecuación 21 resulta:

$$I_M = \frac{I_L + I_O}{1 + \frac{mkT}{eV_M}} \quad (29)$$

Y debe cumplirse además la ecuación de la célula

$$I_M = I_L - I_O \left[\exp \frac{eV_M}{mkT} - 1 \right] \quad (30)$$

Factor de forma y rendimiento de conversión energética. El producto $I_M V_M$ que da la potencia máxima entregada a la carga, viene representado dentro de la misma figura 23 por el área del rectángulo rayado, que es obviamente menor que la del rectángulo que representa el producto $I_{SC} V_{OC}$ de la mayor corriente que puede extraerse de la célula I_{SC} por la mayor tensión V_{OC} . Ambos productos se aproximan más cuanto más pronunciado sea el codo de la curva característica. Pero naturalmente en todos los casos reales el parámetro definido por el cociente:

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{SC} V_{OC}} \quad (31)$$

es siempre menor que la unidad. Este cociente, llamado *factor de forma* o *factor de llenado*, suele utilizarse como cuantificación de la forma de la curva característica. El factor de forma es un parámetro de gran utilidad práctica, que varía poco de unos dispositivos a otros y que toma valores que se sitúan alrededor de 0,75 para muchas células de semiconductores cristalinos (Si, GaAS, InP, etc).

Haciendo uso de la definición del factor de forma, la potencia máxima entregada por la célula puede escribirse como:

$$P_M = FF I_{SC} V_{OC} \quad (32)$$

La *eficiencia de conversión energética* de una célula solar se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga y la potencia de la radiación incidente P_L sobre el dispositivo:

$$\eta = \frac{I_M V_M}{P_L} = \frac{FF I_{SC} V_{OC}}{P_L} \quad (33)$$

Naturalmente esta eficacia y la potencia máxima se obtienen únicamente si la resistencia de carga es la adecuada, dada por V_M/I_M .

2.5.5. Modificación del comportamiento básico.

Las primeras células que se fabricaron en el pasado estaban pensadas para aplicaciones espaciales. En el espacio, las células pueden funcionar en sistemas situados en regiones próximas a la atmósfera terrestre, donde la radiación solar es de $1367W/m^2$ aproximadamente y la célula se encuentra a temperaturas del orden de $50 - 60$ °C. Pero la temperatura y la intensidad de la radiación son importantes también cuando se considera la utilización de las células solares para la generación de electricidad en aplicaciones terrestres. A parte de las variaciones de temperatura e intensidad debidas al cambio de condiciones climáticas a lo largo del año, también pueden utilizarse las células en combinación con concentradores ópticos de la radiación que aumentan la intensidad de la luz incidente y, en consecuencia la temperatura de operación.

Lo que es claro en todos los ejemplos mencionados, es que para diseñar y utilizar adecuadamente las células solares es necesario entender la influencia sobre el comportamiento de las mismas de los dos parámetros de funcionamiento: temperatura y la intensidad de la radiación.

Influencia de la temperatura. Según Lorenzo (1994) como ilustración de los efectos de la temperatura, consideremos una célula descrita por el modelo de una exponencial con $m = 1$, lo que corresponde a un comportamiento dominado por las corrientes de recombinación en las zonas neutras, aproximación suficiente en un análisis de primer orden. La ecuación característica del dispositivo queda:

$$I = I_L - I_0(T) \left[\exp \frac{e(V + IR_s)}{kT} - 1 \right] \quad (34)$$

La fotocorriente I_L aumenta ligeramente con la temperatura debido, en parte, al aumento de las longitudes de difusión de los minoritarios y en parte al estrechamiento de la banda prohibida, que desplaza el umbral de absorción hacia fotones de menor energía. La mejora de la fotocorriente con la temperatura es más acusada en las células de GaAs que en las de Si pero, en todos los casos, la variación es pequeña y, en primera aproximación, I_L puede considerarse independiente de la temperatura.

La variación de las características de la célula con la temperatura se manifiesta, por tanto, de forma explícita en el término exponencial de la ecuación y de forma implícita a través de $I_0(T)$. La dependencia con la temperatura de la corriente inversa de saturación puede escribirse de la siguiente forma:

$$I_0 = KT^3 \exp - \frac{E_{GO}}{kT} \quad (35)$$

Siendo K y E_{GO} (ancho de la banda prohibida a 0 K) dos constantes aproximadamente independientes de la temperatura.

Teniendo en cuenta las ecuaciones 34 y 35 es inmediato deducir que la tensión de circuito abierto viene dada por:

$$V_{OC}(T) = \frac{E_{GO}}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{KT^3}{I_L} \quad (36)$$

que predice una disminución de V_{OC} con la temperatura figura 22. La importancia de esta variación se aprecia mejor mediante la definición del coeficiente de variación con la temperatura dado por:

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = \frac{1}{T} \left[\frac{E_{GO}}{e} - V_{OC}(T) \right] \quad (37)$$

que se sitúa en un valor aproximado de $-2,3mV/^{\circ}C$ para células de silicio a temperatura ambiente.

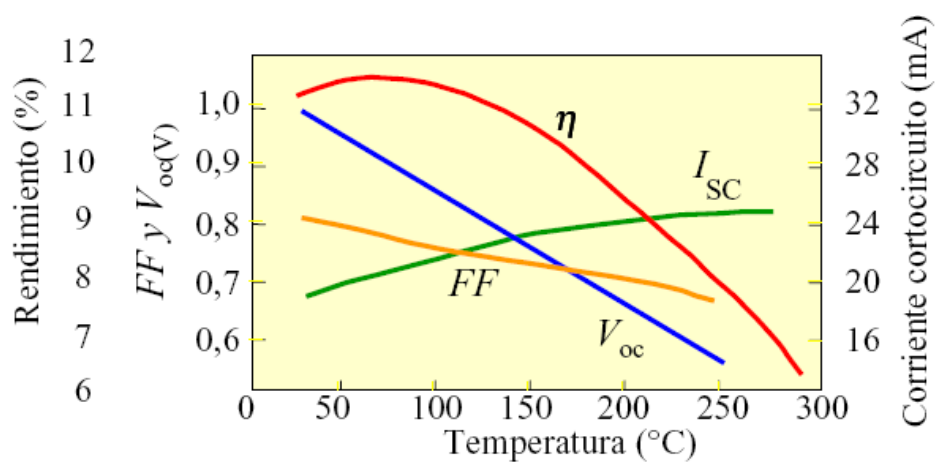


Figura 22. Variación de los parámetros con la temperatura. (Lorenzo y Araujo, 1994)

El factor de forma presenta también una disminución con la temperatura, aunque no muy acusada para las temperaturas inferiores a 200 °C. El decrecimiento de FF se debe al aumento de I_0 y al redondeamiento del codo de la $I-V$ que se produce cuando la temperatura aumenta en la exponencial de la ecuación 34.

Como consecuencia de la disminución V_{OC} y FF con la temperatura, el ligero aumento de I_L queda más que compensado y, en definitiva, el rendimiento de una célula solar decrece con la temperatura. La variación es del orden de una disminución de 0,04 – 0,06 puntos % por cada grado °C, para célula de Si, y de 0,02 – 0,03 puntos % para las de GaAs, para temperatura de funcionamiento próximas a las del ambiente.

2.6. Seguidores Solares

Un Seguidor solar es un dispositivo diseñado para orientar un Equipo o herramienta de forma que éste permanezca perpendicular a los rayos del sol, siguiéndolo desde que amanece hasta que anochece y durante todas las estaciones del año.

Los sistemas de seguimiento del sol juegan un papel importante en el desarrollo de aplicaciones de energía solar, especialmente para los sistemas de alta concentración solar que convierten directamente la energía solar en energía térmica o eléctrica. Se requiere alto grado de precisión de seguimiento del sol para asegurar que el colector solar sea capaz de aprovechar la energía solar máxima en todo el día. Sistemas de potencia de alta concentración solar, como el sistema de receptor

central, colectores cilindro-parabólicos, parabólico plato etc., son el común en las aplicaciones de captación de energía solar. Para mantener la alta potencia de salida y la estabilidad del sistema de energía solar, es necesario un sistema de seguimiento solar de alta precisión que pueda seguir la trayectoria del sol desde el amanecer hasta el anochecer. (Chong, Wong, Tunku y Rahman, 2010)

Para lograr un alto grado de precisión de seguimiento, los sistemas de seguimiento solar normalmente emplean sensores de señales de error de retroalimentación en el sistema de control para recibir continuamente máxima irradiación solar sobre el receptor. Durante las últimas dos décadas, se han propuesto diversas estrategias y se pueden clasificar en las siguientes tres categorías, *Bucle Abierto*, *Bucle Cerrado* y *Seguidor solar Híbrido* (Lee, Chou, Chiang y Lin, 2009, p. 3877).

En el enfoque de seguimiento de bucle abierto, el programa de control llevará a cabo el cálculo para identificar la trayectoria del sol utilizando una fórmula sol de seguimiento específico con el fin de conducir el colector solar hacia el sol. Sensores de bucle abierto se emplean para determinar los ángulos de giro de los ejes de seguimiento y garantizar que el colector solar está posicionado en los ángulos correctos.

Por otro lado, para el esquema de seguimiento de bucle cerrado, el colector solar normalmente detectará la radiación solar directa que cae sobre un sensor de

bucle cerrado como una señal de realimentación para asegurar que el colector solar es capaz de seguir el sol todo el tiempo.

En lugar de las opciones anteriores, algunos investigadores han diseñado un sistema híbrido que contiene sensores tanto el lazo abierto y en lazo cerrado para lograr una buena precisión de seguimiento. En nuestro caso éste vendría a ser el tipo de seguidor solar a detallar en el presente informe. Los métodos de seguimiento mencionados anteriormente son operados por un sistema de control cualquiera basado en micro controlador o un sistema de control basado en PC con el fin de rastrear la posición del sol.

2.6.1. Tipos de Seguidores Solares

En esta sección mencionaremos un resumen algunos tipos de seguidores existentes, para mostrar nuestro marco de referencia en el que pretendemos abrirnos paso con nuestro trabajo. Según (Guardado Gutiérrez y Rivera Chávez, 2012) existen varios tipos de seguidores solares, así como las aplicaciones de los mismos, y las necesidades que obligan a elegir uno u otro tipo. Dichos tipos se mencionan a continuación.

Clasificación según el dispositivo que realiza el seguimiento. Según el dispositivo que proporciona el movimiento existen dos tipos básicos de seguidores:

- a) *Seguidor activo*: Es aquel que utiliza motores eléctricos, brazos electromecánicos con engranajes o tornillos sin fin, los cuales son

controlados por un circuito electrónico. Este tipo de seguidor debe estar energizado ya sea por una fuente externa al sistema FV o por el mismo, convirtiendo al seguidor en “autónomo”. Se debe considerar que la energía en el panel solar debe ser suficiente para energizar el seguidor, de lo contrario, no podrá orientarse.

b) *Seguidor pasivo:* aquel que usa un gas comprimido de bajo punto de ebullición, el cual es conducido hacia un lado o hacia otro, según sea calentado por la luz solar incrementando la presión en el gas, provocando que el seguidor se mueva en respuesta a ese desbalance. Como es un tipo de seguimiento impreciso no puede utilizarse para sistemas concentrados, pero sí en sistemas fotovoltaicos no concentrados.

Clasificación según la función que desempeñan. Según el tipo de sistema fotovoltaico encargado de la producción de energía y usos meteorológicos los seguidores se dividen en:

a) *Seguidores de sistemas fotovoltaicos concentrados:* Son aquellos que requieren que la componente de luz directa esté concentrada en un punto específico, y por lo tanto debe estar orientado con mucha precisión. Los seguidores de este tipo orientan ya sea el sistema o un espejo o conjunto de espejos para que la luz recibida sea enfocada en un colector fotovoltaico. La precisión requerida en este caso va desde un máximo de 0.1° hasta un

mínimo de 2°. Estos sistemas se utilizan en *Torres de Concentración, Discos Parabólicos, Cilindros Parabólicos y Sistemas lineales Fresnel.*



Figura 23. Campo termosolar de seguidores con motor Stirling. (Recuperado de: <http://www.gmdsol.com/blog/energia-termsolar-iv-motor-stirling/>, 2016)

b) Seguidores de sistemas fotovoltaicos no concentrados: En el caso de los paneles fotovoltaicos aceptan tanto la luz directa como la difusa. El seguimiento en estos tipos de sistemas se usa para minimizar el ángulo de incidencia entre la luz incidente y la normal de los paneles, para producir la mayor cantidad de energía.



Figura 24. Campo Solar de seguidores con paneles fotovoltaicos. (Recuperado de: <http://besconj.com/solar-information/>, 2016)

c) **Seguidores para uso meteorológico:** Estos seguidores son utilizados en el campo de la meteorología encargada del estudio de la radiación solar, en situaciones en donde se desea medir la radiación difusa (con el uso de un piranómetro bajo sombra) y directa (con el uso de un pirheliómetro), o medir la composición de la radiación directa para ciertos rangos espectrales con el uso de un radiómetro.



Figura 25. Seguidores solares Kipp & Zonen SOLYS instalado en Arabia Saudita (Recuperado de: <http://proyectorfse.mx/2015/11/11/como-es-una-estacion-de-medicion-solar/>, 2016)

Clasificación según los grados de libertad.

- a) **Seguidores de un solo eje:** Estos sólo tienen un grado de libertad, es decir se mueven en un solo eje de rotación. Dicho eje tendrá un ángulo de inclinación determinado por la latitud del lugar. Por ejemplo horizontal 0° para zonas en el ecuador o 90° en caso de estar en los Polos.



Figura 26. Campo Solar de seguidores con paneles fotovoltaicos de un solo eje en Huangshan – Anhui. (Recuperado de: http://www.chrunsol.com/project_show.aspx?id=13, 2016)

- b) **Seguidor de dos ejes de montura Altazimutal:** Estos tienen dos grados de libertad, es decir dos ejes de rotación. Estos ejes están típicamente perpendiculares el uno del otro. El eje primario es el que está fijo respecto a La Tierra, y el otro eje, que está referenciado al eje primario se llama eje secundario.



Figura 27. Campo Solar de seguidores con paneles fotovoltaicos de a dos ejes y montura altazimutal (Recuperado de: <https://www.linkedin.com/pulse/solar-tracker>, 2016)

c) *Seguidor de dos ejes de montura Ecuatorial*: Este tipo de montura es ampliamente utilizado en la Astronomía por ofrecer un sistema más “natural” que la de la montura altazimutal en lo que a seguimiento estelar se refiere, a su vez de mostrar un considerable ahorro de energía al mantener solo un motor funcionando en vez de dos una vez desplegado el sistema.

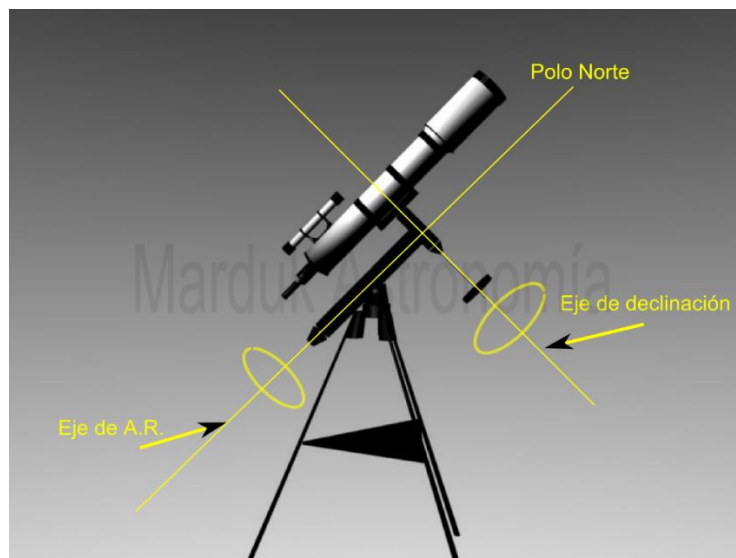


Figura 28. Telescopio con sistema de seguimiento estelar de montura ecuatorial (Recuperado de: <http://blog.astroaficion.com/2011/03/04/tipos-de-monturas/>, 2016)

2.6.2. ¿Por qué sería útil para nuestra localidad?

- Actualmente nuestra localidad no dispone de un sistema autónomo de evaluación de los efectos de la trayectoria y latitud del sol sobre sistemas que obtienen energía a partir de este.
- Este Seguidor sería vital al momento de realizar el estudio del potencial energético solar de una determinada zona, algo que de otro modo sería muy complicado sin mencionar que costoso debido al personal especializado que sería necesario contratar para realizar dichas mediciones.
- Este seguidor no solo serviría para analizar el movimiento del sol así como su radiación sino que serviría de base universal para todos los equipos que requieran un constante seguimiento solar y así hacer el análisis meteorológico que corresponda.

2.6.3.Requerimientos de un seguidor solar

- Consumo de energía mínimo, para maximizar la eficiencia global de la instalación y optimizar el costo – beneficio.
- Que su operación sea confiable bajo diferentes condiciones adversas (fuertes vientos, polvo, lluvia, variaciones importantes de temperatura, resistente a la corrosión)
- Simpleza en su mecanismo con la finalidad de reducir costo e incrementar la viabilidad.

- Que tenga la posibilidad de integrarse a un sistema de control digital para facilitar monitoreo y ofrecer soluciones.
- Que el equipo sea compacto, con un alto grado de integración e inteligente, que pueda incorporar en un solo módulo la fuente de poder y el sistema de comando, a su vez que contenga sistemas de seguridad y autoprotección.
- Plug & Play – Debe ser fácil y sencillo de instalar solo con colocarlo y empezar su funcionamiento.
- Debe ser autónomo
- Debe de estar hecho de piezas de fácil accesibilidad

La mayoría de los trabajos que se pueden encontrar libremente en internet son a cerca de seguidores de luz, o también llamados erróneamente seguidores solares, estos están diseñados para seguir una determinada fuente luminosa con una intensidad constante, lo cual puede ser instructivo en un ambiente aislado y controlado, llegando a la supuesta conclusión de que el principio se aplica igualmente al sol, lo cual es equivocado. Y es la principal razón por la cual la mayoría de los seguidores siempre fracasan exceptuando claro algunos pocos hechos por algunas empresas dedicadas a ello como por ejemplo Kipp & Zonen y Eppley.

Otro de los motivos del fracaso en construcción de los seguidores solares es que se necesitan buen conocimiento de las tres disciplinas inherentes en esto, física,

mecánica y electrónica, quizá no completa como es propio de quien ha estudiado una de las tres carreras, pero si lo necesario para la creación del seguidor. Además el sol conforme se va moviendo, si bien es cierto su radiación no presenta cambio apreciable fuera de la tierra, pero ésta, al momento de atravesar la atmósfera si presenta cambio, agregando a eso el que la tierra sea redonda y que gira sobre su eje, podemos apreciar el cambio más crítico de todos, al cual llamamos día y noche, y nuestro seguidor debe ser capaz de no solo comportarse de manera adecuada durante el día, sino que también al anochecer. Así que desde nuestro punto de vista, aquí en la Tierra, el Sol se mueve, no solo se mueve sino que su intensidad va variando, siendo la más alta alrededor de las 12 pm y la más baja entre las 7pm y 5am (para la latitud de Tacna). También debemos señalar que el seguidor solar debe seguir al sol, es posible que aun la tierra posea luz sin el sol en esos casos debe detener el seguimiento si es ese el deseo del usuario.

CAPITULO III

MATERIALES

Primeramente, una vez estudiado el movimiento del sol desde el punto de vista de la tierra, entonces podemos empezar a construir, nuestro seguidor solar, y esto solo puede llevarse a cabo entendiendo también los materiales que hemos de utilizar.

Segundo, si bien es cierto que algunos materiales podemos conseguirlos o fabricarlos, lastimosamente muchos de ellos, por cuestiones de tiempo, hemos de comprarlos y aquí viene una de las características más importantes a tener en cuenta, de los materiales a usar, el cual es, su costo.

Tercero, podemos entender los materiales y podemos tener dinero para comprarlos pero nada de eso valdrá mucho si no se puede acceder a ellos lo cual es muy probable teniendo en cuenta el lugar que habitamos, y si lo que realmente queremos es solucionar un problema, entonces debemos de pensar en materiales que sean accesibles para nosotros y para el entorno del problema a solucionar.

Ojala existiera un camino ordenado para el adecuado diseño y selección de los materiales, pero no siempre sucede así, en realidad todo se reduce a una búsqueda dinámica entre el Tipo de material, el costo y su accesibilidad; todo mientras buscamos la forma de construir, en este caso, nuestro seguidor solar.

No es el objetivo de esta tesis el de documentar todo el proceso de investigación y experimentación que fueron necesarios para construir el sistema de control del seguidor solar; pero sí se explicarán los motivos por los cuales se escogieron los materiales y como se armaron, así como sus ventajas, siendo la estudiada, cómo el título de la tesis indica, El de permitir la Evaluación Energética comparativa de Paneles Fotovoltaicos.

Para lograr nuestro cometido, el proceso de construcción del seguidor solar se dividió en tres etapas: El Movimiento, El Registro y El Control, para los cuales será necesario no solo conocimiento sobre la física, sino también de la electrónica y mecánica. Restarle importancia a cualquiera de ellos conllevará a desagradables consecuencias futuras, así como la aparición de fallas y pérdidas de eficiencia.

Para un diseño como este es necesario conservar una mente abierta y tener la disposición de querer abarcar, sin obstinación, materias muchas veces desconocidas.

A continuación en la tabla 2, una lista los materiales usados según la etapa. Tener en cuenta que los materiales cuyo uso se repita en más de una etapa, se mencionaran solo una vez.

Tabla 2.

Lista de materiales usados para la construcción del seguidor solar

Etapas de movimiento	Sensor de Movimiento	Celda fotoconductor 5516 o Light Dependent Resistor (LDR)
		Amplificador Operacional Lm324
		Reguladores AMS1117
		Resistencias de precisión
		Schmitt Trigger negador CD40106
		Multiplexor/Demultiplexor análogo de 8 canales HCF4051
		Switch análogo bilateral CD4066
		Placa prototipada Datak 15 x 16 agujeros
		Pines hembra y macho
		Baja lenguas de madera
		Cartón maqueta
		Tornillos y resortes
		Soportes
	Trípode marca Dexum para parlante de 80cm	
	Acoplador para base de parlante	
	Madera de Pino	
	Tornillos de 1/4 de pulgada	
	Tornillos largos de 1/8 de pulgada	
	Varilla roscada de 1/4 de pulgada	
Motores	Motores paso a paso unipolar modelo PM35L – 048 con engranaje sin fin	
	Piñón para correas plásticas	
	Correa de transmisión dentada	
	Varillas de acero de 6mm y 8mm extraídas de una fotocopidora	
	Rodamientos modelo 608 – 2NSL	
	Contrapesos hechos de rodamientos, varillas, bujes y engranajes	
Etapas de registro	Paneles	Panel fotovoltaicos marca Opalux de 3.5W Vmp: 9V Imp: 0.34A
		Diodo de Silicio
		Reóstatos de 5.2k y 2W
		Resistencias de 26.4Ω y 5W
	Diseño 3D	Autodesk Inventor 2017
		PLA (ácido poliláctico)

	Radiación	LDR grandes	
		Potenciómetros de Precisión de 10k	
		Conectores DIN	
		Cable estéreo	
	Temperatura	Sensor de Temperatura de Precisión LM 335	
		Plug estéreo hembra y macho de 3.5mm	
	Almacenamiento SD y RTC	RTC DS1307	
		Tarjeta SD de 1GB	
		Batería de Lithium CR2032 de 3V	
		Cristal de 32.768 Hz	
	Materiales para la etapa de Control	Tarjeta Arduino	Arduino Mega 2560
		Tarjeta de potencia	Demultiplexor Binario Dual CD4555
Transistor Darlington TIP 120			
Tarjeta de Arranque y Alimentación		Panelitos de 6V y 250mA	
		Diodo zenner de 6 V	
		Rectificador MCR 106	
		Transformador de 220 V a 24 voltios a 4 A	
		Batería 6LR61 y AA	
		Condensador electrolítico 25V y 10000	
		Regulador L7809	
		Transistor 2N3055	
		Bump Switch Pequeño	
		Bump Switch Grande TM-1703	
		Relé HRS2H	
		Relé Omron LY2N	
Algoritmo		Arduino IDE 1.6.5	

3.1. Materiales para le etapa de Movimiento

3.1.1. Sensor de Posición

Se necesita crear un sensor que sea capaz de determinar la posición de la mayor fuente luminosa en la bóveda celeste durante el día cuyo rango de funcionamiento abarque el plano del círculo de declinación solar. Y mande la

información de forma paralela a una unidad de procesamiento central, en nuestro caso la tarjeta Arduino Mega.

A continuación los materiales básicos para la construcción del sensor.

- ***Celda fotoconductora 5516 o Light Dependent Resistor (LDR)***

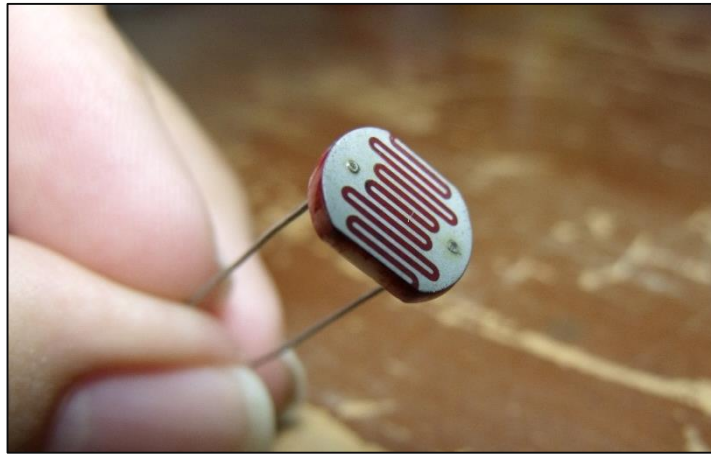


Figura 29. Celda fotoconductora a utilizar para el sensor de posición.

- ***Amplificador Operacional y Schmitt Trigger***

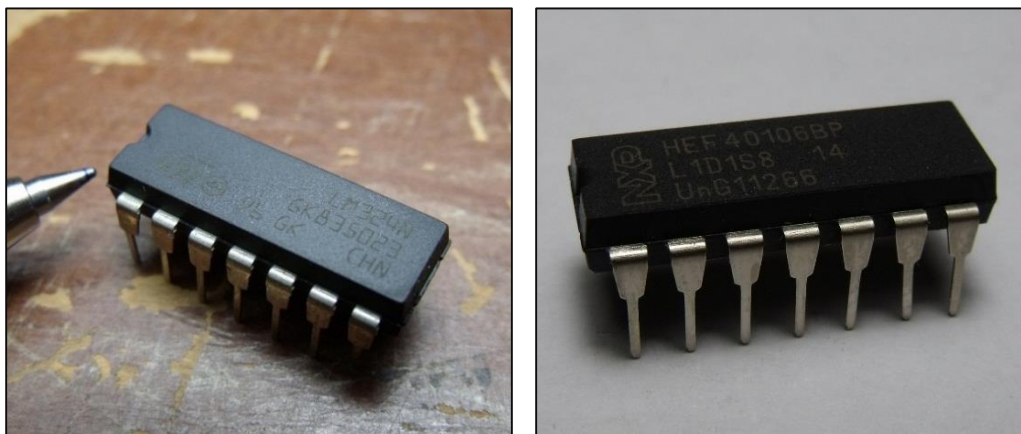


Figura 30. Izquierda, Amplificador Operacional LM324. Derecha, Schmitt Trigger negador CD40106

- **Multiplexor/Demultiplexor análogo de 8 canales HCF4051**

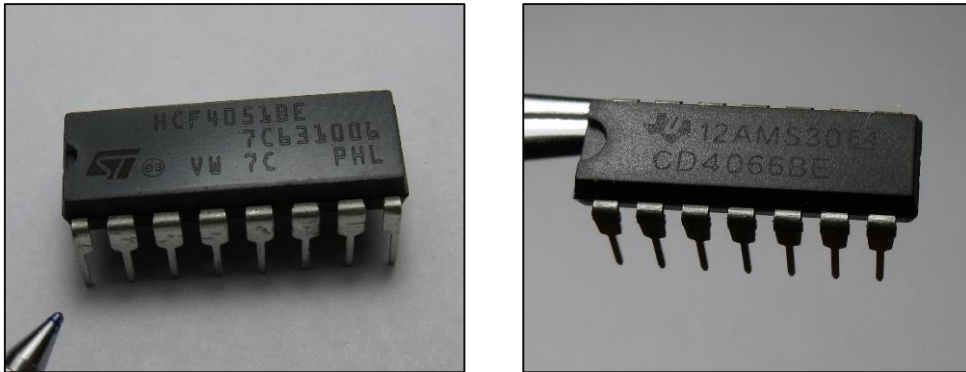


Figura 31. Izquierda, Multiplexor/Demultiplexor análogo de 8 canales HCF4051. Derecha, Switch análogo bilateral CD4066

- **Reguladores y Resistencias**

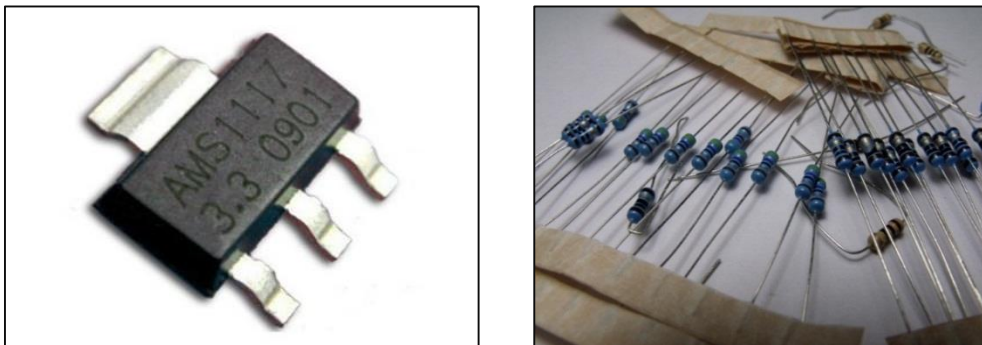


Figura 32. Izquierda, Regulador de tensión AMS 1117. Derecha, Resistencias de precisión

- **Placa prototipada y Pines**

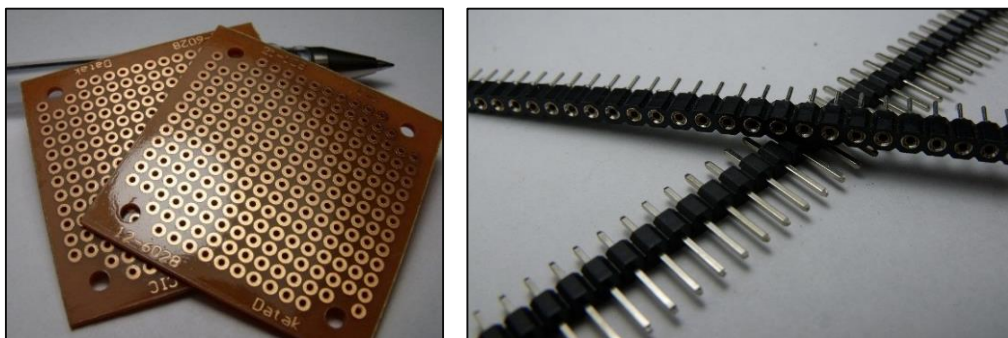


Figura 33. Izquierda, Placa prototipada Datak 15x16. Derecha, Pines hembra y macho

- *Baja lenguas de madera*

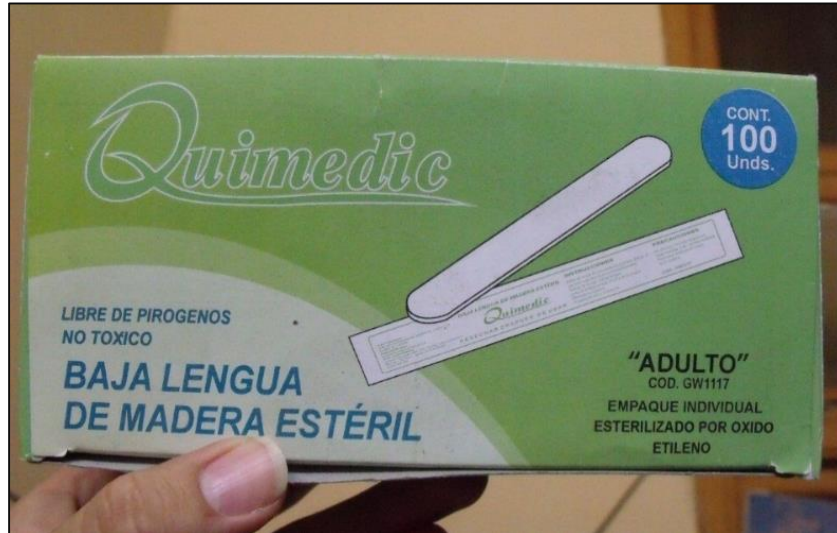


Figura 34. Baja lenguas de madera a utilizar.

- *Carton maqueta, tornillos y resortes*

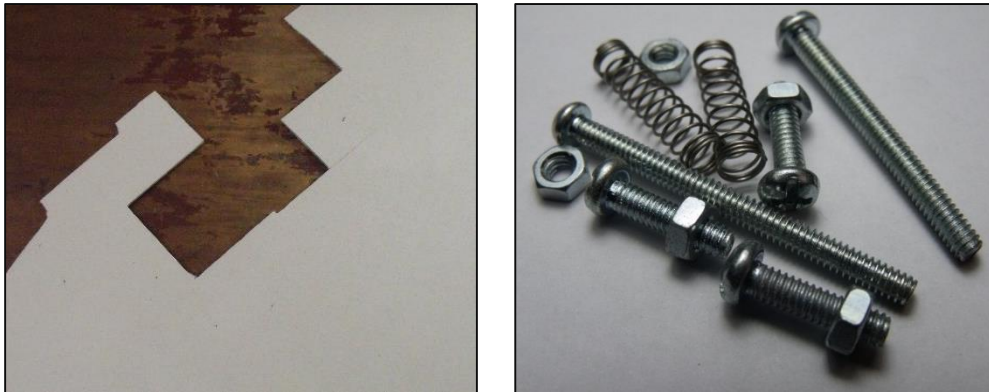


Figura 35. Izquierda, Carton maqueta. Derecha, tornillos y resortes de 1/8.

3.1.2. Soportes

Se necesita una montura o arreglo mecánico que sirva de soporte y que sea capaz de dotar de movimiento a los diversos sensores a utilizar, incluyendo los paneles fotovoltaicos y la circuitería inherente al movimiento y registro. A continuación los materiales básicos para la construcción de la montura.

- ***Software Sunmotions:*** Como principal herramienta deberíamos de medir la posición del sol en la bóveda celeste, trabajando enteramente con coordenadas esféricas y eclípticas durante al menos un año, para tener una clara idea del movimiento del sol con respecto a la Tierra, pero debido a que no contamos con ese tiempo para el propósito de la presente tesis, nos vemos obligados a subirnos a los hombros de un gigante, en este caso a un grupo de científicos de la Universidad de Nebraska los cuales hicieron dicho trabajo y en nuestro caso con la suficiente visión como para concentrar didácticamente los resultados de sus estudios en un software llamado “Sunmotions”, Figura 36, que es una parte del Módulo Solar del NAAP (Nebraska Astronomy Applet Project) del programa Educativo Astronómico de la Universidad de Nebraska – Lincoln, un brillante trabajo realizado por sus integrantes el 24 de Septiembre del 2010.

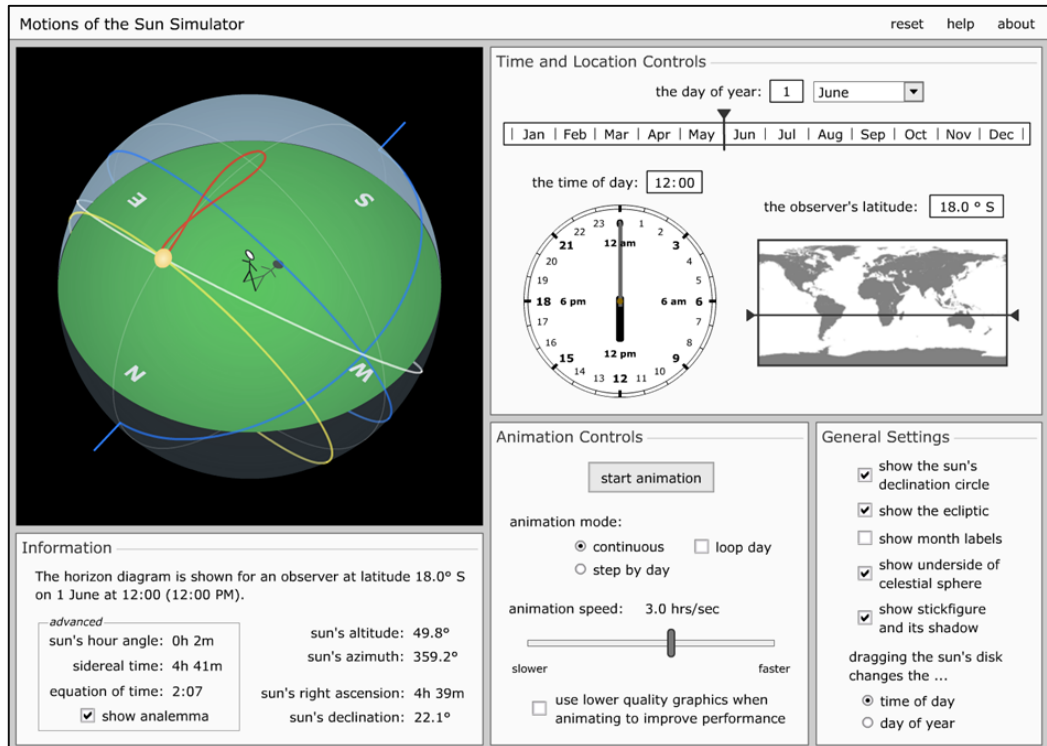


Figura 36. Demostración del software trabajando según la latitud de Tacna 18° (Recuperado del sitio web <http://www.astro.unl.edu/naap/motion3/motion3.html>, 2015)

- *Trípode marca Dexum para parlante de 80km*



Figura 37. Trípode utilizado.

- *Acoplador para base de parlante*

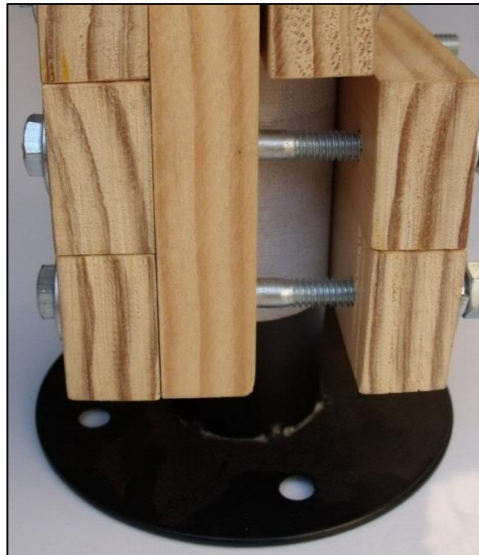


Figura 38. Base utilizada.

- *Madera de Pino*



Figura 39. Madera de pino.

- *Varilla roscada de 1/4 de pulgada*

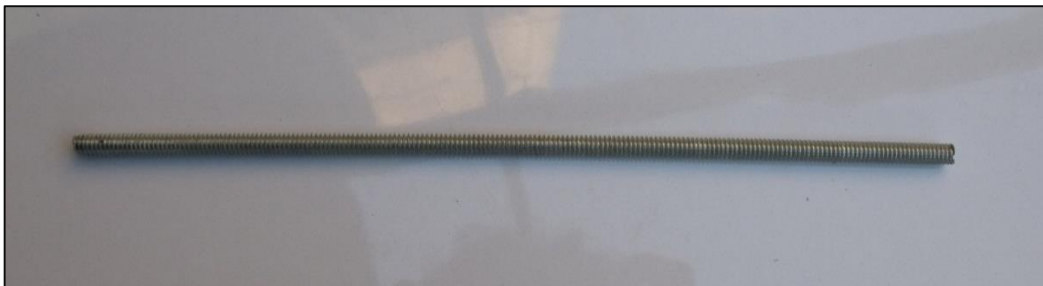


Figura 40. Varilla roscada de 1/4 de pulgada.

- *Tornillos de 1/4 de pulgada*



Figura 41. Izquierda, Tornillos 1/4 de pulgada. Derecha, Tornillos largos de 1/8 de pulgada.

3.1.3. Motores

- *Motores paso a paso unipolar modelo PM35L – 048 con engranaje sin fin*

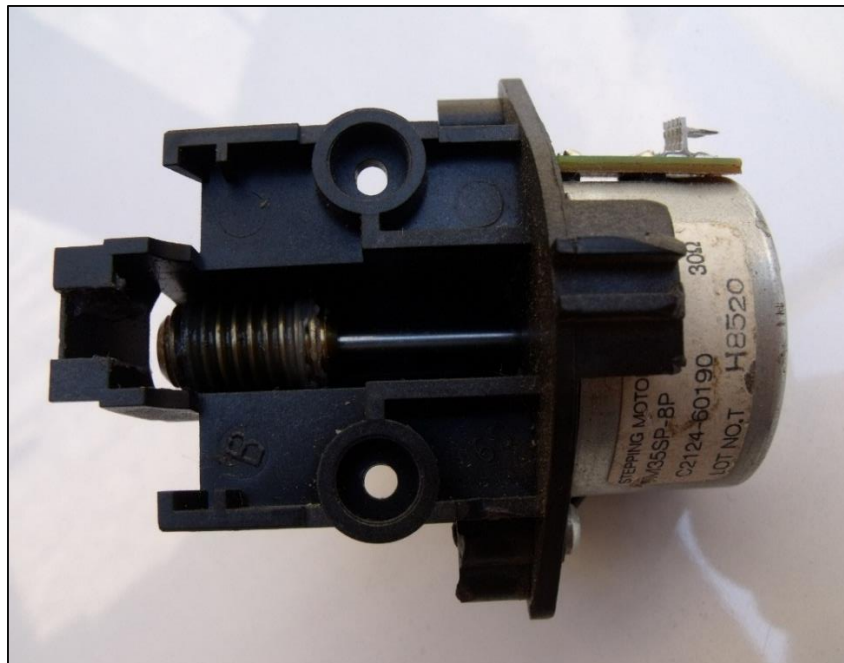


Figura 42. Motor paso a paso extraído de una vieja impresora.

- *Piñón para correas plásticas*



Figura 43. Piñón para correas de plástico.

- *Varillas de acero de 6mm y 8mm extraídas de una fotocopiadora*



Figura 44. Varillas a utilizar.

- *Correa de transmisión dentada*



Figura 45. Izquierda, Correa de transmisión dentada. Derecha, Rodamientos 608 – 2NSL

- *Contrapesos hechos de rodamientos, varillas, bujes y engranajes*

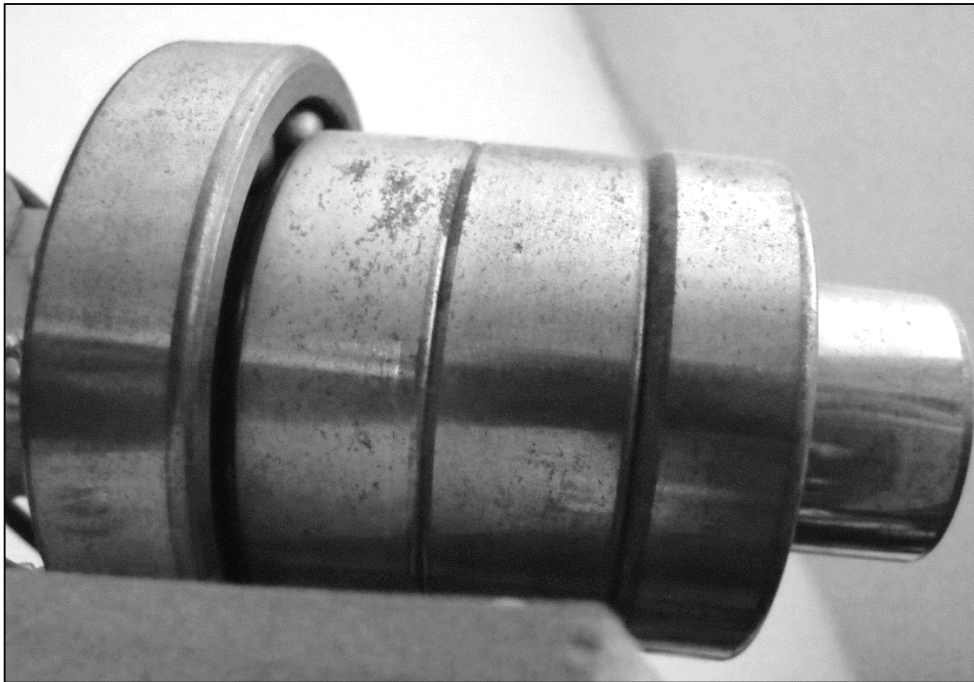


Figura 46. Contrapeso a utilizar.

3.2. Materiales para la etapa de Registro

3.2.1. Paneles

Como principal elemento en esta etapa tendremos a dos paneles fotovoltaicos de silicio policristalino de similares características destinados para evaluación energética comparativa de estos mismos, a estos se les implementará un circuito de registro a fin de poder medir su tensión y corriente. Las características de los paneles a utilizar son las siguientes: Corriente en potencia máxima 0,34 A, Tensión máxima de potencia 9V, Corriente cortocircuito 0,38 A y Tensión en circuito abierto 11,06 V.

- *Panel fotovoltaicos marca Opalux de 3.5W V_{mp} : 9V I_{mp} : 0.34A*

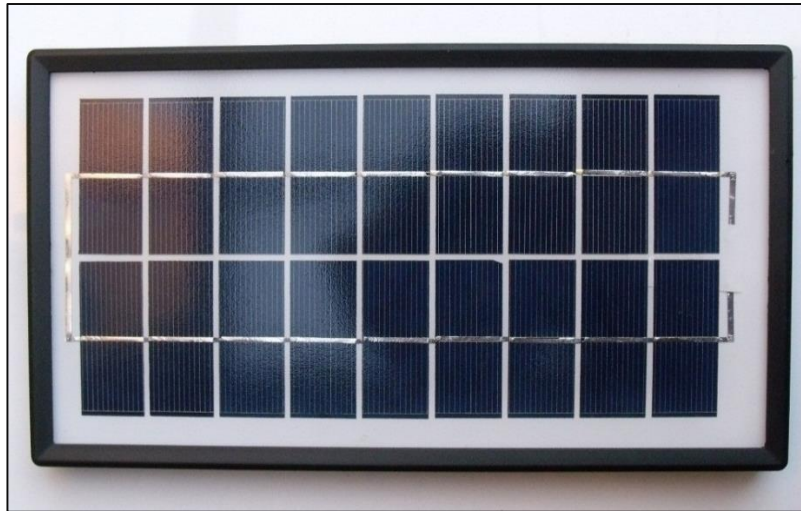


Figura 47. Panel Fotovoltaico a utilizar.

- *Diodo de Silicio*

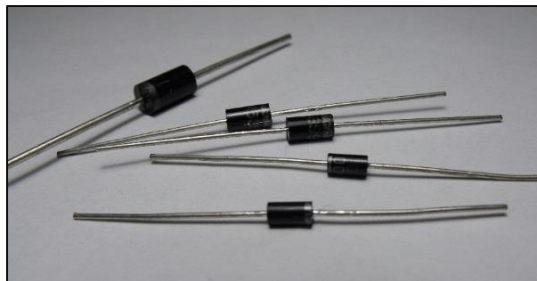


Figura 48. Diodos de silicio.

- *Reostatos de 5.2k y 2W*

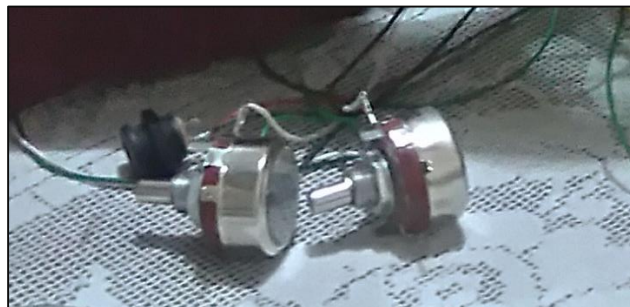


Figura 49. Reóstatos a utilizar.

- *Resistencias de 26,4Ω y 5W*

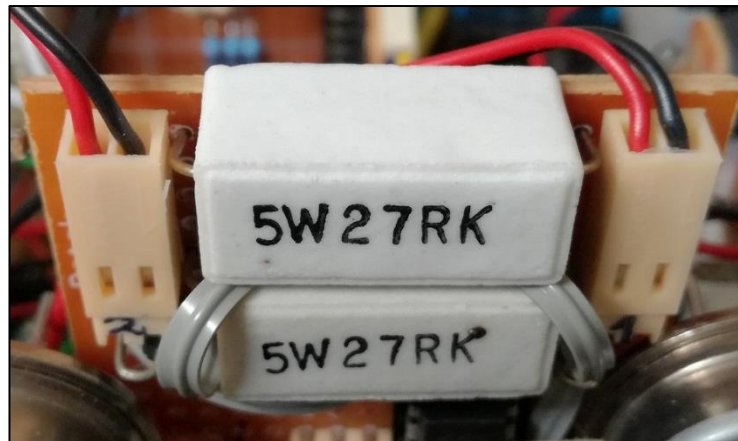


Figura 50. Resistencia a utilizar.

3.2.2. Diseño 3D

- *Autodesk Inventor 2017*

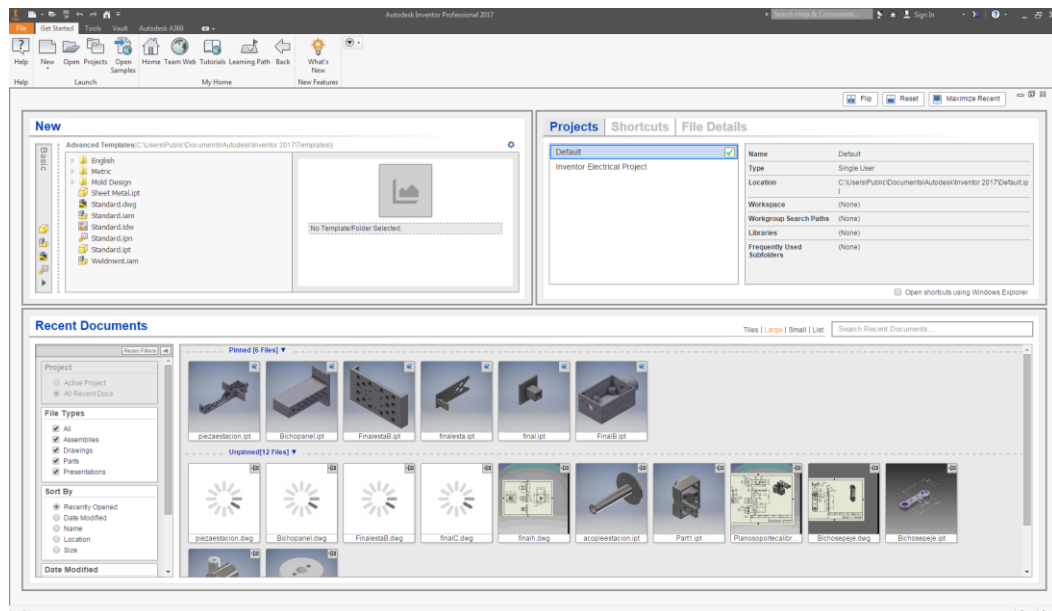


Figura 51. Captura del software Autodesk Inventor.

- *PLA (ácido policáctico)*



Figura 52. Ácido poliláctico para impresoras 3D (Recuperado de: <http://3dtoday.ru/wiki/3Dprinter/>)

3.2.3. Radiación

Será necesario implementar dos sensores de irradiancia cuya estructura permitan ser acoplados al seguidor así como poseer una sensibilidad al espectro solar similar al de los piranómetros comerciales y enviar la información de la manera más lineal posible al ADC de la unidad de procesamiento central, en este caso la tarjeta Arduino Mega.

- *LDR grandes de 1600 Ω a 7 W/m^2 y 60 Ω a 1000 W/m^2 aproximadamente*



Figura 53. Celda fotoconductora.

- **Potenciómetros de Precisión de 10k**

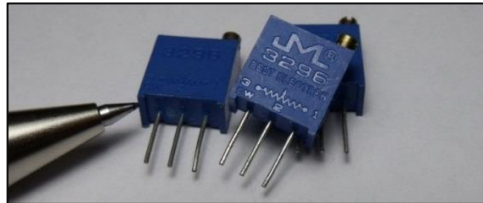


Figura 54. Potenciómetros a utilizar.

- **Conectores y cable**



Figura 55. Izquierda, conectores DIN. Derecha, cable estéreo.

3.2.4. Temperatura

Se necesitará implementar un sensor que sea capaz de medir la temperatura de los paneles fotovoltaicos así como la temperatura ambiente, durante el funcionamiento del seguidor solar, a su vez tendrán que permitir el registro por parte del ADC del sistema de procesamiento central, es decir el arduino Mega.

- **Sensor de Temperatura de Precisión LM 335**

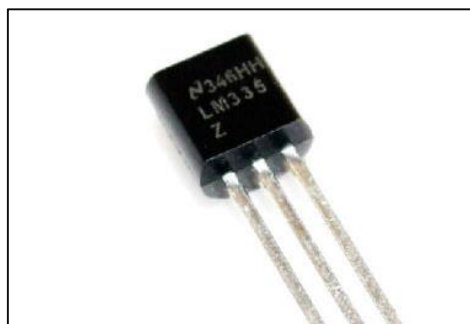


Figura 56. Sensor de temperatura a utilizar.

- **Plug estéreo hembra y macho de 3.5mm**



Figura 57. Plug a utilizar.

3.2.5. Almacenamiento SD y RTC

Se necesitara implementar una tarjeta de registro que brinde al sistema de procesamiento central de forma continua e ininterrumpida la fecha y la hora, es decir que posea un reloj calendario en tiempo real, así como una memoria externa en la que la data podrá ser almacenada para su posterior análisis.

- **Reloj calendario y Tarjeta SD**



Figura 58. Izquierda, RTC DS1307. Derecha Tarjeta SD marca Kingstone de 1GB.

- *Batería y Cristal*



Figura 59. Izquierda, Batería de Lithium de 3V modelo CR2032. Derecha, Cristal de 32,768 Hz

3.3. Materiales para la etapa de Control

3.3.1. Tarjeta Arduino Mega 2560

Debido a la complejidad y magnitud del equipo a construir, será necesario recurrir a un micro controlador; es conocido que la implementación de un micro controlador podría ser algo engorroso sobre todo para quienes no hemos seguido una rama en electrónica pura, pero esto era hace varios años cuando, si queríamos programar un micro controlador, teníamos que armar toda una tarjeta dedicada a este, así como una interfaz con una computadora, sin mencionar que muy probablemente solo podríamos utilizar aquellos fabricados por Microchip. Pero en los recientes años surgió una solución práctica basado en hardware libre, las Tarjetas Arduino en diferentes modelos, con distintas prestaciones, ofreciendo todo lo antes mencionado, con la capacidad de utilizar Microcontroladores Atmel y la facilidad de que solo al conectarlas vía USB con un ordenador ya están listas para ser programadas.

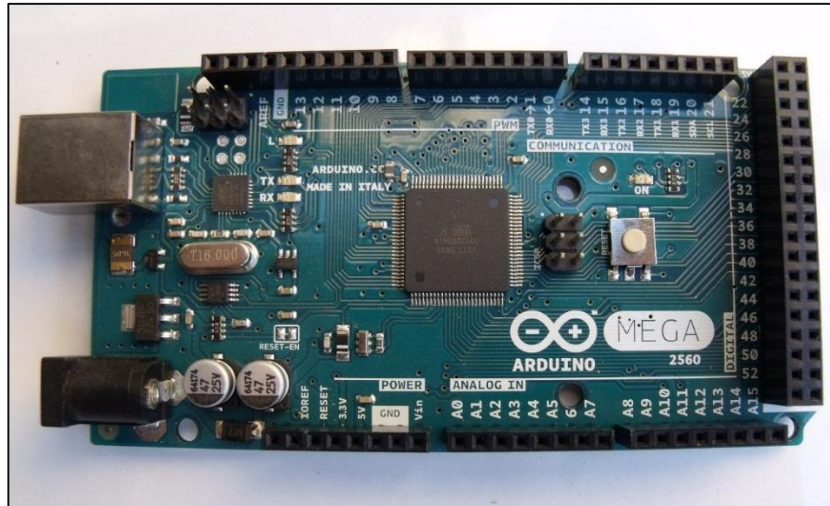


Figura 60. Tarjeta Arduino Mega 2560 a utilizar.

3.3.2. Tarjeta de Potencia

Se necesitara implementar una tarjeta de Potencia, que sirva de intermediario entre la unidad de procesamiento central y los motores que se encargaran del movimiento del seguidor, esta tarjeta deberá ser diseñada de tal manera que con solo cuatro cables provenientes del Arduino, ésta sea capaz de controlar dos motores paso a paso.

- **Demultiplexor Binario Dual CD4555**

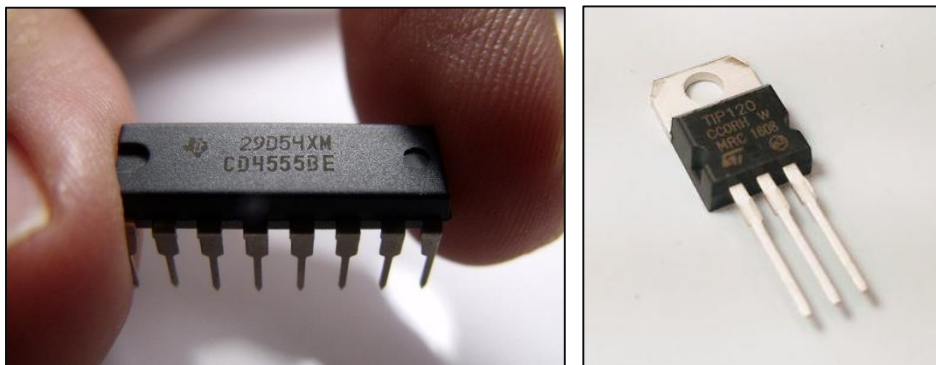


Figura 61. Izquierda, Demultiplexor Binario Dual CD4555. Derecha, Transistor Darlington TIP 120.

3.3.3. Tarjeta de Arranque y Alimentación

Será necesario crear una tarjeta que permita al seguidor solar apagarse y prenderse de manera autónoma todos los días garantizando en las noches un consumo extremadamente bajo si no es cero, ya que, lo que se espera de esta tarjeta es que desconecte de manera mecánica toda fuente de energía cuando el seguidor solar no este activado, dejando como sensor de “amanecer” quien dotara de energía suficiente para arrancar el sistema y una vez arrancado sirva de fuente para todas las diversas tarjetas.

- *Panelitos de 6V y 250mA*



Figura 62. Paneles a utilizar.

- *Diodo zenner y rectificador*



Figura 63. Izquierda, Diodo zenner de 6V. Derecha, Rectificador MCR 106.

- **Transformador de 220 V a 24 voltios a 4 A**



Figura 64. Transformador a utilizar.

- **Baterías y condensador**



Figura 65. Izquierda, Batería 6LR61 y AA. Derecha, Condensador electrolítico de 25V y 10mF.

- **Regulador L7809**

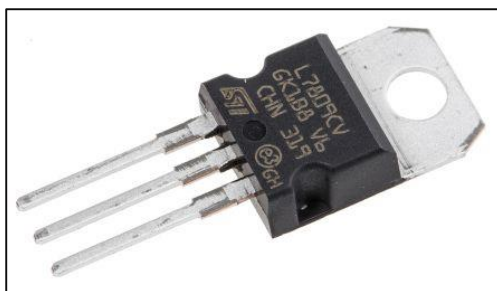


Figura 66. Izquierda, Regulador L7809. Derecha, Transistor 2N3055.

- **Bump Switch's**

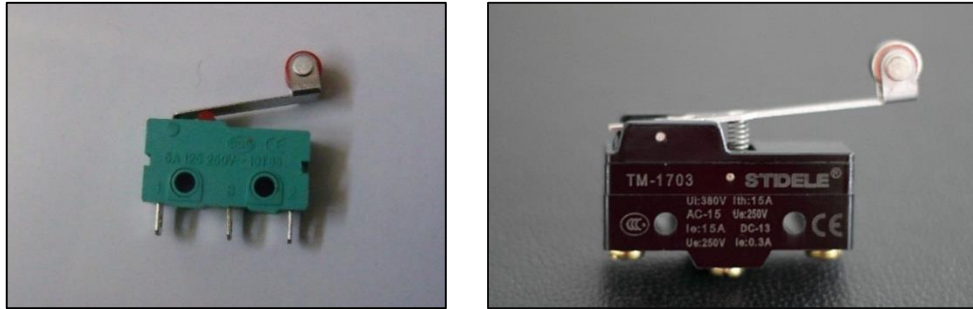


Figura 67. Izquierda, Bump switch pequeño. Derecha, Bump Switch grande modelo TM-1703.

- **Relés**

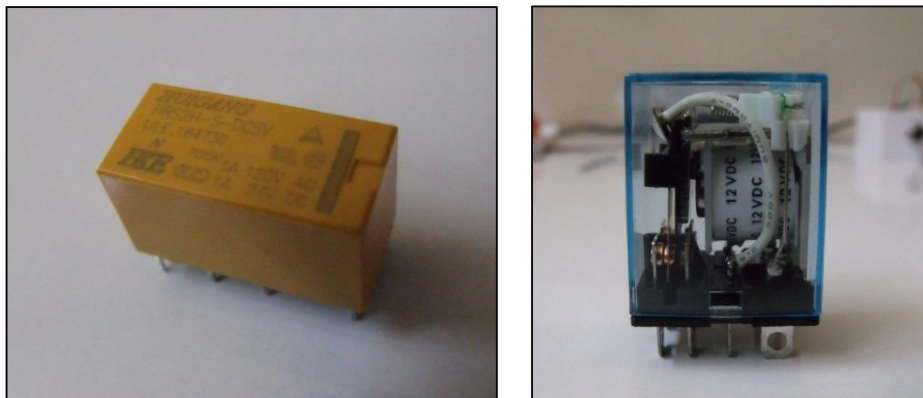


Figura 68. Izquierda, Relé modelo HRS2H de 5V. Derecha, Relé Omron LY2N de 12 V.

3.3.4. Algoritmo

Será necesario desarrollar un algoritmo que permita un control práctico y sistemático de todas las tarjetas y etapas del seguidor solar, dicho algoritmo debe de ser instalado en la tarjeta Arduino Mega, para lo cual se requerirá del software Arduino IDE el cual nos brindaría el entorno de desarrollo apropiado para la compilación.

- *Arduino IDE 1.6.5*

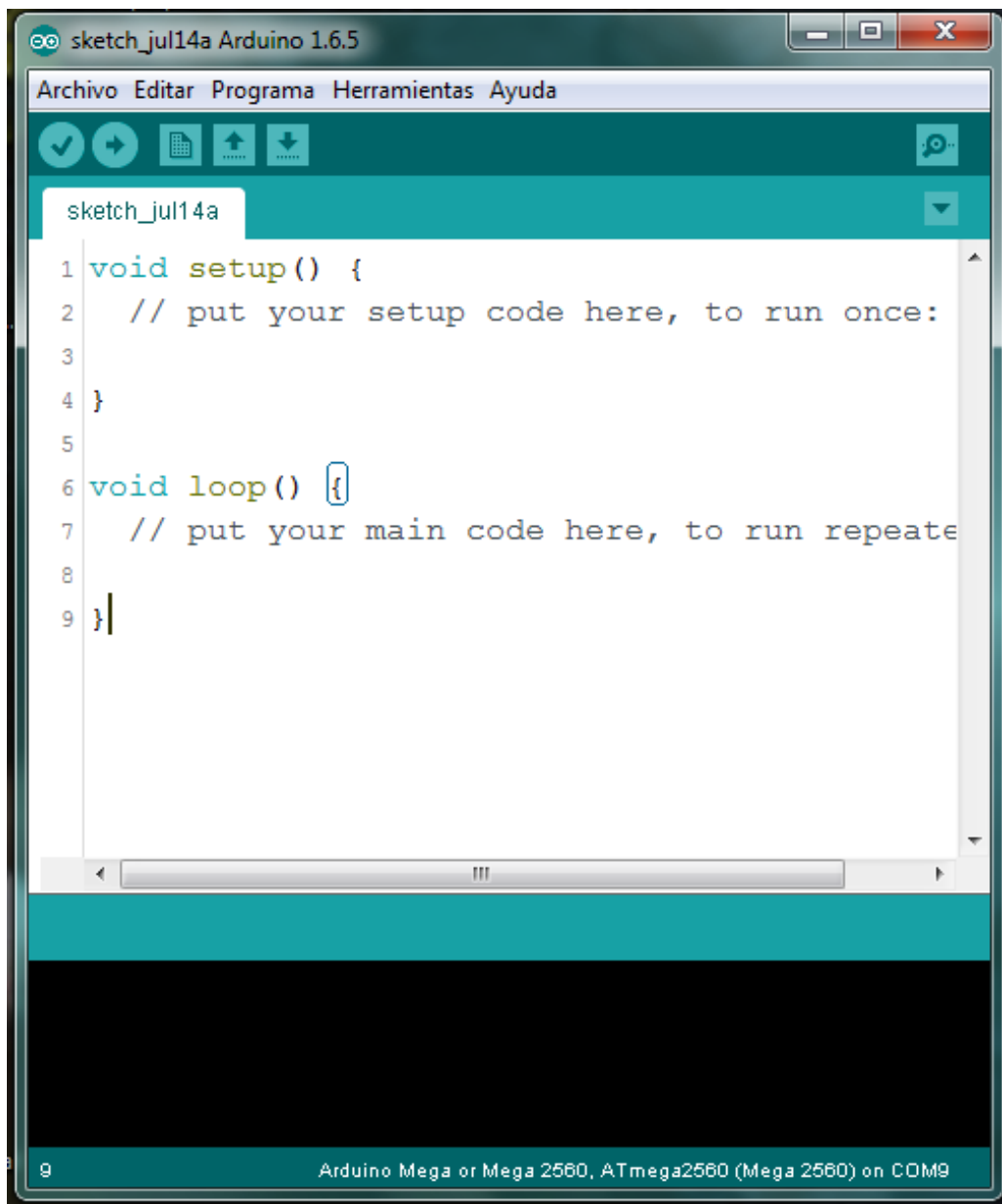


Figura 69. Vista general de la versión del Arduino IDE a utilizar.

CAPITULO IV

PROCEDIMIENTO

Si bien la invención no siempre será un proceso lineal, nos hemos visto obligados a estructurar las diferentes fases de construcción del seguidor solar de la siguiente manera:

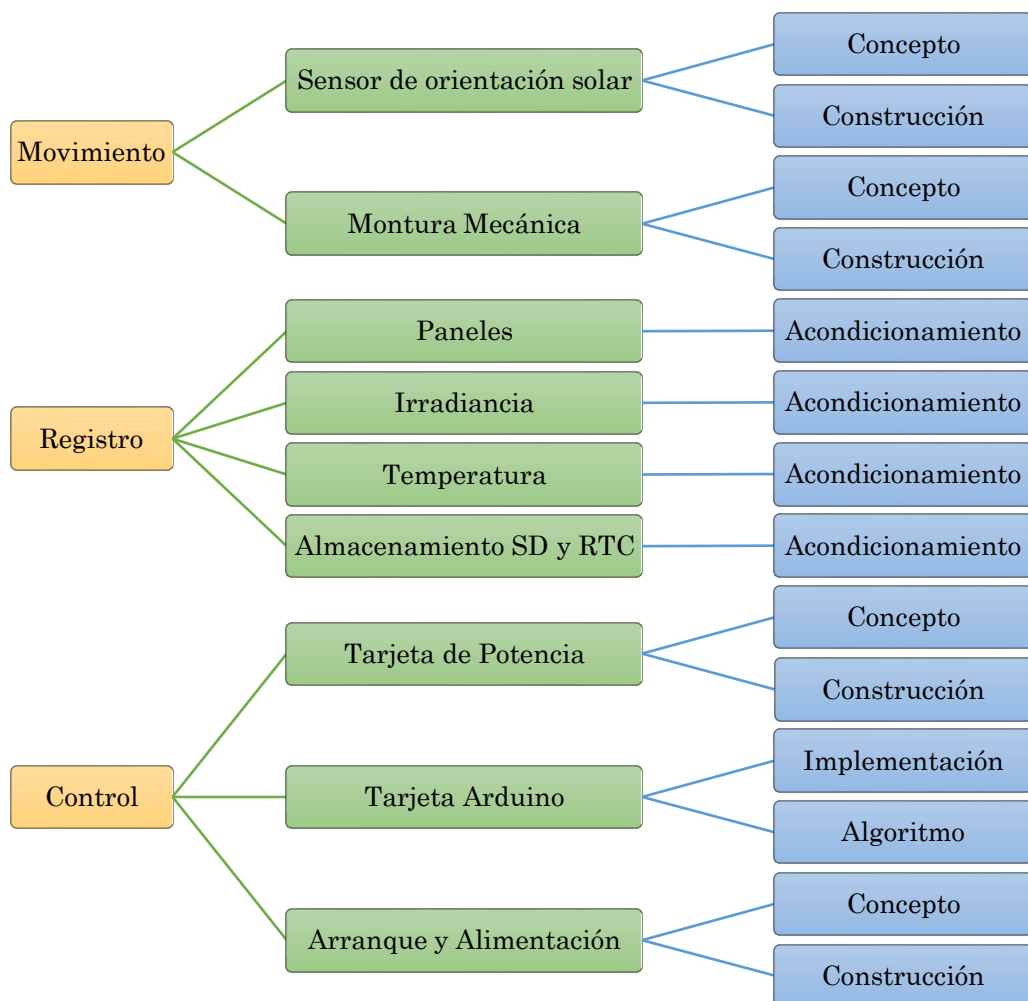


Figura 70. Esquema general del proceso de construcción del seguidor solar.

4.1. Sensor de orientación solar

La siguiente fase se divide en dos etapas, Concepto y Construcción.

4.1.1. Concepto

- a) Como principio fundamental del sensor se usara el de la “T” divisoria explicado en la figura 71 a continuación, la cual usaría los diferenciales de luminosidad generados por sombra.

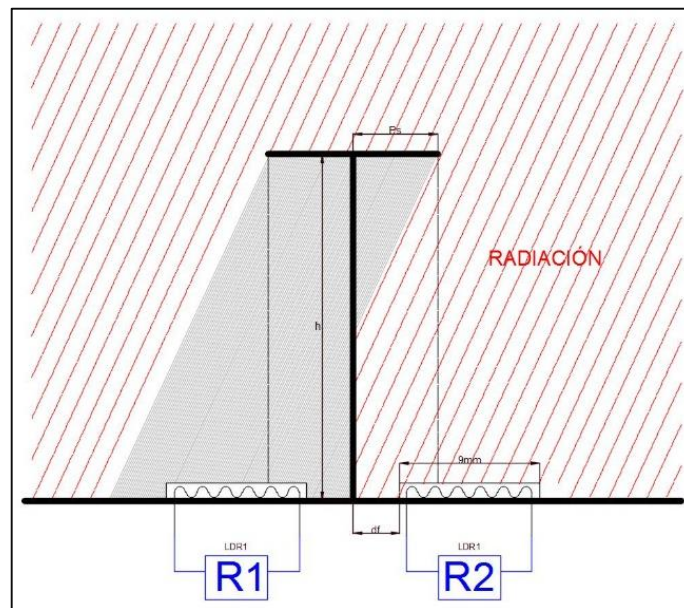


Figura 71. Concepto geométrico del sensor de orientación solar. (Fuente: De La Gala, A. y Perez, F.)

- b) La electrónica del sensor deberá poseer un sistema de autocalibración para que funcione bajo condiciones climáticas diurnas.
- c) Permitir una Resolución variable mediante autobalance dinámico del puente Wheatstone según el grado de exactitud.

4.1.2. Construcción

Primeramente usaremos los baja lenguas para construir la parte física destinada a crear el diferencial de luminosidad (“T” divisoria) y el cartón maqueta y una placa prototipada como base en la que se colocaran los LDR, cuyas patitas se harán pasar por entre los agujeros de esta, para esta parte se usara silicona líquida y tornillos para mantener las piezas unidas como se muestra en la figura 72.



Figura 72. Vista axial de la T divisoria.

En segundo procederemos a la construcción de la electrónica usando como base las placas prototipadas, dicha etapa la dividiremos físicamente en 2 partes por practicidad siendo la primera aquella en donde se encuentra los multiplexores y el control de auto calibración para el funcionamiento diurno, como se muestra en la figura 73.

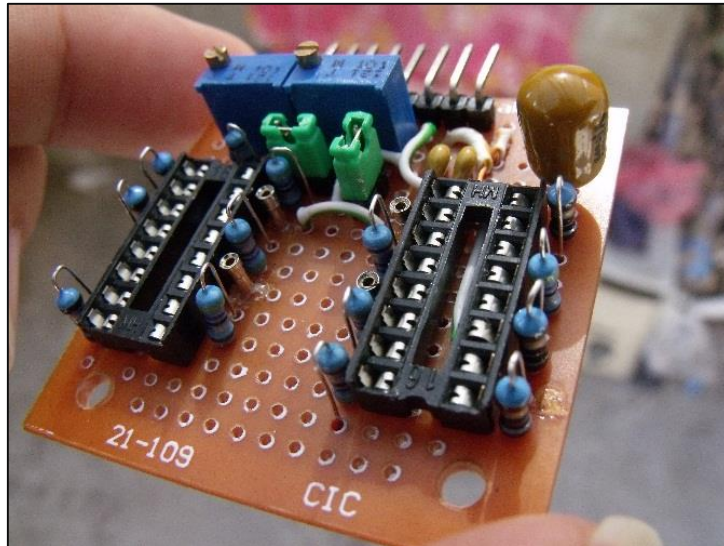


Figura 73. Proceso de soldado de la parte de auto calibración.

Esta parte tendrá que ir acoplada a la te divisoria con tornillos de 1/8 y mantenidos a una distancia apropiada con resortes y madera de bajalenguas, como se muestra en la figura 74, esto vendría a conformar la parte externa y sensible del sensor de orientación.

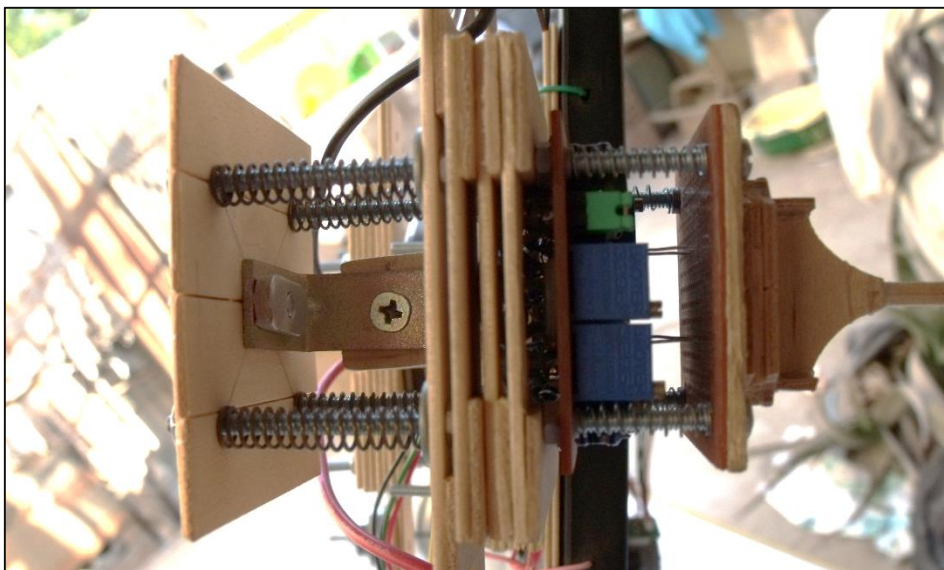


Figura 74. Proceso de sujeción de la tarjeta de auto calibración y T divisoria.

Luego procederemos a armar la segunda parte de la electrónica, ésta es la del autobalance dinámico del puente Wheatstone, e ira conectada internamente en una caja de circuitos aislada del ambiente, dicho proceso de armado se muestra en la figura 75.

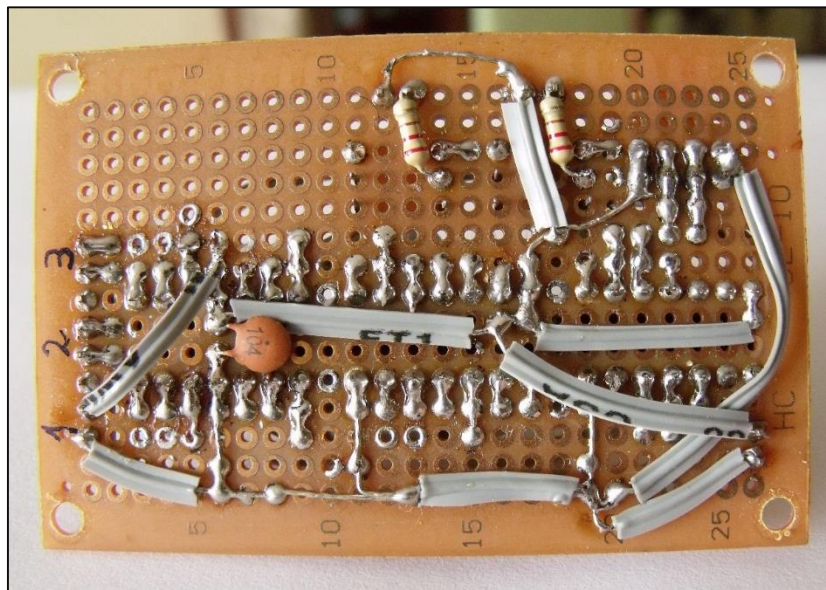


Figura 75. Proceso de soldado de la tarjeta de autobalance dinámico.

4.2. Montura

4.2.1. Concepto

Cómo puede verse en la figura 76 toda la montura mecánica del seguidor solar se basara en el principio básico de mantener al mínimo la cantidad de grados de libertad ya que el aumento de éstos contribuye a que aumente tanto el nivel de complejidad mecánico del sistema como el acondicionamiento de los motores que darían movimiento a esta misma. Dotado de 3 posibles movimientos, uno para la calibración inicial (se ajustará a la declinación del lugar, Tacna en nuestro caso),



Figura 77. Eje de la ascensión recta y sujetador de madera.

En segundo colocaremos en uno de los extremos del eje principal un engranaje de plástico a través del cual se transmitirá el movimiento por una banda de plástico desde el motor hacia el eje, como se muestra en la figura 78.



Figura 78. Colocación del engranaje en el eje de ascensión recta.

Luego deberemos hacer un acople o pieza que conecte el eje principal con la segunda parte móvil del sistema, el eje de Declinación, para esto juntaremos dos tablas de madera de pino y con una broca de copa realizaremos un agujero exactamente por el medio de estas así tendremos dos piezas de madera que al unir las por tornillos nos darán la oportunidad de hacerlo a presión y así mantenerse

firmemente unidas al eje de ascensión recta, tal proceso de fabricación se aprecia en la figura 79.



Figura 79. Proceso de construcción de la pieza de acople.

Ahora en otra madera se realizará un agujero menor y se colocarán los rodamientos pequeños, figura 80, éstos sujetarán el eje del motor mismo, abran dos en total, uno para el motor del eje de ascensión recta y el otro para el de la declinación.



Figura 80. Colocación de rodamientos para los ejes de los motores.

A continuación se procederá a colocar el motor paso a paso con engrane de tornillo sin fin interno en la maderita que sujeta su eje principal a través de los rodamientos pequeños, para esto también se deberá hacer agujeros en la parte plástica externa del motor por donde se pasarán tornillos de 1/8 para darle la firmeza apropiada, figura 81.

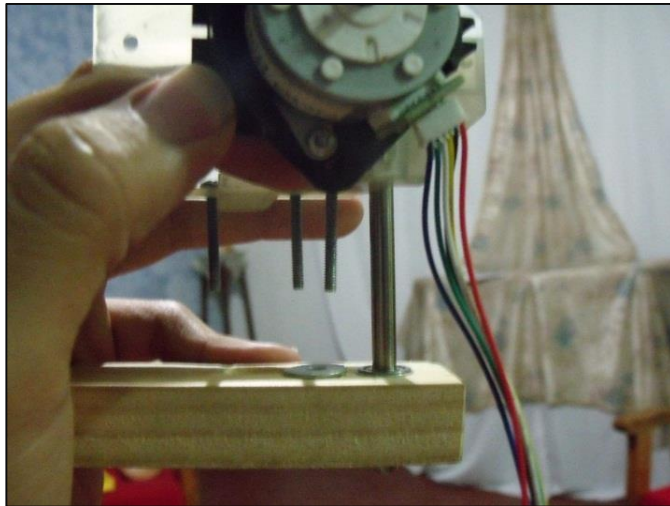


Figura 81. Colocación del motor y su eje en los rodamientos.

Cómo en el caso del eje de ascensión recta también es necesario crear una pieza de acople para el eje de la declinación que se sujete del eje del motor de declinación y una el panel fotovoltaico junto con los sensores y el contrapeso, éste se hará de una sola tablita madera como puede verse en la figura 82, haciéndole agujeros por los cuales pasaran las varillas pequeñas de acero sobre las cuales se armarán lo antes mencionado.



Figura 82. Acople de madera para el eje de declinación y varilla pequeña de acero.

Abajo en la figura 83, se muestra una primera vista del proceso de ensamblaje, del seguidor, en el que se incluye ya el sensor de orientación solar así como el panel fotovoltaico que ha de estar en seguimiento, los cuales con ayuda de bajalenguas y tornillos de 1/8 serán colocados en sus respectivas posiciones.



Figura 83. Proceso temprano de armado del seguidor solar

Luego se procederá a colocar el motor paso a paso que ha de controlar el giro del eje de ascensión recta, es decir, aquel que estaría funcionando durante el

día, para esto usaremos madera de pino para mantener el eje de ascensión y el del motor a una misma distancia predeterminada y las varillas roscadas de 1/4 como esqueleto de todo el armazón como puede ser mostrado en la figura 84.

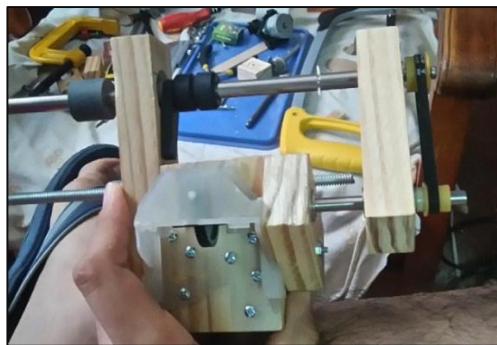


Figura 84. Proceso de ensamblado del motor del eje de ascensión recta.

Para mantener balanceado el sistema con respecto a cada uno de sus ejes, será de vital importancia, implementar un arreglo hecho de rodamientos, bujes, tuercas contrapesos y tornillos a fin de armar con todos ellos una suerte de contrapesos para cada eje de todo el sistema tal proceso podemos apreciarlo de la figura 85 a la figura 87.

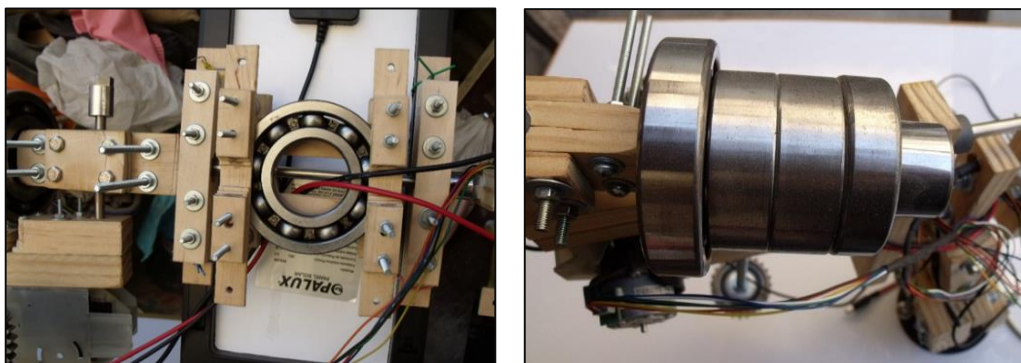


Figura 85. Izquierda, Contrapeso de la sección del eje de Declinación correspondiente al panel. Derecha, Contrapeso de todo el eje de Declinación.

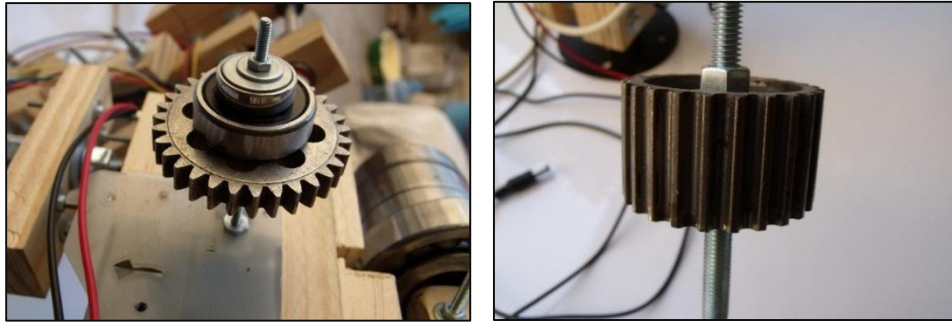


Figura 86. Izquierda, Contrapeso del motor de Declinación. Derecha, Contrapeso del eje de ascensión recta



Figura 87. Contrapeso del eje de la latitud.

Finalmente necesitaremos una base, figura 88, lo suficientemente fuerte para sostener todo el sistema pero y a su vez lo suficientemente móvil para permitir la fácil configuración según la declinación del lugar, ésta se construirá de madera de pino usando tornillos de 1/4 para mantenerlo ensamblado y pegado a una base de parlante de metal la cual servirá como acople final con el antes trípode mencionado en los materiales.



Figura 88. Proceso de ensamblado de base de sujeción.

4.3. Paneles

EL acondicionamiento de los paneles fotovoltaicos a evaluar consistirá primeramente, en lo respecto a la electrónica, en un circuito simple de división de tensión para el cual se usará el reóstato de 2W y un amplificador operacional a modo seguidor de voltaje, como puede verse en la figura 89, regulando la fuente de alimentación de este.

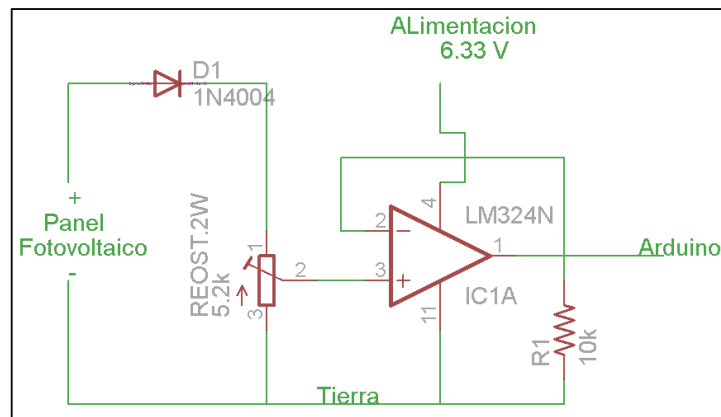


Figura 89. Esquema del acondicionamiento electrónico de los paneles fotovoltaicos.

En segundo usaremos el software Autodesk Inventor para diseñar en 3D la pieza destinada a sujetar el panel fotovoltaico, y un acople que una dicha pieza con la estructura mecánica del seguidor solar, como puede verse en la figura 90 y 91, ambas piezas se diseñaran a medida y será sujetadas mediante tornillos o a presión.

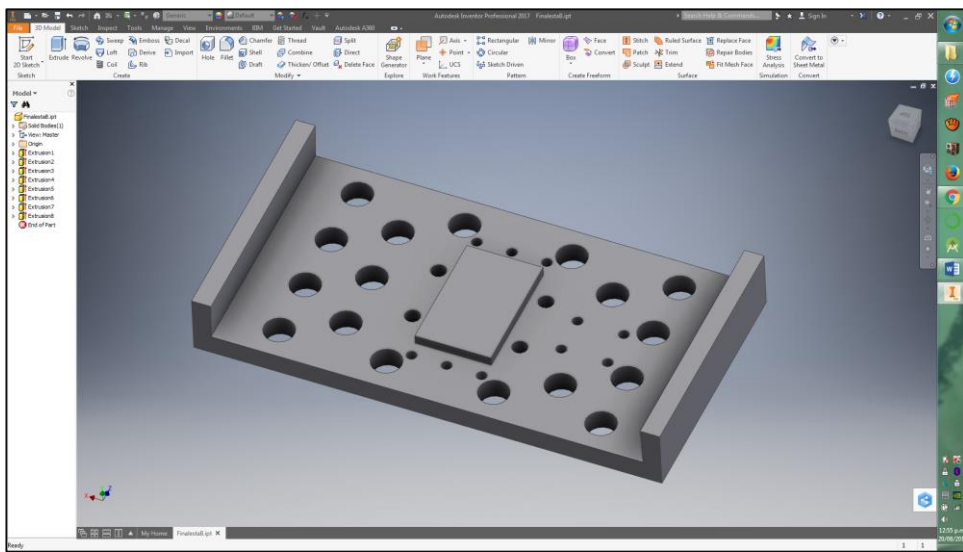


Figura 90. Proceso de diseño en 3D de la pieza de sujeción del panel fotovoltaico.

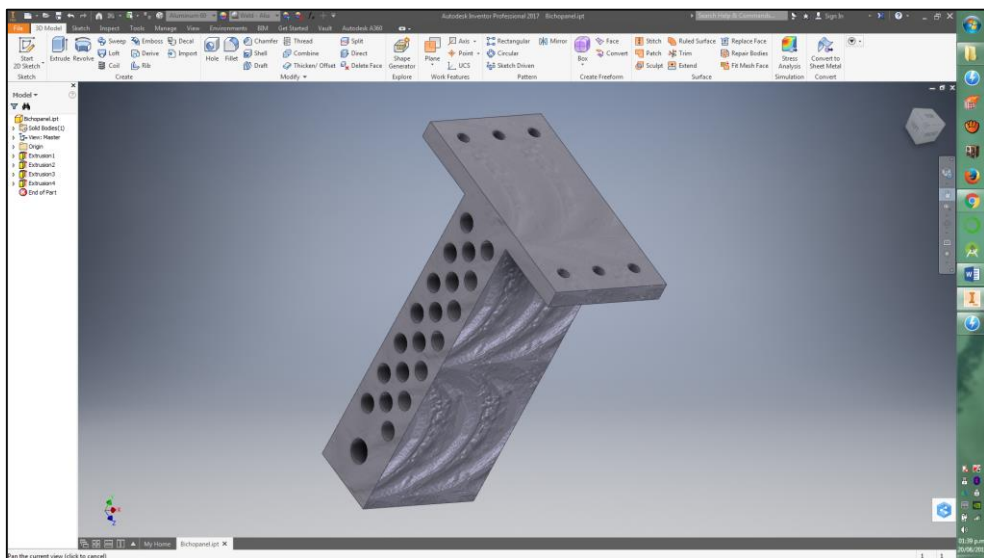


Figura 91. Proceso de diseño en 3D de la pieza de acople de la pieza de sujeción.

4.4. Irradiancia

Con la finalidad de conocer cuanta de la irradiancia diaria está siendo aprovechada por los paneles fotovoltaicos, es necesario construir dos sensores capaces de tomar esas medidas (uno para el panel de seguimiento y otro para el panel estacionario), se utilizaran LDR's y amplificadores operacionales para acondicionar la señal, este proceso debe garantizar que la salida sea lo mas lineal posible, para eso el circuito se basará en una configuración en modo amplificador de tipo puente como puede verse en la figura 92.

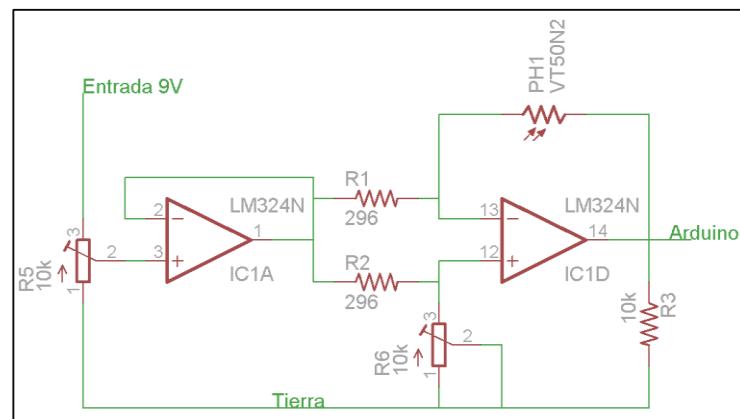


Figura 92. Esquema electrónico del sensor de irradiancia solar.

A su vez como en el caso de los paneles usaremos el software Autodesk Inventor nuevamente para diseñar en 3D las piezas destinadas a servir de armazón y acople de los sensores de irradiancia solar, tal proceso de diseño puede apreciarse en las figuras 93 y 94. Posteriormente al diseño se procederá a imprimir las piezas en una Impresora 3D.

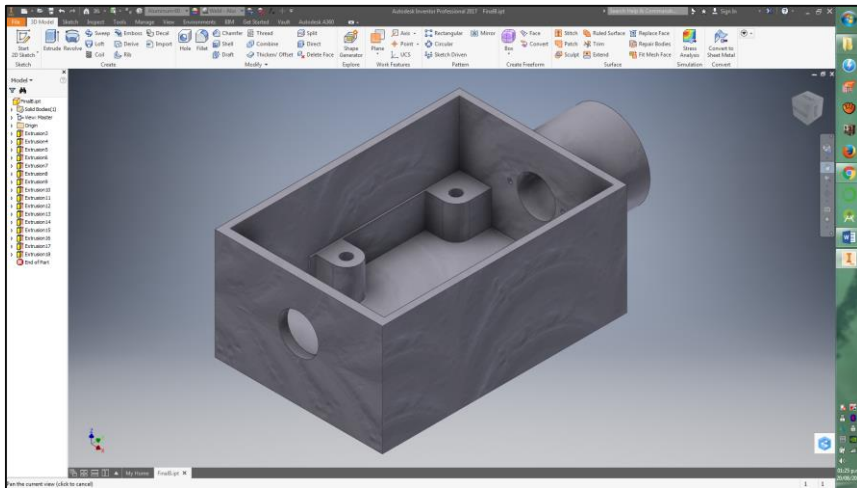


Figura 93. Proceso de diseño en 3D del armazón del sensor.

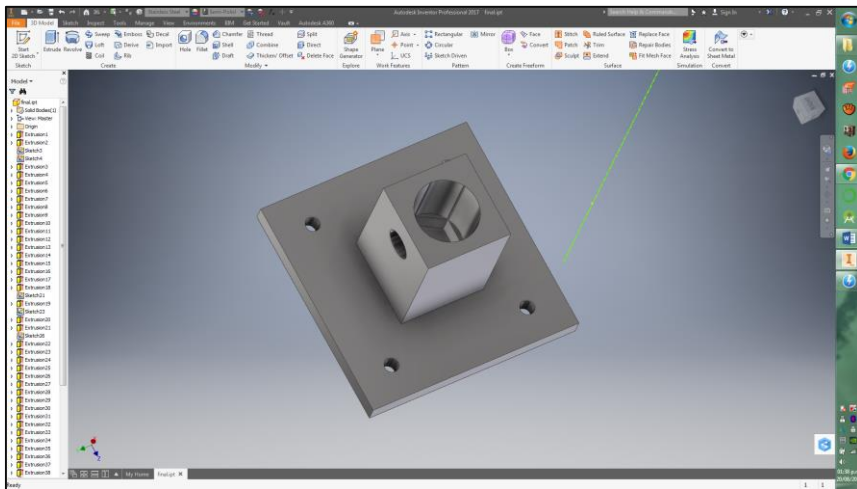


Figura 94. Proceso de diseño en 3D de la pieza de acople.

Es a su vez necesaria una etapa más en el proceso de construcción del sensor de irradiancia solar, que es la de su calibración, para esto tendremos que usar el único piranómetro disponible del Departamento de Física como instrumento patrón, exponiendo ambos a la misma irradiancia, con ayuda de multímetros y una lámpara alógena, bajo condiciones de laboratorio como puede verse en la figura 95.

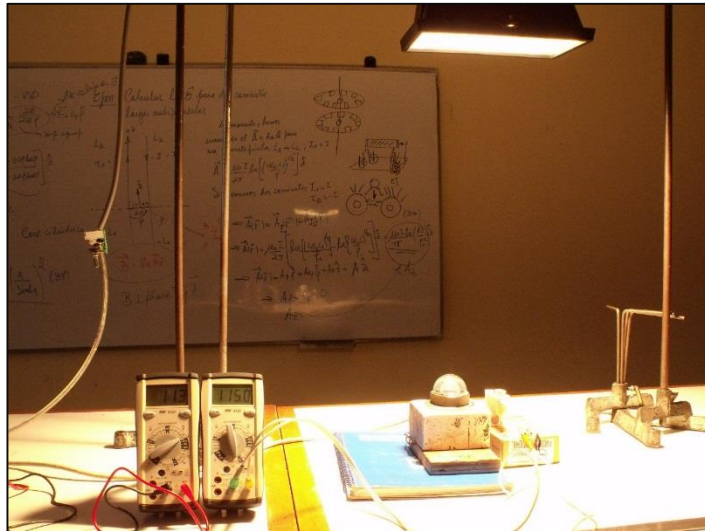


Figura 95. Proceso de calibración del sensor de irradiancia solar.

4.5. Temperatura

El acondicionamiento del sensor de temperatura no será más de lo que la hoja técnica del fabricante nos indica para el apropiado uso del LM335, para ponerlo operativo lo soldaremos a un cable de audio, como lo muestra en la figura 96, teniendo cuidado de mantener las patitas separadas entre sí y uniendo el otro extremo al plug de 3,5 mm. Ahora si bien la electrónica es la misma para cada sensor de temperatura así como su linealidad, es de esperarse que no estén calibrados de igual manera, para eso se deberá incluir también una etapa de calibración la cual es mostrada en la figura 97 y se usara como patrón un termómetro de alcohol.

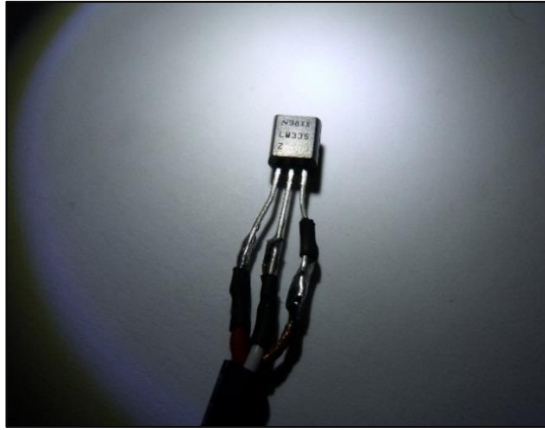


Figura 96. Proceso de soldado y armado del sensor de temperatura.



Figura 97. Proceso de calibración de los sensores de temperatura.

4.6. Almacenamiento SD y RTC

El proceso y armado de esta etapa se llevará a cabo según el esquema propuesto en la figura 98 usando como base una tarjeta prototipada e improvisando

un adaptador para la tarjeta SD de 1 GB, en donde se registrarán los datos, a su vez del soldado de las piezas correspondientes como se muestra en la figura 99.

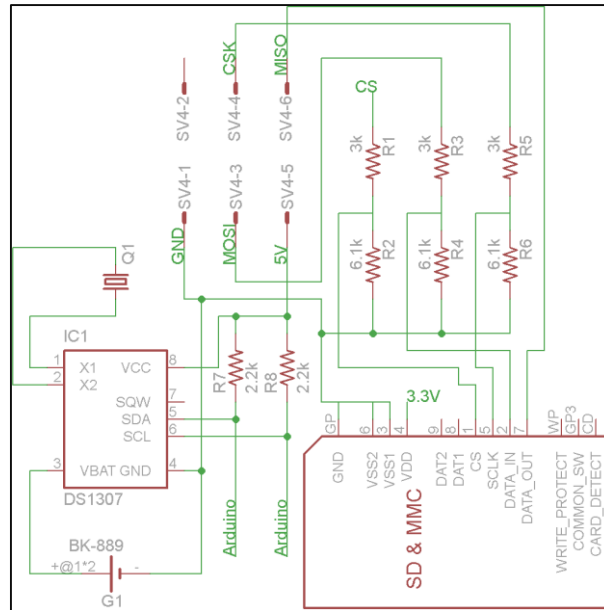


Figura 98. Esquema electrónico de la tarjeta de almacenamiento SD y RTC.

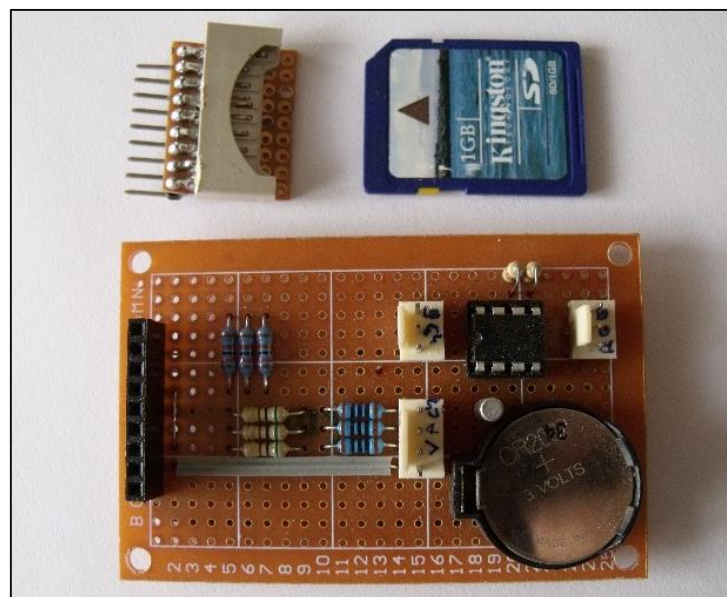


Figura 99. Proceso de armado de la tarjeta de almacenamiento SD y RTC.

4.7. Tarjeta de Potencia

4.7.1. Concepto

Esta tarjeta controlará el funcionamiento de los motores paso a paso bajo la filosofía de que solo sean necesarios dos cables para poder controlar un motor paso a paso y un cable de selección de motor reduciendo así la cantidad de pines a usar del Arduino.

4.7.2. Construcción

Para esta etapa se utilizará como base una placa prototipada sobre la cual se soldarán los componentes correspondientes, como puede verse en la figura 100, además se harán pasar tornillo de 1/8 por cuatro agujeros en dichas placas sirviendo de soporte.

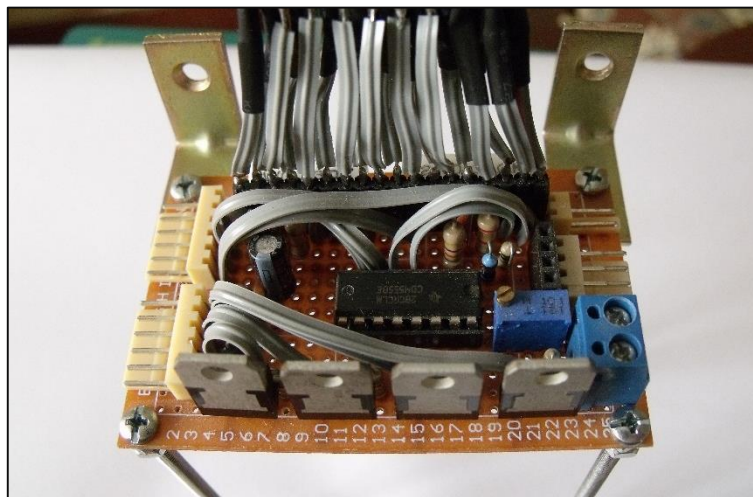


Figura 100. Proceso de construcción de la tarjeta de potencia.

4.8. Tarjeta Arduino

4.8.1. Implementación

El proceso de implementación de la tarjeta Arduino es en esencia un proceso muy simple ya que se limita a conectar los cables provenientes de todas las demás tarjetas a los pines del mismo Arduino, tal y como puede verse en la figura 101 y siguiendo la hoja técnica del fabricante, la cual nos indica las posibles funciones de cada modelo.

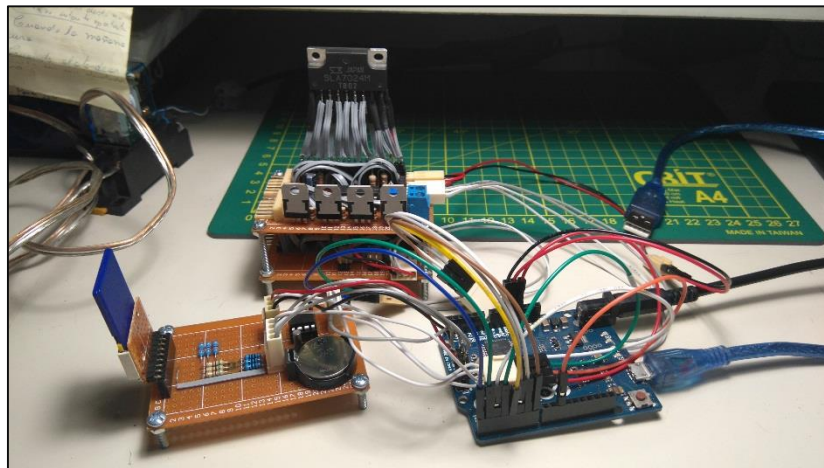


Figura 101. Pruebas de implementación iniciales realizadas.

4.8.2. Desarrollo del Algoritmo

Para el proceso de desarrollo del algoritmo tendremos como principal herramienta el Arduino IDE mencionado anteriormente en los materiales aquí es donde escribiremos en lenguaje C las instrucciones para un adecuado control del movimiento del seguidor y del sistema de registro, dicho proceso se mencionará en pseudo código a continuación:

Etapa “void setup(){}”. Esta etapa se dividirá en cuatro y son:

1. Declaración de los pines a utilizar del Arduino y como utilizarlos (pinMode()).
2. Configuración de la fecha y hora del RTC (RTC.adjust(DateTime())).
3. Implementar un test de existencia de la tarjeta SD
4. Variables de comparación de tiempo (segd=100 y minuted=100) y borrado de matrices de intercambio (segmatrix, minumatrix, cincomatrix, diezmatrix).

Etapa “void loop(){}”. Esta etapa se dividirá en siete partes y son:

1. Bloquear energía a los motores para prevenir un avance accidental
2. Obtener la fecha y hora del RTC (DateTime now=RTC.now()) y almacenar cada fragmento de fecha y tiempo en sus variables respectivas.
3. Solicitar al sensor de orientación la información de la posición del sol.
4. Ajustes que se realizarán una vez al día (al prenderse el seguidor solar).
 - a. Detectar si es año bisiesto.
 - b. Calcular la declinación utilizando la ecuación de Spencer.
 - c. De la declinación calcular la cantidad de pasos que el motor deberá dar.
 - d. Lectura de los bump switch de reinicio.
 - e. Regresar al punto de inicio por cada vez que el sistema se reinicie.

- f. El sistema deberá regresar siempre al punto de inicio tanto para cuando amanece como para cuando hubo un corte de corriente, en este punto es que el sistema procede a destrabarse y calcular zonas prohibidas.
 - g. Con la cantidad de pasos previamente calculados accionar el motor encargado del eje de declinación, almacenando una variable de retorno para que al apagarse regrese siempre a posición de equinoccio.
5. Recolección de data
- a. Solicitar del RTC la hora exacta
 - b. Como el bucle del void loop (){} del arduino corra varias veces por segundo necesitaremos restringir la cantidad de veces que el arduino debe preguntarle a los sensores los “datos” a registrar reduciéndola a solo una vez por segundo.
 - c. Grabar los datos en 4 archivos de texto: ARCSEG.TXT para los datos recolectados en promedio de promedios cada 10 s, ARCMIN.TXT para cada 1 min, ARCINCO.TXT para cada 5 min y ARCDIEZ.TXT para cada 10 min.
6. Estando aun dentro del segundo, después de que culmine la recolección de la data para ese segundo, se activará la función de seguimiento solicitando a la tarjeta de orientación la posición mediante las funciones “ojow==low && ojoe==low” para saber si es preciso seguir al sol con ayuda de las funciones “switch” y “case”.

7. El apagado final nocturno estará en función a una hora determinada, usando la función “Do”. El ciclo de apagado consiste en:
 - a. Retorno de declinación, hacer mover el motor de la declinación la misma cantidad de pasos que avanza en el encendido pero de forma inversa.
 - b. Retorno final, haciendo mover el motor a cardo del eje de ascensión recta en dirección Este hasta que un bump switch de fin de carrera sea presionado apagando así por completo el seguidor solar.

4.9. Arranque y Alimentación

4.9.1. Concepto

La idea es crear un dispositivo completamente automático capaz de funcionar durante el día y apagarse completamente en las noches logrando un consumo cero de energía en los momentos que no necesite trabajar el seguidor solar, a su vez esté listo para el caso en que amanezca encendiéndose únicamente cuando la irradiancia sea lo suficientemente alta como para que permita tomar medidas, usando dos mini paneles fotovoltaicos como sensores, éstos, alimentarían el sistema por unos segundos, el tiempo suficiente para reconectar la energía al seguidor e inicie su funcionamiento diario.

4.9.2. Construcción

Se conectarán dos mini paneles a los costados del sensor de orientación solar con ayuda de unos conectores metálicos y atornillados a una estructura hecha de

bajalenguas, tal como se muestra en la figura 102, esto ira en el extremo más distante del eje del sistema justo por arriba del panel solar en seguimiento.

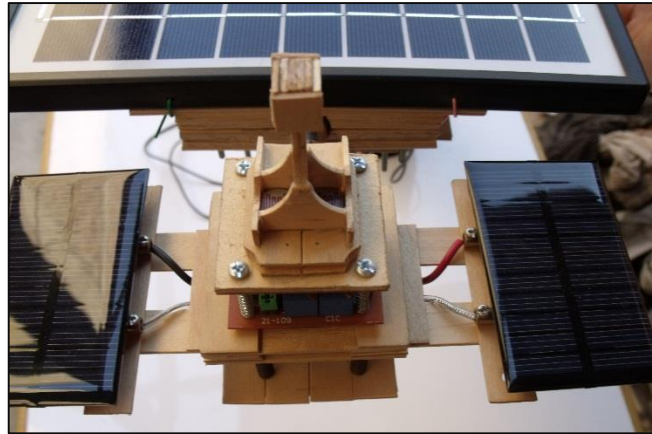


Figura 102. Proceso de armado de sensores de orientación y los sensores de arranque.

Se usaran dispositivos electromecánicos para configurar las etapas del proceso de encendido, como se muestra en la figura 103 así como un bump switch de alto voltaje, ya que son los únicos en los que una fuga de corriente es imposible garantizando así una desconexión verdadera del sistema.

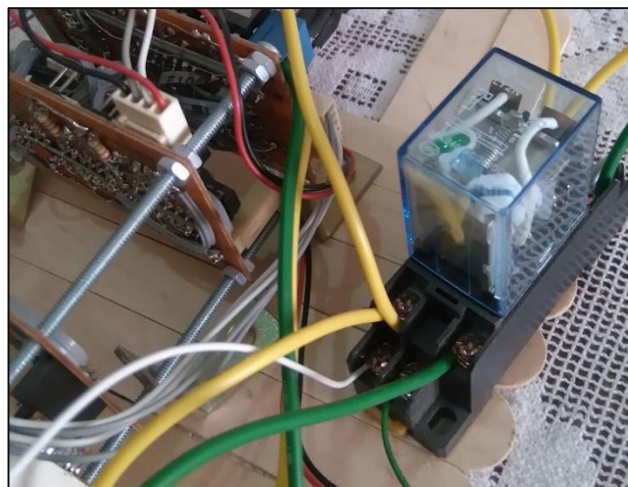


Figura 103. Proceso de implementación de relés.

A su vez esta tarjeta servirá de fuente de poder de todo el seguidor y será necesario implementarle un transformador y un circuito de regulación de tensión que permita la salida de 24V para alimentar los motores, 12V para alimentar los relés, 9V para alimentar la tarjeta Arduino, 5V para alimentar sensores de temperatura y 6,33V para los sensores de irradiancia solar, tal proceso de construcción de armado se muestra en la figura 104.

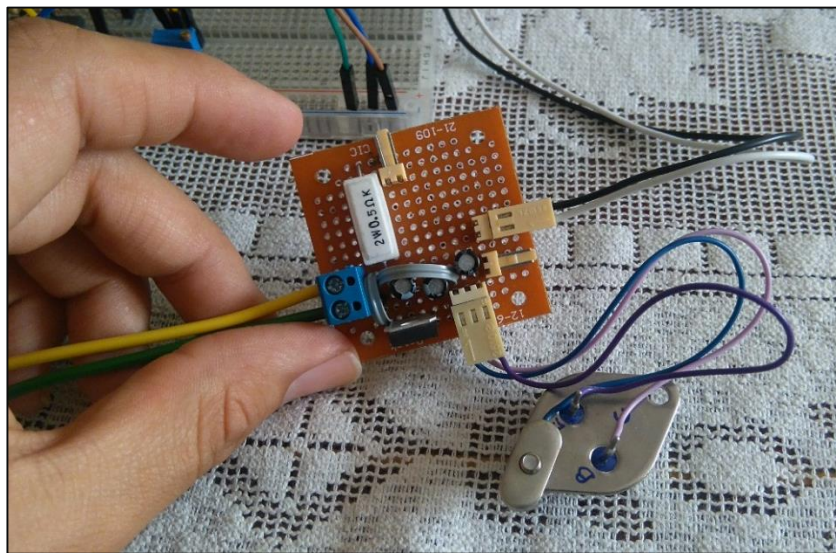


Figura 104. Proceso de implementación de la tarjeta de arranque y alimentación.

A continuación como se muestra en la figura 105, el procedo de ensamblado final de todas las etapas necesarias para la construcción del seguidor solar.



Figura 105. Proceso construcción y ensamblado final de todas las etapas.

CAPITULO V

RESULTADOS

Los resultados se dividirán en tres partes, primeramente el ensamble final de todas las tarjetas electrónicas que tuvieron que ser construidas junto con el esquema electrónico de aquellas inventadas. En segundo la construcción final del Seguidor solar así como la implementación de sus sensores con sus respectivas piezas de soporte. Al final se representará en gráficas los datos registrados por el seguidor, para su posterior análisis.

5.1. Ensamble final de todas las tarjetas electrónicas

Como puede apreciarse en la figura 106, tuvimos que ordenar todas las partes electrónicas de tal manera que pudieran colocarse en un solo lugar y estuvieran protegidas del exterior, para esto se utilizó un recipiente hermético de plástico de 28cm x 14cm y se construyó una base de madera en la cual se pudieran sujetar la electrónica, ésta se conecta con el exterior sólo a través de unos conectores sellados herméticamente en las paredes plásticas del recipiente tal como puede apreciarse en la figura; también puede verse la tarjeta Arduino Mega sujeta a la base de madera, la cual como hemos mencionado sería el cerebro del seguidor.

Se aprecia también la colocación de los reóstatos así como la de las baterías de encendido y el relé de arranque maestro, las resistencias de los paneles no se aprecian por estar en una zona no visible.

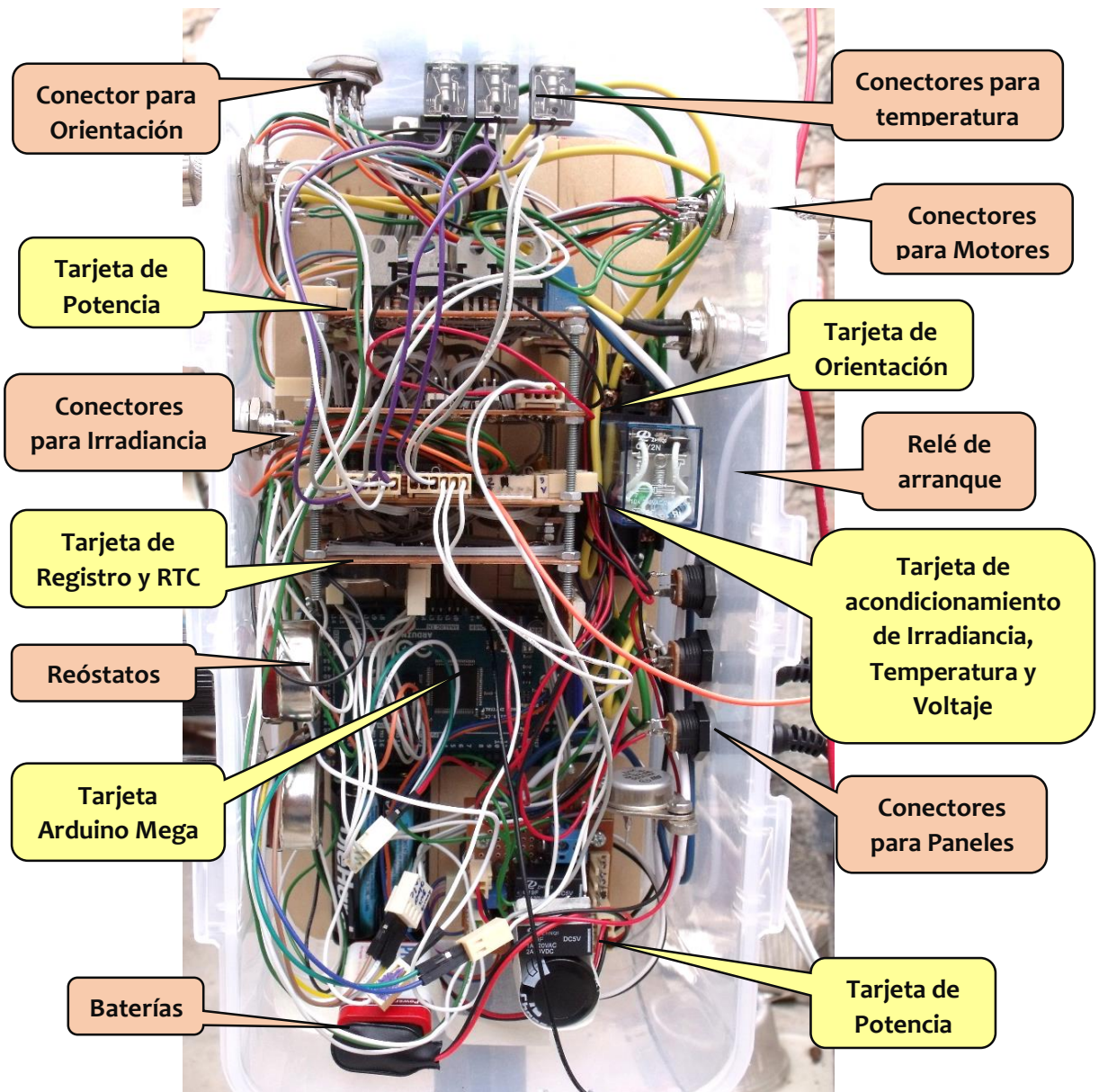


Figura 106. Ensamble final de todas las partes electrónicas.

5.2. Esquema electrónico del sensor de orientación solar

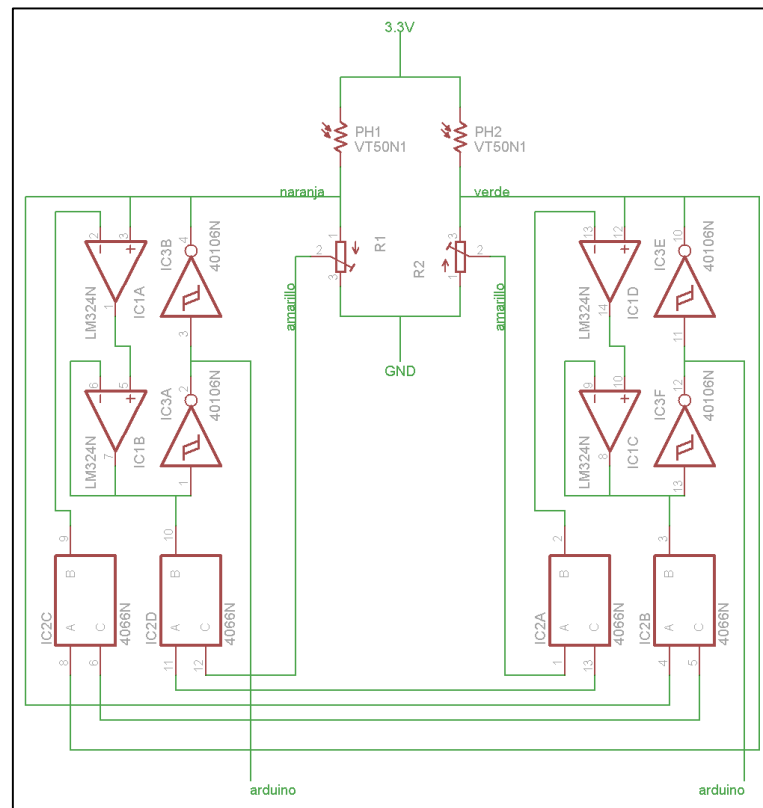


Figura 107. Esquema del sensor de orientación, realizado con el software Eagle 7.1.

Aquí en la figura 107 se muestra el esquema electrónico de la tarjeta correspondiente al sensor de orientación solar que tuvo que ser diseñada y luego construida, usando como base una tarjeta prototipada de 72mm x 46mm y ordenada de forma paralela junto con las demás tarjetas a través de cuatro tornillos sujetando cada una de ellas en su posición con tuercas. Hay que recalcar que la parte del diseño correspondiente al puente de Wheatstone y la de los sensores no está implementada junto con la circuitería interna ya que, debido a su misma naturaleza, ésta ha de estar expuesta y forma parte del sensor de orientación, mostrado más adelante.

5.3. Esquema electrónico de la tarjeta de potencia

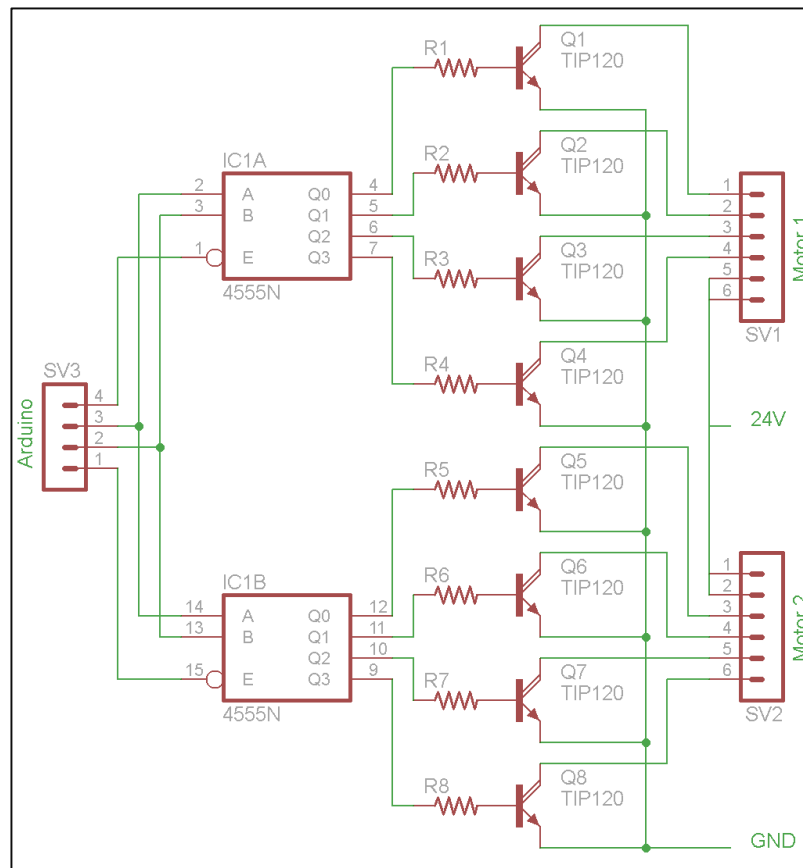


Figura 108. Esquema de la tarjeta de potencia, realizado con el software Eagle 7.1.

Arriba en la figura 108 se muestra el esquema electrónico diseñado para la tarjeta de potencia, la cual controlaría los motores paso a paso reduciendo al mínimo el requerimiento de puertos por parte de la Tarjeta Arduino Mega, pudiendo controlar a cada motor turnando los pasos de cada uno de ellos a través de otro cable, éste sería único para cada motor que se piense utilizar, obteniendo así la cantidad final de puertos únicamente sumando 2 a la cantidad “n” de motores que se piense utilizar.

5.4. Esquema electrónico del dispositivo de Arranque y alimentación

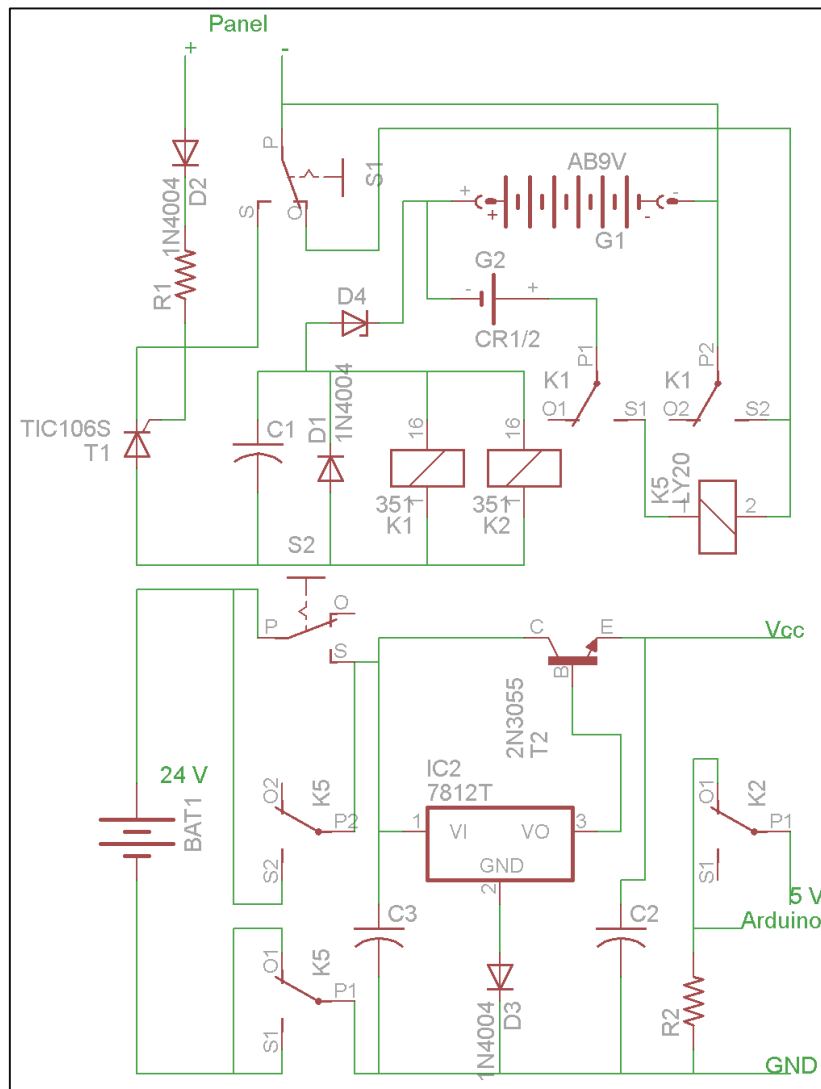


Figura 109. Esquema de la tarjeta de arranque y alimentación, realizado con el software Eagle 7.1.

En la figura 109 puede verse el esquema electrónico de la tarjeta de arranque y alimentación la cual fue construida exitosamente, atornillada a la base de madera y ubicada en la zona inferior derecha de la figura 106, usando como base placas prototipadas de 45mm x 45mm, esta tarjeta se dividió en dos partes, la primera,

encargada de encender y apagar de forma automática todos los sistemas del seguidor, y la segunda fue la de alimentación sirviendo como transformador, regulador y distribuidor de la tensión necesario para el correcto funcionamiento del sistema.

5.5. Acopladores de plástico para paneles fotovoltaicos

En las figuras 110 se muestra ya impreso en plástico poliláctico los acopladores, llamados A (izquierda) y C (derecha), que sujetarían los paneles fotovoltaicos con firmeza, salvando su integridad y permitiendo la colocación de sensores en la parte trasera de los paneles, en nuestro caso los sensores de temperatura. Estas dos piezas se conectarían juntas e irían atornilladas al lado del contrapeso del eje de declinación en la varilla roscada principal.

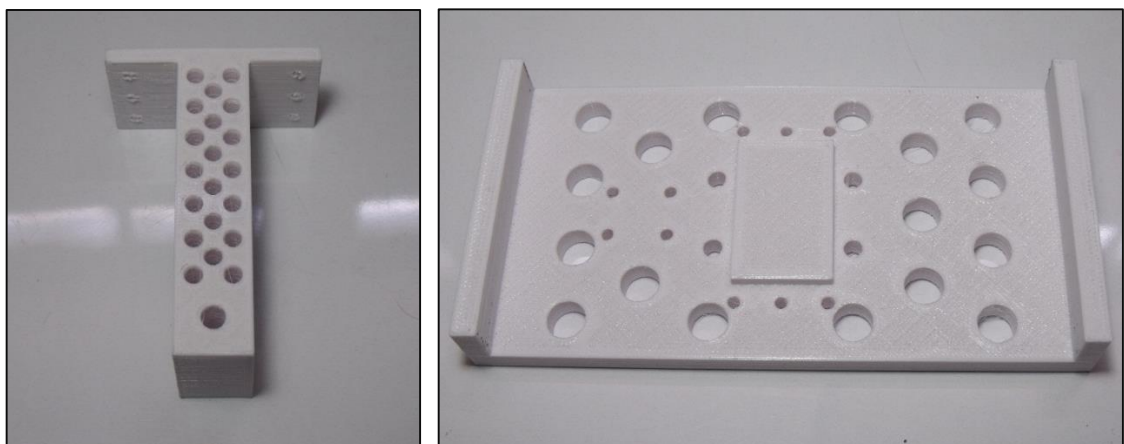


Figura 110. Acoplador A y B de plástico poliláctico para panel fotovoltaico.

5.6. Sensor de Irradiancia

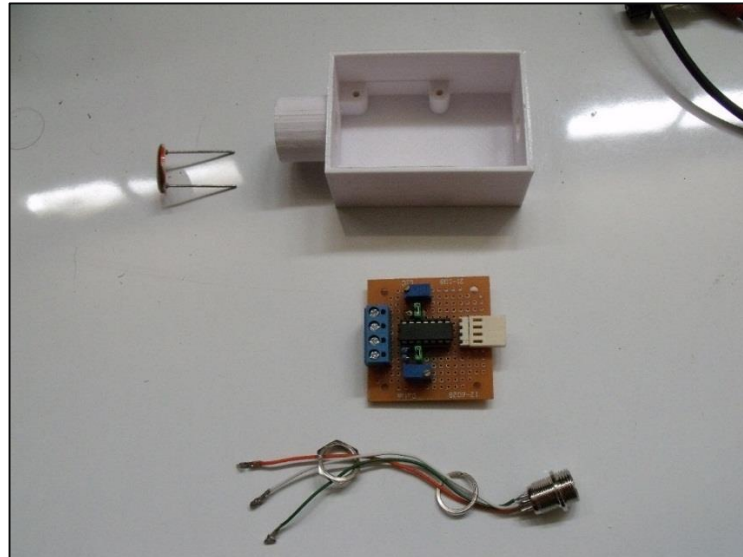


Figura 111. Construcción final del armazón del Sensor de Irradiancia.

En la figura 111 finalmente acabadas todas las piezas necesarias para el sensor de Irradiancia, en la parte superior de la figura se muestra la celda fotoconductora a utilizar junto con el armazón en plástico poliláctico, abajo en el medio ya implementada la tarjeta de irradiancia, y al final el conector DIN listos para su ensamblado final. Abajo en la figura 112 puede apreciarse su ensamblado final junto con la pieza de acople C también de diseño propio y construida en ácido poliláctico.

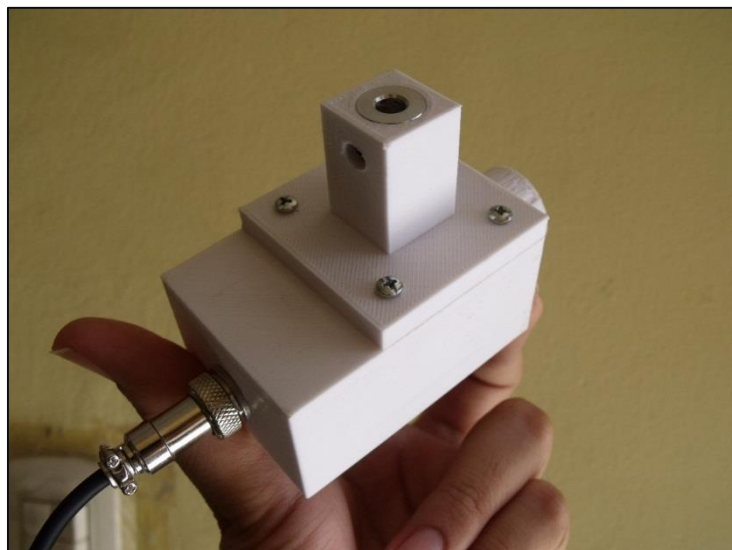


Figura 112. Armado final del sensor de Irradiancia solar con su pieza de acople C.

5.7. Temperatura

Finalmente en la figura 113 el ensamblado final del sensor de temperatura con su cápsula de protección improvisada y su plug estéreo de 3,5mm para una fácil conexión.



Figura 113. Armado final de los sensores de temperatura.

5.8. Construcción final del seguidor solar.



Figura 114. Construcción final del seguidor solar.

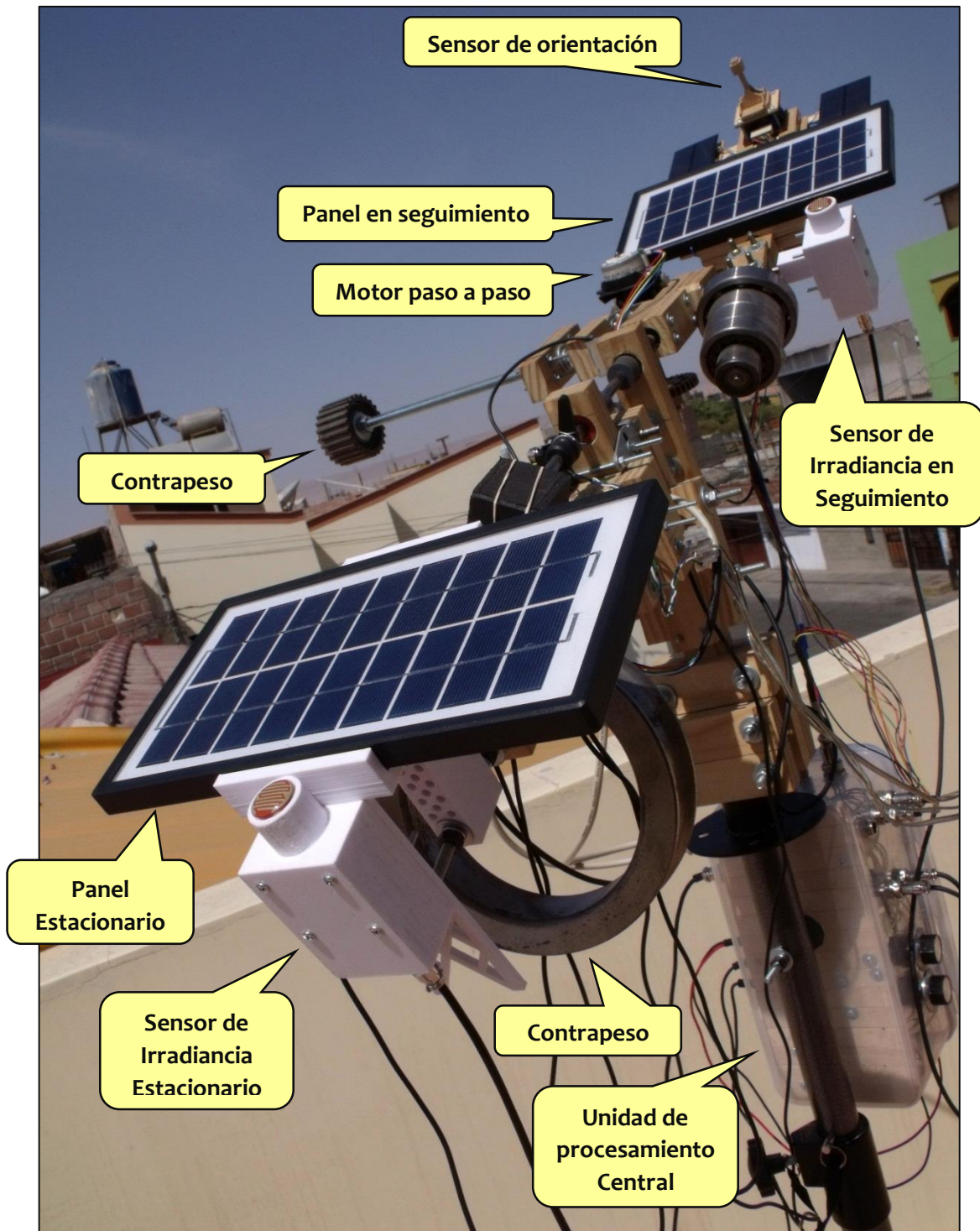


Figura 115. Vista superior del seguidor solar con sus respectivos sensores.

En las figura 114 se muestra el seguidor solar ya acabado, desplegado y preparado para el inicio de su funcionamiento. En la figura 115 una vista superior del seguidor solar en donde se muestran todos los sensores a utilizar.

A continuación se mostrarán las gráficas de los datos registrados por el seguidor solar, desde el 20 de Octubre hasta el 10 de Noviembre del 2017, correspondientes a las variables de Irradiancia, Potencia, Eficiencia y Temperatura, de los paneles fotovoltaicos. Las gráficas mostrarán un promedio de cada dato cuya hora sea compartida, siendo tomados y mostrados cada 10s creando así en una sola imagen “un día característico promedio” para el caso de un día despejado y de otro en presencia de nubes. Dichos datos fueron procesados y graficados con el software Origin 2017.

5.10. Gráficas correspondientes a la Irradiancia vs Tiempo

En las figuras 116 y 117 se muestra las gráficas de la Irradiancia Global vs Tiempo para un día característico, siendo este un promedio de los días que competen al mes de Octubre y de los días que competen al mes de Noviembre, para resumir esto simplemente se les llamara mes de Octubre y mes de Noviembre.

La Irradiancia que se muestra fue medida en tiempo real usando los sensores implementados para este fin, llamándose Irradiancia S a los datos arrojados por el sensor ubicado paralelo al panel fotovoltaico en seguimiento constante y el otro, Irradiancia E, a los datos arrojados por el sensor que se colocó paralelo al panel fotovoltaico Estacionario, siendo medida la Irradiancia en W/m^2 .

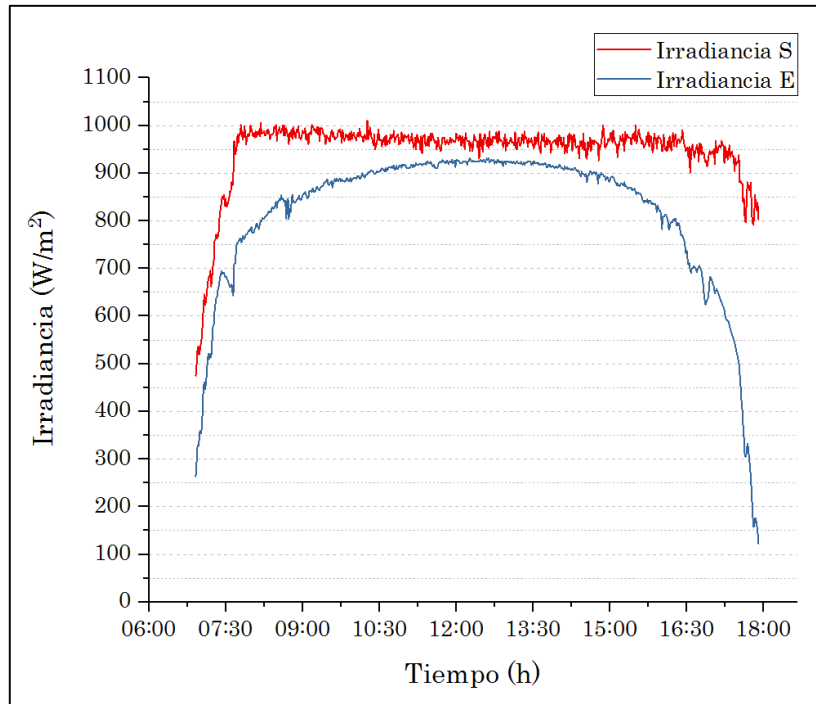


Figura 116. Irradiancia vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Octubre.

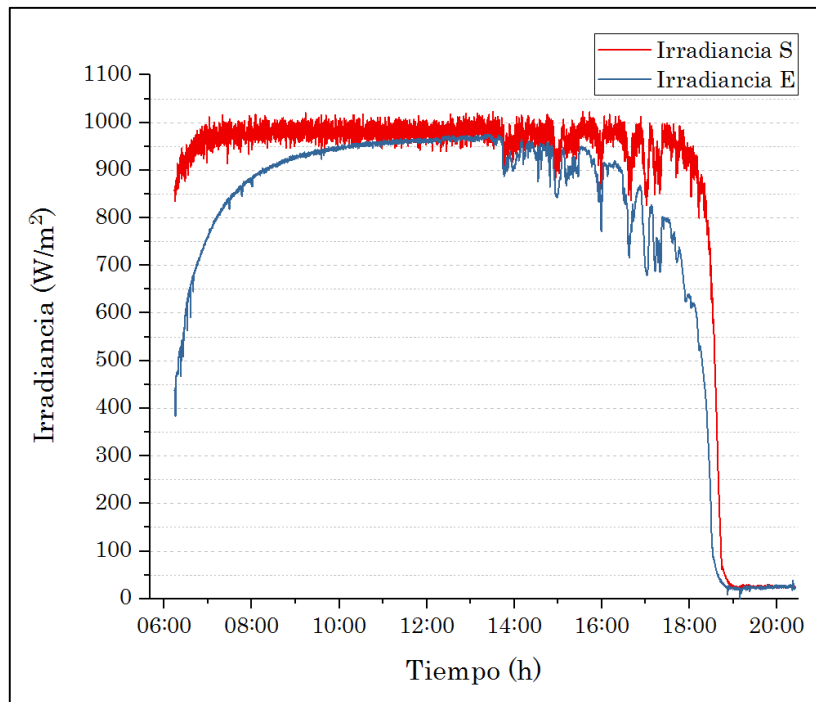


Figura 117. Irradiancia vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Noviembre.

Es importante recalcar que el panel fotovoltaico estacionario así como su sensor de Irradiancia E, estarían inclinados a un ángulo de -18° aproximadamente.

5.11. Gráfica de la Potencia incidente total vs Tiempo

A continuación en las figuras 118 y 119 se muestran las gráficas correspondientes al mes de Octubre y Noviembre de la Potencia incidente por unidad de tiempo, esto es, la Irradiancia incidente multiplicada por el área del panel fotovoltaico. Ya que la Irradiancia se mide en W/m^2 al multiplicarlo por una cantidad de área (midiéndose en m^2) solo nos quedaría W es decir la potencia total que incide sobre los paneles fotovoltaicos.

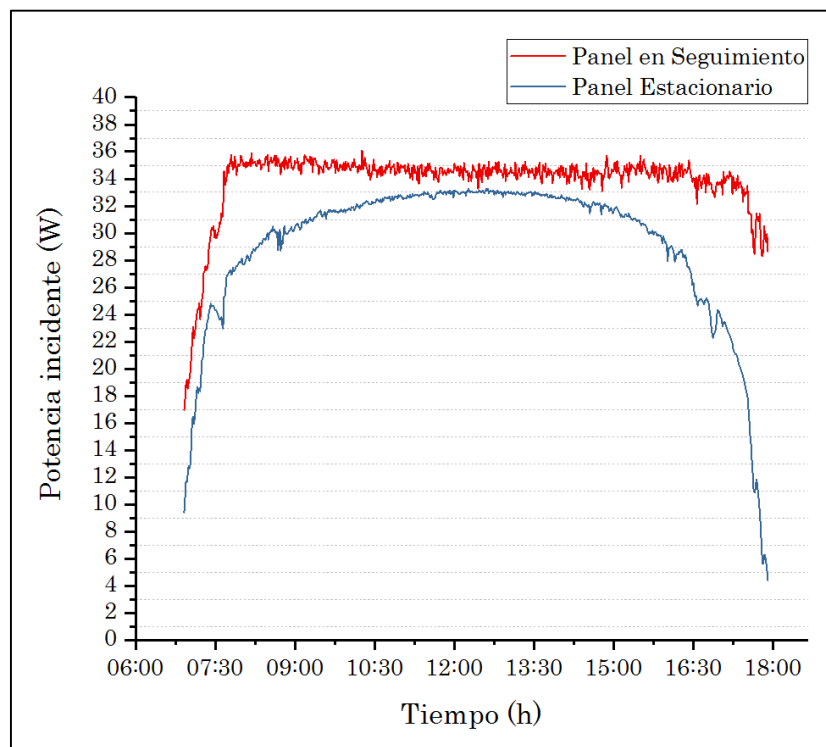


Figura 118. Potencia incidente vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Octubre.

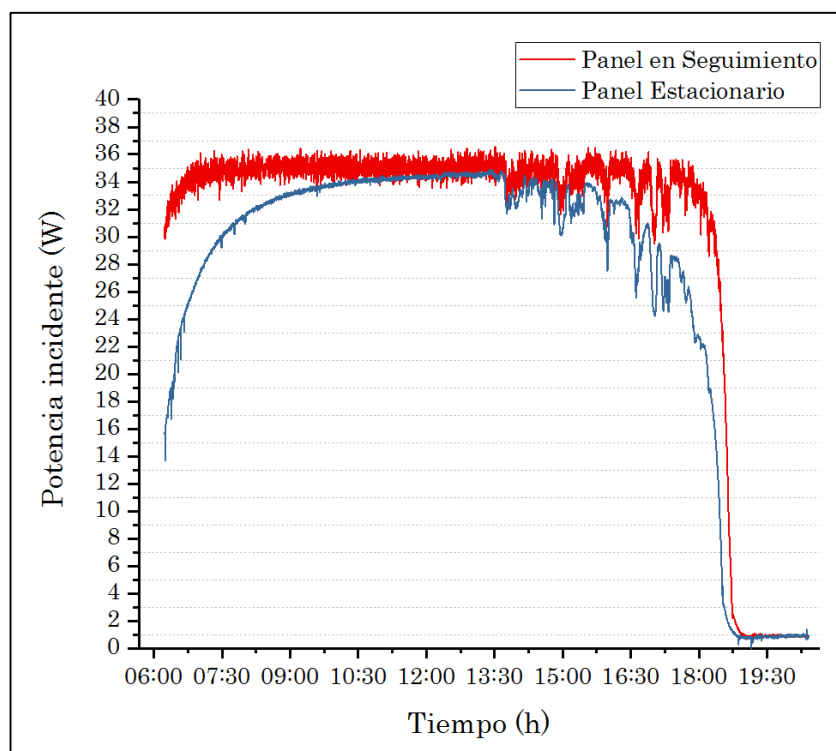


Figura 119. Potencia incidente vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Noviembre.

5.12. Gráfica de la Potencia generada por los paneles vs Tiempo

A continuación en las figuras 120 y 121 se muestran las gráficas de la potencia generada por los Paneles Fotovoltaicos por unidad de tiempo de un día promedio característico para el mes de Octubre y para el mes de Noviembre respectivamente. La potencia se obtiene a partir del registro del Voltaje que genera el panel bajo una carga siendo ésta la resistencia optima bajo la cual se le permite al panel fotovoltaico alcanzar el punto de Máxima Potencia ($26,4 \Omega$ en nuestro caso usando la hoja técnica del panel como referencia), luego por ley de Ohm se calcula dicha potencia siendo sus unidades W .

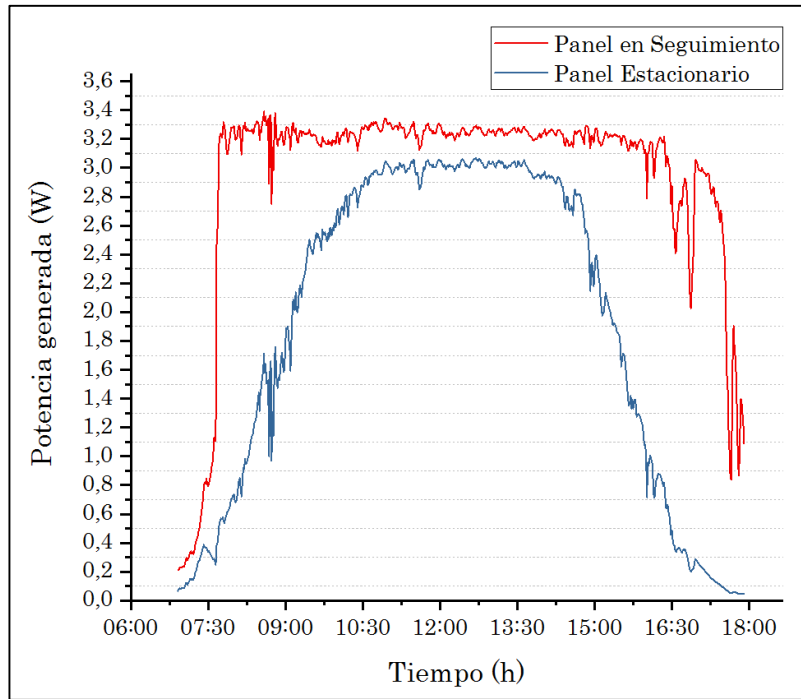


Figura 120. Potencia Generada vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Octubre.

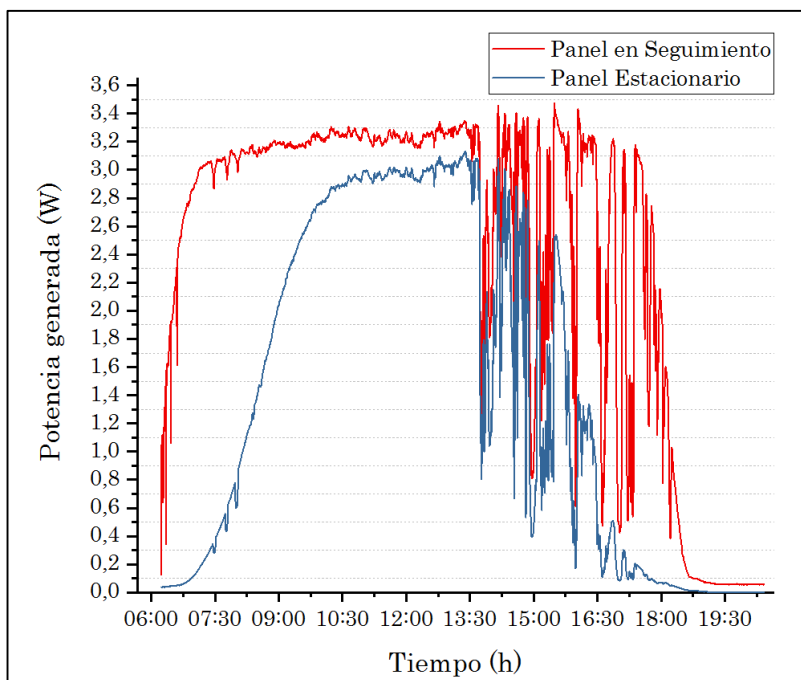


Figura 121. Potencia Generada vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Noviembre.

Puede tonarse además la gran variación en la gráfica de la figura 121 a partir de la 13:30 en comparación con el comportamiento previo así como con la gráfica de Octubre en la figura 120.

5.13. Gráfica de la Temperatura vs Tiempo

Abajo en las figuras 122 y 123 se muestran las gráficas de la Temperatura con respecto al tiempo para un día característico promedio del mes de Octubre y Noviembre respectivamente, dentro de cada figura, en realidad, se pueden apreciar tres gráficas. La primera en color rojo, es para el caso de la Temperatura que alcanza el panel fotovoltaico en Seguimiento Solar el cual fue llamado simplemente como Temperatura S, la segunda grafica en color azul, es para el panel fotovoltaico Estacionario, el cual se llamó como Temperatura E y la tercera en color amarillo corresponde la temperatura Ambiente, la cual se llamó Temperatura A, todo esto tal como lo indica en la leyenda de las gráficas.

Estas tres temperaturas fueron tomadas en simultáneo desde el inicio del seguidor solar, incluso con poco o nada de sol, hasta su cese de funcionamiento, siendo las unidades de medida en °C.

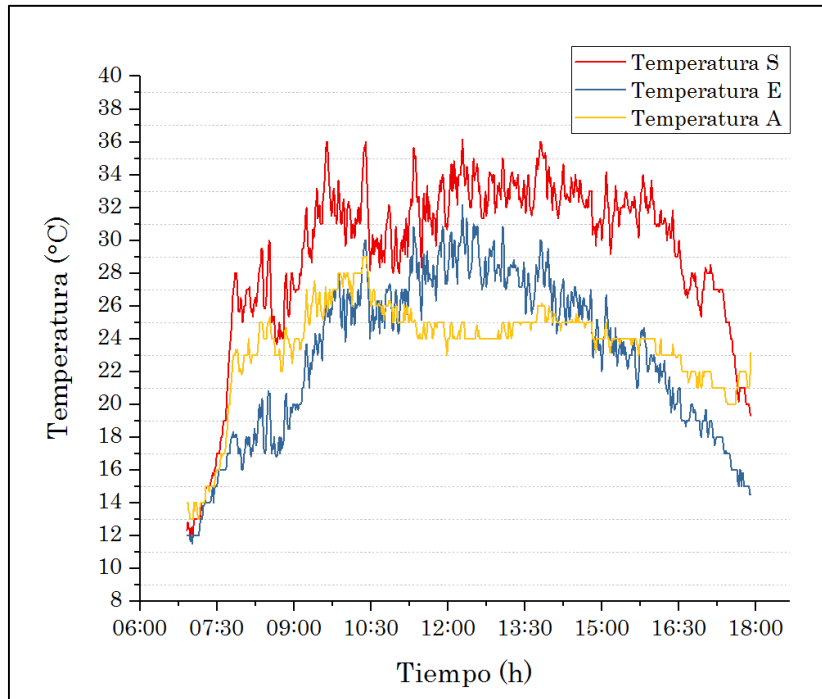


Figura 122. Temperatura vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Octubre.

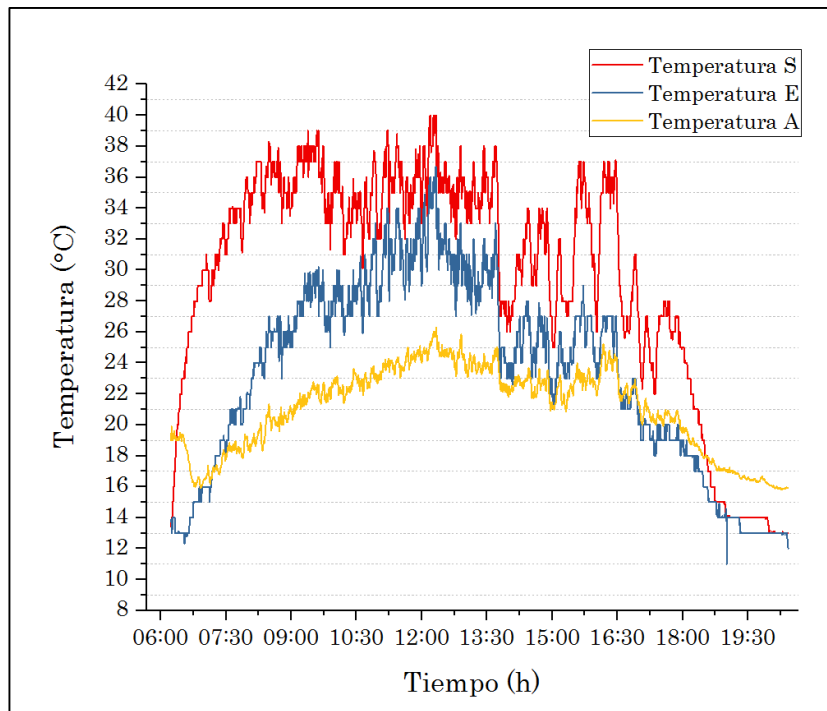


Figura 123. Temperaturas vs Tiempo para un día característico promedio del mes de Noviembre.

5.14. Gráfica de la Energía incidente y la producida por el panel fotovoltaico

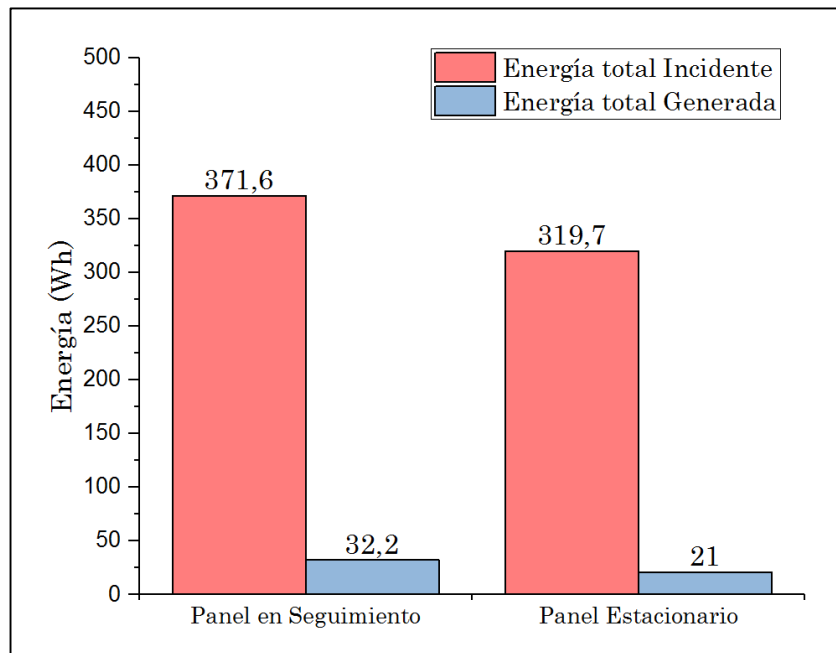


Figura 124. Comparativa de le Energía para un día característico promedio del mes de Octubre.

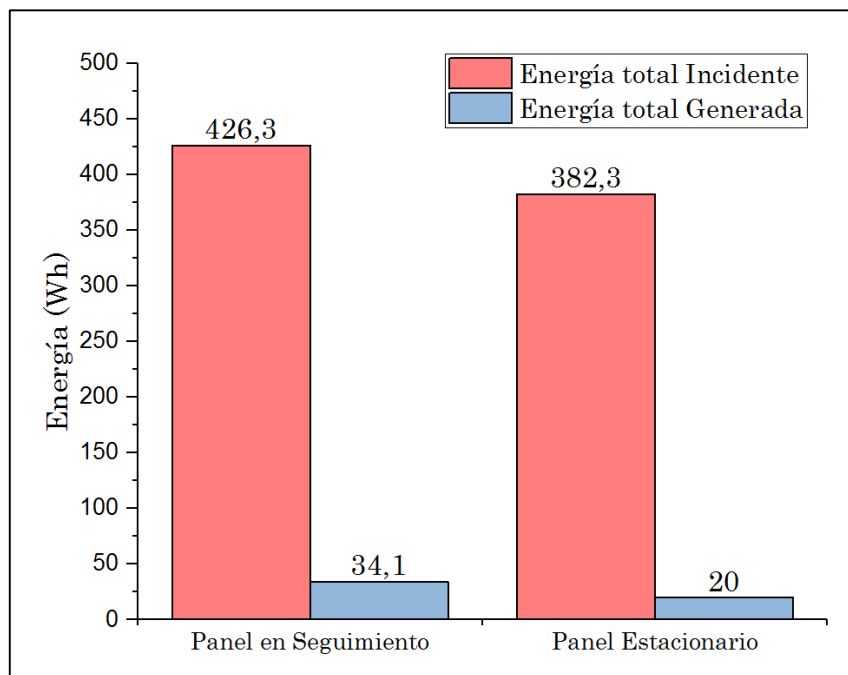


Figura 125. Comparativa de le Energía para un día característico promedio del mes de Noviembre.

Arriba en las figuras 124 y 125 se muestra el comportamiento Energético general del sistema para el mes de Octubre y Noviembre respectivamente. Ilustrando así la clara comparación entre la energía total proveniente del sol que incide sobre los paneles fotovoltaicos y la que éstos son capaces de generar, tanto para el Panel en Seguimiento como para el Panel Estacionario. Se obtiene la energía a partir del área bajo la curva, de las gráficas de potencia de las figuras 118 a la 119, siendo la energía medida en Wh.

5.15. Gráfica de la Eficiencia

Finalmente, abajo en la figura 126 se muestra en gráfica de barras la Eficiencia Alcanzada por los paneles fotovoltaicos gracias al seguidor solar en comparación con la alcanzada simplemente dejando al panel estacionario, mostrándose dos, una para el mes de octubre y la otra para el mes de Noviembre.

La eficiencia se calculó dividiendo la Potencia generada por la Potencia incidente y multiplicada por 100 siendo así la potencia medida en porcentaje (%), tanto para el panel en Seguimiento como para el Estacionario.

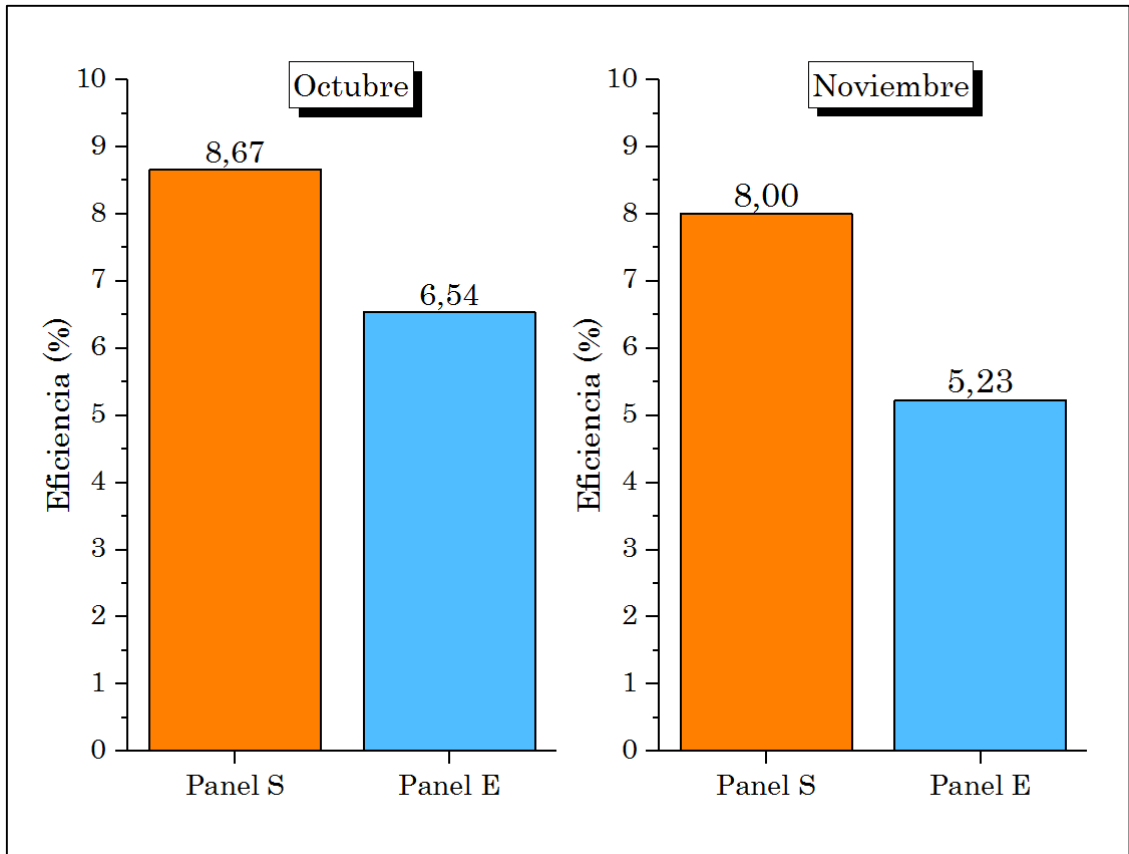


Figura 126. Comparativa de la eficiencia promedio alcanzada para ambos paneles fotovoltaicos.

CAPITULO VI

DISCUSIÓN

Como puede verse en el capítulo respectivo a los materiales, hemos tratado de mantenernos fiel a la idea de usar materiales accesibles para nuestra comunidad habiendo sido todos con excepción de la tarjeta Arduino Mega comprados aquí en Tacna, este actuar fue en respuesta de la poca accesibilidad a materiales y equipos especializados que hubieran encarecido un poco la construcción pero reducido enormemente el trabajo manual así como el tiempo que tardó la construcción del seguidor solar.

Se debe señalar que en el presente trabajo no se pretende desarrollar un modelo matemático de la radiación ni del efecto de la radiación sobre un panel o del comportamiento del panel debido a la temperatura, sino el de plasmar la relación intrínseca entre el seguimiento solar y como éste afecta la eficiencia del panel fotovoltaico

Se ha obviado el tratamiento de las propiedades espectrales de la radiación, por entender que su consideración escaparía del alcance de esta tesis. En cambio, se incluye una somera descripción de la evolución de la temperatura ambiente a lo largo del día, puesto que, como ha sido puesto de manifiesto en cualquier modelo detallado del comportamiento de un generador fotovoltaico debe tenerse en cuenta este parámetro

Durante la etapa de funcionamiento y puesta en marcha se observó que el equipo poseía una excepcional resistencia al viento aunque las condiciones iniciales sobre todo para la declinación se vieron afectadas porque ésta etapa no poseía un sistema retroalimentado.

La circuitería mostrada en la figura 106 demostró ser bastante robusta a pesar de haber sido hecha completamente a mano y con tarjetas prototipadas, manteniéndose en funcionamiento a pesar de haber sufrido un par de caídas inesperadas debido al constante traslado (subidas y bajadas de la azotea). El sistema no posee una resistencia a la lluvia, entonces aquellos días se hubo que suspender su despliegue.

La montura mecánica del sistema mostró un gran problema a la hora de trasladarlo, nuevamente esto es debido a que cualquier trabajo extra de compactación debido a la falta de accesibilidad de ciertos materiales hubiera extendido el tiempo de construcción del proyecto enormemente.

Se pensó, para el sistema de registro, que podría ser conveniente tener varios archivos de registro simultáneos para diferentes rangos de medición 10s, 1 min, 5 min y 10 min, pero al momento de procesar la información demostró ser bastante inútil los datos de 5 min así como los tomados cada 10 min, simplemente se usaron los registrados cada 10s, ya que cualquier trabajo de reducción de data podría ser fácilmente realizada con el software Origin.

En la etapa tardía de este proyecto se utilizó una impresora 3D para imprimir piezas que requerían más precisión que la que se podía alcanzar con un taladro y una regla, estas piezas hechas en plástico poliláctico demostraron ser muy resistentes a pesar que la densidad de impresión fue de solo el 10%.

En las gráficas de las figuras 116 y 117 correspondientes a la Irradiancia se observa cómo es que la Irradiancia global registrada por el sensor en Seguimiento Solar es mayor que la del sensor Estacionario, a su vez se aprecia cómo es que alcanza valores elevados con mayor rapidez, sosteniéndose en dichos valores durante mayor tiempo hasta que decae al anochecer, a las 19 horas aproximadamente. También notamos que para la gráfica de Noviembre existe una mayor variación en los datos a partir de la 13:30 horas aproximadamente, Esto podría deberse a la mayor presencia de nubes cercanas a esa hora.

Podemos observar que el comportamiento de las gráficas correspondientes a la Potencia en las figuras 118 y 119, no son casi nada diferentes que a las de las figuras 116 y 117, esto pues era de esperarse, porque solo se multiplica por un mismo número.

En las gráficas de potencia generada por los paneles fotovoltaicos en las figuras 120 y 121 puede notarse incluso una mayor diferencia entre el Panel en Seguimiento y el Estacionario, haciéndonos pensar que el factor de posición es incluso mucho más importante en un panel fotovoltaico que en el sensor de Irradiancia implementado para este proyecto; Las curvas proporcionadas por el

panel en Seguimiento superan en todo momento a las del panel Estacionario, esto también puede deberse a que, para los meses de prueba ya mencionados, la declinación era mucho mayor, superando al ángulo fijo de inclinación que poseía el panel Estacionario. También notamos una importante variación e inestabilidad de la potencia generada para el mes de Noviembre a partir de las 13:30 horas corroborando que ha de tratarse de nubes, lo cual sería interesante ver cómo esto podría afectar a la eficiencia del sistema y si es que este es capaz de superar dicha variable.

Para las figuras 122 y 123 en las que muestran las gráficas de la temperatura sucede algo bastante interesante, a tempranas horas del día la temperatura ambiente es más elevada que la de los paneles, esto podría ser debido a que los paneles fotovoltaicos disipan más calor debido a su estructura y forma mientras que el sensor de temperatura ambiente solo entra en contacto con el aire, luego conforme pasa el tiempo la temperatura Ambiente se incrementa, mostrándose relativamente estable mientras que la de los paneles se incrementa mucho más, siendo el de mayor temperatura la del panel en Seguimiento seguido por el Estacionario, llegando aproximadamente hasta 36°C para el mes de Octubre y 40°C para el mes de Noviembre. Igual que en los casos anteriores la temperatura de los paneles disminuye haciéndose relativamente inestable a partir de las 13:30 horas. Sabemos claro que un factor importante que puede alterar la eficiencia de un panel

fotovoltaico es su temperatura pero al parecer según las gráficas 120 y 121 esto no sería tan importante para el caso de un panel con Seguimiento solar.

Ahora en las gráfica de la Energía de las figuras 124 y 125, corroboran lo mencionado líneas antes, puede notarse, que para ambos meses la energía incidente en el panel en Seguimiento es siempre mayor que la del panel estacionario así como a su vez la energía generada por el panel con seguimiento supera a la generada por el panel estacionario. Si comparamos las gráficas del mes de Octubre con las de Noviembre observamos que si bien, este último, tuvo tardes nubladas la energía obtenida es aun así superior, perjudicándose el panel Estacionario pero beneficiándose aquel en Seguimiento.

Finalmente en la figura 126 al ver las gráficas observamos que la eficiencia de panel mejora con el uso del seguidor superando al de un panel Estacionario incluso cuando esta disminuye por causas climáticas siempre es favorecido al que posee el Seguidor Solar.

Podríamos comparar nuestros resultados con los de otras investigaciones, como son la de Abu-Kader, Badran y Abdallah realizadas en Jordan el 2008, en donde, usando un seguidor solar, lograron incrementar la energía generada de un sistema fotovoltaico entre un 30% a un 45%; o también, compararlo con los estudios realizados por Sungur en Turkia el 2009 en donde logra un incremento energético del 42,6% usando PLC como dispositivo de control programable.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

5.1. Conclusiones

- 5.1.1. Después de muchos meses de trabajo, se pudo alcanzar el objetivo principal planteado para esta tesis, lográndose construir un Seguidor solar diario automático. Siendo su principal aplicación, la evaluación energética comparativa de paneles fotovoltaicos, entre uno que sigue al sol y otro estacionario, gracias al desarrollo e implementación del sistema de registro automático del Seguidor solar, pudiendo recolectar, procesar, graficar y analizar exitosamente los resultados obtenidos entre el 20 de octubre y 10 de Noviembre del año 2017.
- 5.1.2. Se logró construir un sensor de orientación solar capaz de funcionar bajo condiciones diurnas, con un sistema de autobalance dinámico de puente Wheatstone lo que permite variar la resolución de frontera y aumentando así el grado de exactitud del seguimiento, consiguiendo a su vez, construir para este, un sistema mecánico que sirviera de soporte y permitiera el movimiento, basado en la montura ecuatorial. Dicho movimiento se logró gracias a una tarjeta de potencia especializada cuyo único fin era controlar dos motores paso a paso unipolares, necesarios para el movimiento del seguidor (los músculos de este), reduciendo a un mínimo la cantidad de

cables provenientes de la tarjeta Arduino, siendo estos un número de cuatro. También se logró construir un sistema de arranque y control de potencia que fuera capaz de apagar completamente y luego, con un mínimo de luz diurna, encender automáticamente y desde cero el sistema evitando así pérdidas de energía innecesarias durante la noche, sin sacrificar su automatización.

5.1.3. Se construyó una tarjeta de registro de datos automático, para el control de la información proveniente de los sensores de temperatura, irradiancia y potencia de los paneles fotovoltaicos, así como implementar una tarjeta de control para la tarjeta SD, y una de control de la fecha y de la hora. Para esto se logró desarrollar exitosamente un algoritmo para el control de la tarjeta Arduino Mega, usando como entorno de trabajo el IDE de Arduino.

5.1.4. Fue necesario implementar los sensores que irían conectados a la tarjeta de registro, logrando esto con una impresora 3D, para las partes externas de los sensores así como los acoples, consiguiendo fabricar exitosamente las piezas que permitieran sostener a los paneles fotovoltaico junto con la implementación de los sensores de Irradiancia solar global que nos permitieron analizar la energía entrante al sistema durante el día, a su vez que se lograron implementar sensores de temperatura, permitiéndonos monitorear la diferencia térmica entre los paneles fotovoltaicos según su orientación y la de la temperatura ambiente.

- 5.1.5. De la comparación energética se concluye que la potencia generada por el panel fotovoltaico policristalino utilizado aumenta con el uso de un sistema de seguimiento, siendo siempre superior incluso bajo condiciones adversas, como tardes nubladas, siendo este el caso de los primeros días de Noviembre. Concluimos que si bien el panel que sigue al sol alcanza temperaturas más elevadas, siendo 40°C la máxima alcanzada, mientras que la del estacionario fue de 34,4°C; el panel, aun así genera mucha más energía, con una diferencia energética de 11,2Wh para los días de octubre y de 14,1Wh para los días de Noviembre, representando una ganancia energética para Octubre del 34,78% y del 41,3% para el mes de Noviembre.
- 5.1.6. Finalmente se concluye que la implementación de un seguidor solar aumenta la eficiencia de los paneles fotovoltaicos policristalinos utilizados en este trabajo, siendo este incremento de un 2,13% para los días que correspondían al mes de octubre y de un 2,77% para los días que correspondieron al mes de Noviembre. Comprobándose así de manera experimental nuestra teoría y ofreciendo un prototipo y una metodología que permita la evaluación de la eficiencia de paneles fotovoltaicos según su orientación.

5.2. Sugerencias

- 5.2.1. Las ecuaciones hasta la 7 son basadas en el año 1950, sería interesante realizar un nuevo estudio actualizado y modelar unas nuevas ecuaciones.
- 5.2.2. Realizar un diseño de compensación de temperatura para la celda de sulfato de cadmio ya que es especialmente sensible a la temperatura
- 5.2.3. La ecuación de Spencer no predice la declinación para ciclos grandes como los que se dan cada 42000 años en donde existe corrimiento entre el ángulo del eje polar con el de la normal a la eclíptica entre $21,45^\circ$ hasta $24,15^\circ$, sería excelente realizar un trabajo en donde se proponga una ecuación solucionando este problema en caso de que no existiera.
- 5.2.4. En nuestro caso fue desarrollado en madera debido al bajo costo y fácil forma de trabajarla, que para fines de prototipo fue suficiente, pero en caso de someterlo a un constante trabajo de campo sería excelente poder hacer las piezas en aluminio u otro material resistente a la deformación debido al clima.
- 5.2.5. Algunos circuitos así como los motores están expuestos, esto debido nuevamente a la falta de recursos y tiempo para poder aislarlos con otros materiales como algún plástico impermeable.
- 5.2.6. Se podría desarrollar una ecuación que linealice el circuito de acondicionamiento de LDR's para la medición de irradiancia, evitando así tener que calibrarlos.

- 5.2.7. Se podría mejorar el sensor de seguimiento para que no solo permita el seguimiento en el eje de la eclíptica, sino también para el de la declinación. Ya que al parecer para sistemas automáticos es mejor que la parte principal de su funcionamiento sea completamente de Circuito cerrado (retroalimentado) conservando, sólo como referencia las configuraciones esperadas comunes en los de circuito abierto (no retroalimentado).
- 5.2.8. El mismo trabajo realizado por el software Origin se podía haber programado directamente en el Arduino.
- 5.2.9. Se recomienda que para fines de análisis sería mejor tener una sola hoja de registro de alta resolución es decir que el intervalo de tiempo entre toma y toma de datos sea el más pequeño posible, ya que tener varias hojas de registro podría ser engorroso y como fue explicado llegado el momento del análisis minucioso, éstas no son utilizadas.
- 5.2.10. Sería interesante que para el futuro, de contarse con financiamiento, pudiera ampliar las prestaciones del Seguidor solar convirtiéndolo en una estación de registro climático y análisis de potencial energético, así como de dotarlo de autonomía energética, dejando las puertas abiertas para un sin número de investigaciones y tesis relacionadas con energía solar.

REFERENCIAS

- Abu-Khader, M. M., Badran, O. O., & Abdallah, S. (2008). *Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan*. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(3), 864-873.
- Asociació Observatori Esteve Duran. (2016). *Fundació Observatori Esteve Duran: Material Didàctico*. Recuperado de <http://astrogea.org>
- Beltrán, J. (2007). *Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos*. (Tesis de Maestría en Ciencias). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, México.
- Blum, J. (2013). *Exploring Arduino: Tools and techniques for engineering wizardry*. Indianapolis IN: Wiley.
- Boylestad, R. L. y Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (10a ed.). México: Pearson Educación.
- Chang, T. P. (2009). *Output energy of a photovoltaic module mounted on a single-axis tracking system*. *Applied energy*, 86(10), 2071-2078.
- Chong, K.-K., Wong, C.-W., Tunku, U. y Rahman, A. (2010). *General formula for on-Axis sun-tracking system*: INTECH Open Access Publisher.
- Coughlin, R. F. y Driscoll, F. F. (1991). *Operational amplifiers and linear integrated circuits* (4th ed.). Englewood Cliffs N.J.: Prentice Hall.
- De la Cruz, C. (2012). *Seguidor solar adaptativo basado en un controlador lógico programable para paneles fotovoltaicos*. *Apunt. cienc. Soc.* 2012; 02(02).

- Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (2ª ed.) Wisconsin, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. (4th ed.). Hoboken: John Wiley
- Eldin, S. S., Abd-Elhady, M. S., & Kandil, H. A. (2016). *Feasibility of solar tracking systems for PV panels in hot and cold regions*. *Renewable Energy*, 85, 228-233.
- Electronics Tutorials. (2015). *The Logic "OR" Gate*. Recuperado de: http://www.electronics-tutorials.ws/logic/logic_3.html
- Garg, H. P. y Garg, S. N. (1993). *Measurement of solar radiation—I. Radiation instruments*. *Renewable energy*, 3(4-5), 321–333.
- Guardado Gutiérrez, D. H. y Rivera Chávez, V. E. (2012). *Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltáico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES* (Tesis de grado). Universidad de El Salvador. El Salvador.
- Guide to meteorological instruments and methods of observation* (7th ed.). (2008). WMO-[publication]: no. 8, Ed. 7. Geneva: WMO.
- Hultberg, D. E. (1983). *Solar tracking apparatus and system*. United States Patent. Patente de invención, US 4,368,962.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto, New York: Academic Press.

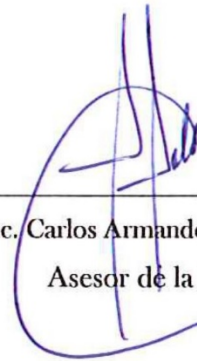
- Kasuya, S. (1990). *Automatic solar lighting apparatus having a solar following sensor*. United States Patent. Patente de invención, US 4,922,088.
- Kok-Keong, C. & Chee-Woon, W. (2010). *General Formula for On-Axis Sun-Tracking System. Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*. Dr. Reccab Manyala (Ed.). Recuperado de <http://www.intechopen.com>
- Lee, C.-Y., Chou, P.-C., Chiang, C.-M. y Lin, C.-F. (2009). *Sun Tracking Systems: A Review*. *Sensors*, 9(5), 3875–3890. <https://doi.org>
- Lorenzo, E. y Araujo, G. L. (1994). *Electricidad solar: Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos* (1ª ed.). Madrid: Instituto de Energía Solar.
- Margolis, M. (2011). *Arduino cookbook*. Beijing, Farnham [Dorset, England]: O'Reilly.
- Myers, D. (2013). *Solar radiation: Practical modeling for renewable energy applications. Energy and the environment*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Nebraska Astronomy Applet Project. (24 de Septiembre del 2010). *SunMotions068*. Recuperado de <http://www.astro.unl.edu/naap/motion3/motion3.html>
- Red Rock Energy. (2013). *Analemma – The solar tracking software Project*. Recuperado de: <http://www.redrok.com/analemma.htm>
- Robbins, Jr. R. W. (1977). *Solar Energy Powered Sun Tracker*. United States Patent. Patente de invención, US 4,027,651.

- Şen, Z. (2008). *Solar energy fundamentals and modeling techniques: Atmosphere, environment, climate change, and renewable energy*. London: Springer.
- Snyder, W. L. (1984). *Solar tracking apparatus for a gimbaled body*. United States Patent. Patente de invención, US 4,442,348.
- Soto, E. (2014). *Plataforma de seguimiento para cocinas y hornos solares*.
- Spencer, J. W. (1971). *Fourier series representation of the position of the sun*. Search, 2(5), 172-172.
- Sungur, C. (2009). *Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey*. Renewable Energy, 34(4), 1119-1125.
- Tassen, D. (1979). *Sun tracker with dual axis support for diurnal movement and seasonal adjustment*. United States Patent. Patente de invención, US4,172,739.
- Tecno Desarrollos. (2014). *Concentrador Solar con posicionador electrónico*. Recuperado de: <http://tecnodesarrollos.com.mx/ConcentradorSolar.html>
- Tr3sdland. (2011). *Componentes – El sensor LDR*. Recuperado de: <http://www.tr3sdland.com/2011/11/componentes-el-sensor-ldr/>
- Tudorache, T., & Kreindler, L. (2010). *Design of Solar Tracker System form PV Power Plants*. Acta Polytechnica Hungarica, 7(1), 23-26.
- Twidell, J. y Weir, A. D. (2006). *Renewable energy resources* (2nd ed.). London, New York: Taylor & Francis.

- Universidad de Antioquia. (Diciembre, 2011). *Módulo – El movimiento del Sol y la Bóveda celeste: Para leer en el Metro. Semillero de Astronomía*, 1-8.
- Vandenberg, L. B. (1982). *Self aligning solar collector*. United States Patent. Patente de invención, US 4,365,616.
- Vignola, F., Michalsky, J. y Stoffel, T. L. (2012). *Solar and infrared radiation measurements. Energy and the environment*. Boca Raton FL: CRC Press.
- Volna, W. M.(1980). *Solar Tracking Device*. United States Patent. Patente de invención, US 4,202,321.
- Würfel, P. (2005). *Physics of solar cells: From principles to new concepts*. Weinheim: Wiley-VCH
- Yao, Y., Hu, Y., Gao, S., Yang, G., & Du, J. (2014). *A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies*. *Renewable Energy*, 72, 88-98.



Bach. Alessandro De La Gala Contreras
Autor de la Tesis



Msc. Carlos Armando Polo Bravo
Asesor de la Tesis